55
ИФТПС

XII ЕВРАЗИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ

по проблемам прочности и ресурса
в условиях климатически низких температур,
посвященный 55-летию Института физико-технических
проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН и
120-летию Н.В. Черского

Сборник трудов
EURASTRENCOLD-2025

XII ЕВРАЗИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ ПО ПРОБЛЕМАМ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР, ПОСВЯЩЕННЫЙ 55-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА им. В.П. ЛАРИОНОВА СО РАН И 120-ЛЕТИЮ Н.В. ЧЕРСКОГО

ИФТПС

ЯНЦ ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

СО РАН ИПНГ

10-14 ноября 2025 г.
г. ЯКУТСК

EURASTRENCOLD-2025

Сборник трудов XII Евразийского симпозиума
по проблемам прочности и ресурса
в условиях климатически низких температур,
посвященного 55-летию Института физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН и 120-летию Н.В. Черского
(10–14 ноября 2025 г., г. Якутск)

Киров
2025

© АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2025
© Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 2025
© Коллектив авторов, 2025

УДК 62
ББК 30.3
Е22

Редакционная коллегия:
Лебедев М.П., академик РАН; Лукин Е.С., к. т. н. (отв. редактор);
Протодьяконова Н.А., к.ф.-м.н.; Стручков Н.Ф., к. т. н.; Захарова М.И., к. т. н.; Сивцева А.В.

Е22 EURASTRENCOLD-2025 [Электронный ресурс]: сборник трудов XII Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 55-летию Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН и 120-летию Н.В. Черского (10–14 ноября 2025 г., г. Якутск). – Электрон. текст. дан. (24,1 Мб). – Киров: Изд-во МЦИТО, 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: PC, Intel 1 ГГц, 512 Мб RAM, 24,1 Мб свобод. диск. пространства; CD-привод; ОС Windows XP и выше, ПО для чтения pdf-файлов. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-908117-15-9

Научное электронное издание

В сборнике трудов XII Евразийского симпозиума дан краткий обзор широкого спектра современных научно-технических работ, связанных с решением актуальных проблем машиностроения, механики, материаловедения и энергетики. В нем рассмотрены фундаментальные и прикладные аспекты физики прочности и механики разрушения при низких температурах, вопросы надежности и ресурса конструкций и сложных технических систем, эксплуатирующихся в условиях климатически низких температур, новые результаты в области исследования климатической стойкости полимерных композиционных материалов, проблемы создания новых хладостойких материалов и технологий, энергетики, транспорта и нефтегазового комплекса на Севере и в Российской Арктике как основы обеспечения безопасности и ускоренного, опережающего развития промышленного потенциала Северо-Востока РФ и РС(Я).

Редакционная коллегия предупреждает, что за содержание
представленной информации ответственность несут авторы докладов.
Материалы публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-908117-15-9

УДК 62
ББК 30.3

© АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2025
© Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 2025
© Коллектив авторов, 2025

Содержание

Пленарные доклады

Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Лавренчук В.А.
МЕТОДЫ ЗОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ 13

Кычкин А.К., Лебедев М.П., Старцев О.В., Гаврильева А.А.
КЛИМАТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА: МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД (МИКРО-МЕЗО-МАКРО) 28

Ялыгин С.А., Голиков Н.И., Ермаков Б.С., Слепцов О.И., Швецов О.В.
БУРООПУСКНЫЕ СВАИ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ММГ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ 33

Секция 1. Сварка, родственные процессы и технологии повышения прочности и надежности конструкций, узлов и деталей машин. Актуальные вопросы современной металлургии. Особенности применения норм и методов контроля качества сварных соединений и материалов

Голиков Н.И., Семёнов С.В., Слепцов Г.Н., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П., Кузнецов С.В.
ПРОБЛЕМА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ В АРКТИКЕ И МЕТОДЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ 38

Жужгина Т.А., Скутин В.С.
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МАРТЕНСИТНЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ 42

Курган К.А., Клопотов А.А., Клименов В.А., Стрелкова И.Л.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ВЫЯВЛЯЕМЫХ В ОСНОВНОМ МЕТАЛЛЕ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ 47

Максимова Е.М., Слепцов Г.Н., Слепцов О.И., Ноев И.И., Солдатов К.В., Тарасов П.П.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА СРЕДНЕГО ОТВАЛА АВТОГРЕЙДЕРА 54

Михайлов А.Ю., Сидоров М.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ СТАЛИ 10ХСНД 60

Москвитина Л.В., Слепцов Г.Н., Аммосов Г.С.
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ЭКПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ 65

Николаев А.С., Паршин С.Г., Иванова И.В, Коротеев А.О.
АНИЗОТРОПИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ 70

Санников И.И., Голиков Н.И., Семёнов С.В., Иванов М.А.
АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 10ХСНД ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР 75

Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М., Дмитриев П.С., Семенов С.В.
К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР СЕВЕРА 79

Сараев Ю.Н., Дмитриев П.С.
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 82

Семенов С.В., Голиков Н.И.
ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ НА СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ 85
Слепцов Г.Н., Слепцов О.И.
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ 88
Старостин Н.П., Тихонов Р.С., Петров Д.Д.
ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ПРИВАРКЕ СЕДЛОВОГО ОТВОДА К ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР 94
Степанова К.В., Слепцов О.И., Слепцов Г.Н., Солдатов К.В., Степанов В.Е., Сивцева А.В.
ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ 99

Секция 2. Физика и механика прочности материалов, надежность, целостность и ресурс, безопасность сложных технических систем в условиях холодного климата. Кинетика хрупкого разрушения и низкотемпературный вязко-хрупкий переход в сталях и сплавах

Алексеев А.А., Сыромятникова А.С., Большев К.Н.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРАХ, СТАЛЯХ 103
Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С., Иванов А.Р.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРАХ, СТАЛЯХ 106
Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А., Яковлев Ю.А.
ОБ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДЗЕМНОМ ТРУБОПРОВОДЕ НА БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ 109
Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Корнилова З.Г.
КОРРОЗИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ НА СЕВЕРЕ 113
Андреев Я.М., Прокопьев Л.А., Максимова Е.М.
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЖЕСТКОСТЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ 118
Антонов А.А., Иванов Д.С., Яковлев Ю.А., Корнилова В.В.
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ГРУНТА 122
Аргунова А.А., Кузьмин С.А., Адамов Р.Г., Васильева М.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ЗАГЛУШКИ ОТОПИТЕЛЬНОГО РЕГИСТРА 127
Аргунова А.А., Кузьмин С.А., Адамов Р.Г., Васильева М.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА 132
Ачикасова В.С., Лепова К.Я.
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТМ-АНАЛИЗА ИЗЛОМОВ 136
Григорьев А.В., Бурнашев А.В., Иванов А.Р., Бурнашев Е.А.
ОБОСНОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ВЗЛИВА ТОПЛИВА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ИЗ СТАЛИ СТ3 В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР 140
Дьячковский И.И., Лепов В.В., Ачикасова В.С., Григорьев А.В.
МИКРОМЕХАНИЗМЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА 144
Иванов А.Р.
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЕЙ 149

Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А., Корнилова В.В.
О СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ В ПОДЗЕМНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ МОРОЗНЫХ ПУЧЕНИЯХ 153
Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Иванов Т. Д., Аммосова Л.С.
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ С УДАЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОСТОВ 159
Ильин Г.Ю., Бурнашев А.В.
МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УТЕЧКИ ГАЗА И РАНЖИРОВАНИЕ ОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ 164
Исакова Т.А., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Аргунова А.Г., Соловьев Т.М., Чириков А.А., Петров В.В., Платонов Б.Р.
МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРА ИСКОПАЕМОЙ МАМОНТОВОЙ КОСТИ 168
Кузьмин С.А., Красильников Д.А., Егорова А.Д., Максимов А.А., Петров А.М.
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ДОБАВКИ, КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА И ДЕРЕВА 172
Прокопьев Л.А., Лукин Е.С., Максимова Е.М.
ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА БИАКСИАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ 175

Секция 3. Фундаментальные и прикладные аспекты технологий создания и обработки перспективных материалов для экстремальных условий Севера и Арктики (материаловедение)

Акимова М.П., Сивцева А.В., Шарин П.П., Яковлева С.П.
СТРОЕНИЕ И ДЕФЕКТЫ НАНОАЛМАЗОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА И МЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ 179
Акимова М.П., Сивцева А.В., Шарин П.П., Яковлева С.П.
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ 183
Акимова М.П., Сивцева А.В., Шарин П.П., Яковлева С.П.
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТАВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ДЕТОНАЦИОННЫХ И ПРИРОДНЫХ НАНОАЛМАЗОВ 187
Акимова М.П., Сивцева А.В., Шарин П.П., Корякина В.В., Яковлева С.П.
ЯДЕРНАЯ МАГНИТНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ И ПРИРОДНЫХ НАНОАЛМАЗОВ ДО И ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 192
Андреева А.В., Саввинова М.Е., Николаева Л.А., Буренина О.Н.
СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРОБЕТОНА ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ 196
Андреева А.В., Саввинова М.Е., Николаева Л.А., Буренина О.Н.
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОБЕТОНОВ ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ 202
Борисова М.З.
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ 207
Бытыров А.П.
СОЗДАНИЕ СОСТАВОВ РАСТВОРНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ 210
Кычкина Ю.В., Капитонова Ю.В.,. Тарасова П.Н, Охлопкова А.А.
РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПРИРОДНОГО МИНЕРАЛА ГАЛЛУАЗИТА 214

Петров П.П., Тарасов П.П., Данилов А.Д., Степанова К.В., Скрябин Т.Н.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ СТАЛЬНОГО ЛОМА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ 217
Сибиряков М.М.
ПОЛУЧЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ СЛОИСТОГО СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА 221
Сивцева А.В., Акимова М.П., Шарин П.П., Яковлева С.П., Протопопов Ф.Ф., Корякина В.В.
ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОАЛМАЗОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА И МЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ, ДО И ПОСЛЕ ИХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 224
Сивцева А.В., Акимова М.П., Шарин П.П., Яковлева С.П., Стручков Н.Ф.
ЗАВИСИМОСТЬ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ НАНОАЛМАЗА 228
Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г., Васильева М.И., Климова А.М.
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГРУЗОВОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА 233
Сыромятников Д. И., Сыромятникова А.С.
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА И БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН 237
Сыромятников Д. И., Сыромятникова А.С., Захарова М.И.
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА И БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА 241
Тарасов П.П., Петров П.П., Данилов А.Д., Степанова К.В., Слепцов Г.Н.
ВЫПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ГАЗОВОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ 244
Федотов А.А., Сафонова М.Н.
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЙ МАТЕРИАЛ, УПРОЧНЕННЫЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА 247
Федотова М.А., Алексеева П.А.
ВКЛЮЧЕНИЯ В ПРИРОДНОМ САПФИРЕ 252
Федотова М.А., Иванов М.А.
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ БРИЛЛИАНТОВ ПО ЦВЕТУ 256
Эверстова Д.Г.
ВКЛЮЧЕНИЯ В ПРИРОДНОМ РУБИНЕ 261
Яковлева С.П., Махарова С.Н.
СТРУКТУРНАЯ ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА 265

Секция 4. Вопросы математического моделирования материалов и технологий при решении физико-технических проблем Севера

Голых Р.Н., Барсуков А.Р., Маняхин И.А., Хмелёв В.Н.
ТРЁХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ СРЕД С ГАЗАМИ С ЦЕЛЬЮ УТИЛИЗАЦИИ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ, УСКОРЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ И ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВОВ 270
Гусев Е.Л., Петрова П.Н., Гоголева О.В.
ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ 275

Гусев Е.Л., Федоров Ю.Ю.
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ 279
Гусев Е.Л., Черных В.Д.
ПРИМЕНЕНИЕ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ 284
Иванов С.А., Лепов В.В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННЫХ И КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ 287
Карпов И.Д., Ялыгин С.А., Альхименко А.А., Ермаков С.Б.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В АРКТИКЕ 290

Секция 5. Полимерные композиционные материалы и конструкции из них: вопросы создания, испытания и применения в экстремальных условиях Севера

Аргунова А.Г., Петухова Е.С., Федоров А.Л.
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ КАНИСТР НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА 294
Афанасьева Н.Н., Сивцева-Гладкина Н.П., Спиридонов А.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЦЕОЛИТА NaX НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА 297
Ботвин Г.В., Петров В. В., Чириков А.А., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Платонов Б.Р., Аргунова А.Г., Петухова Е.С.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ БИВНЕЙ МАМОНТА III-IV СОРТА ПОСРЕДСТВОМ ПРОПИТКИ СМОЛАМИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА СУВЕНИРНОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ЧПУ-ФРЕЗЕРОВАНИЯ 301
Глуховеря Е. Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ 305
Дроздова Е.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, НАПОЛНЕННОГО СВЕРХЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ 308
Ерофеевская Л.А., Далбаева Е.А., Кычкин А.К., Дьяконов А.А., Салтыкова А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПЕЙЗАЖА С ПОВЕРХНОСТЕЙ ПКМ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. ЯКУТСКА 312
Ерофеевская Л.А., Салтыкова А.Л., Лукачевская И.Г., Кычкин А.К., Далбаева Е.А., Вит А.А.
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ БИОЗАЩИТЫ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА 316
Копырин М.М., Семенов С.О., Кычкин А.К.
ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ВЛАГИ В ЭПОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ 320
Марков А.Е., Дьяконов А.А., Копырин М.М., Кычкин А.К., Туисов А.Г., Охлопкова А.А.
АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ 324

Нечаев А.А., Старцев В.О., Павлов М.Р.
СТАРЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25 В НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ 327
Нечаев Д.В., Ермаков С.Б.
ПКМ-СВАИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ – МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАКТОРОВ РИСКА ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО И СУБАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНОВ 332
Петухова Е.С., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Петров В.В., Чириков А.А., Платонов Б.Р., Аргунова А.Г., Ерофеевская Л.А.
ВЛИЯНИЕ УЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ И ХРАНЕНИЯ НА СВОЙСТВА БИВНЯ МАМОНТА mammuthus primigenius 337
Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИ ПЭНД В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНЫХ И УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ 341
Салтыкова А.Л., Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Лукачевская И.Г., Далбаева Е.А., Вит А.А.
БИОПОВРЕЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО КЛИМАТА 346
Ставров Д.А., Кропотин О.В., Соколов Д.В.
ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ 349
Терешкин А.Л., Лукачевская И.Г., Низин Д.Р.
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА 352
Федоров Ю.Ю., Буренина О.Н.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ 357

Секция 6. Тепломассоперенос и термомеханика дисперсных и неоднородных сред. Методы и средства температурных измерений

Андреев А.С., Большев К.Н., Малышев А.В.
ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ЗИМНЕЙ ВЕРХНЕЙ ОДЕЖДЫ 361
Маняхин И.А., Голых Р.Н., Хмелёв В.Н.
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» В УСЛОВИЯХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ 365
Пермяков П.П., Попов Г.Г., Варламов С.П., Кириллин А.Р.
ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИИ НА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ 369
Семенов С.О., Малышев А.В., Большев К.Н. , Саввинова Н.А.
РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО МЕТОДА 374

Секция 7. Проблемы развития энергетики, транспорта энергоресурсов и нефтегазового комплекса северных регионов

Александров В.М., Закиров Н.Н.
ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ, СВЯЗАННЫХ С КОНУСАМИ ВЫНОСА ТУРБИДИТНЫХ ПОТОКОВ 379
Алексеев Н.В., Прохоров Д.В.
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВАКУУМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА СЕВЕРЕ 385

Васильев П.Ф., Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ РАЙОНОВ 390
Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М.
МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА 393
Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М.
СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РАЙОНОВ С МАЛЫМИ ПЛОТНОСТЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....396
Вит А.А., Салтыкова А.Л., Ерофеевская Л.А.
ВЛИЯНИЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЯ НА БИОРАЗНООБРАЗИЕ И ЭКОСИСТЕМНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ 400
Волотовский Е.С.
ОБРАЗОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ИЗМОРОЗИ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ: МОДЕЛИ И БАРЬЕРЫ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ 404
Давыдов А.Д., Ермаков Б.С., Клочков Ю.С.
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АРКТИЧЕСКИХ ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....407
Далбаева Е.А., Ерофеевская Л.А., Вит А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕБАЗЫ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) 411
Дамдинжав М.
ЦЕМЕНТОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГАХ В ЗАСУШЛИВОМ И ХОЛОДНОМ КЛИМАТЕ: УСТОЙЧИВЫЙ ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СОВРЕМЕННЫХ ДОБАВОК 415
Ерофеевская Л.А., Вит А.А., Салтыкова А.Л.
РОЛЬ МИКРОБИОТЫ В БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ ...422
Захаров В.Е., Петрова Т.Н.
ЗАДАЧИ ПЕРЕВОДА НА СОРТОВОЙ УГОЛЬ КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) 425
Калачева Л.П., Иванова И.К.
АНАЛИЗ ГАЗОГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СНАБЖЕНИЯ ГАЗОМ ТРУДНОДОСТУПНЫХ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) 430
Ли-Фир-Су Р.П.
ПОДВЕСНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА.....435
Макарова Л.К.
ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ИК-СПЕКТРОСКОПИЕЙ И МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 440
Местников Н.П., Манусов В.З., Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ 444
Местников Н.П., Манусов В.З.
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОДНОСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....448
Местников Н.П., Манусов В.З., Реев В.Г.
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДВУХСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....452

Ноев И.И., Филиппов Д.В., Сабынин В.В.
ОСОБЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНО-ДОРОЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ 456
Павлов Н.В.
ПРИОРИТЕТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ): ОПЕРАТИВНЫЕ МЕРЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....460
Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Унжаков А.С.
ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТИВОПУЧИННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ..464
Прохоров Д,В., Прохоров В.А.
РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НА УДАРНЫЕ И ВИБРАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ВАКУУМНЫХ ТРУДОК СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ 467
Решетникова В.Р., Корякина В.В.
ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА ФРЕОНА R134A В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.....471
Салтыкова А.Л., Вит А.А., Ерофеевская Л.А.
ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОРЕМЕДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ 476
Сильвестров С.А.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....480
Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ 483
Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ ...486
Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ.....488
Швецов О.В., Ермаков Б.С., Кондратьев С.Ю.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ.....492
Ялыгин С.А., Голиков Н.И., Ермаков Б.С., Слепцов О.И., Швецов О.В.
БУРООПУСКНЫЕ СВАИ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ММГ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ 497

Секция 8. Оценка и прогнозирование риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: мониторинг, ДЗЗ, ГИС

Алексеева А.В., Мордовской П.Г., Максимов Т.Х.
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИЕЙ.....502
Ефремов В.Н.
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПО СЕЗОННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА 504
Ефремов В.Н.
ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОМОРОЖЕННОСТИ И ГРАДИЕНТА ПРОМЕРЗАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ 510
Захарова М.И.
ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА ОТ АВАРИЙ ПОДЗЕМНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 514

Захарова М.И.
ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА ОТ АВАРИЙ НАДЗЕМНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 520
Прохоров В.А., Данилова Е.Н.
ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ СЕЛА ОКТЕМЦЫ ПРИ НАВОДНЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ 526
Сивцев С.И., Александров А.Р., Ерофеевская Л.А.
ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО-МАГНИТНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕФТЕПРОДУКТОВ 530
Тихонова С.А., Стручкова Г.П, Капитонова Т.А.
ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ВЛИЯНИЕ ИРЕЛЯХСКОГО ДРАЖНОГО ПОЛИГОНА НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЯКУТИИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОСМОСНИМКОВ 534
Шабуневич В.И.
ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА БЕЗБАЛЛАСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И СИБИРИ 539
Шабуневич В.И.
К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОСВОЕНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ 546
Шеин Н.С., Стручкова Г.П., Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Тарская Л.Е.
ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ INSAR И АНАЛИЗА ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ДАМБ ИРЕЛЯХСКОГО ДРАЖНОГО ПОЛИГОНА 554

Список авторов 559

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 504.054
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-13-27

МЕТОДЫ ЗОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИЯХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Аковецкий В.Г., Афанасьев А.В., Лавренчук В.А.
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва
E-mail: geoinforisk@mail.ru

Аннотация. *Длительные сроки реализации проектов нефтегазового комплекса в условиях Арктической зоны создают риски возникновения природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. Они обусловлены изменением параметров климатической системы Земли, а также износом оборудования и снижением его коррозионной устойчивости. Основное внимание в работе уделено разработке методов оценки геоэкологических рисков, вызванных длительной эксплуатацией объектов нефтегазового комплекса в Арктической зоне. Особое внимание уделено проблеме зонирования геодинамически активных зон нарушений. Рассмотрены дистанционные методы их зонирования и паспортизации.*

Ключевые слова: *риски, геоэкологический мониторинг, дистанционное зондирование Земли, изменение климата, геодинамические процессы, месторождение нефти и газа, геоинформационная среда*

METHODS OF ZONE DEVISION OF HAZARDOUS NATURAL AND TECNOGENIC PROCESSES ON TERRITORY IN THE OIL AND GAS COMPLEX OF THE ARCTIC ZONE

Akovetsky V.G., Afanasyev A.V., Lavrenchuk V.A.
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NIU), Moscow

Abstract*. Long-term oil and gas project implementation periods in the Arctic zone create risks of natural and technogenic emergencies. These are caused by changes in the Earth's climate system, as well as equipment wear and tear and reduced corrosion resistance. This paper focuses on developing methods for assessing geoecological risks caused by the long-term operation of oil and gas facilities in the Arctic zone. Particular attention is given to localization to de-vision of geodynamically active disturbance zones. Remote methods for their of zone devision and certification are considered.*

Keywords: *risks, geoecological monitoring, Earth remote sensing, climate change, geodynamic processes, oil and gas fields, geoinformation environment.*

Задачи, связанные с оценкой рисков возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера для устойчивого развития государств, в начале XXI столетия вышли на передний план исследований ученых многих стран. Основные подходы к их решению на международном уровне были отражены в Сендайской рамочной программе по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. [1]. Необходимость их решения в задачах обеспечения экологической безопасности территорий Российской Федерации нашла свое отражение в Указах Президента «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г.» от 19.04.2017 г. № 176 [2] и «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» от 02.07.2021 г. № 400 [3].

В этих документах в качестве определяющих угроз экологической безопасности отмечена активизация опасных природных и техногенных процессов, особенно на климатозависимых территориях Арктической зоны (КТАЗ) Российской Федерации (РФ). Особенно остро они проявляются при реализации проектов нефтегазового комплекса (НГК), что обусловлено вариациями параметров геологической среды на этих территориях. Здесь в качестве геологической среды будем рассматривать многокомпонентную динамическую систему (горные породы, подземные воды, газы, физические поля – сейсмические, тепловые, гравитационные,

электромагнитные), находящиеся под воздействием опасных геодинамических процессов, вызванных природными и техногенными источниками. Ее границами являются верхняя часть литосферы и часть тропосферы, вариации параметров которых происходят во время «жизненного цикла» реализуемых проектов и непосредственно связаны с условиями их реализации. Опасные вариации параметров компонентов геологической среды вызваны изменением климата, интенсификацией воздействия на недра, старением и износом оборудования, усилением техногенной нагрузки на компоненты окружающей среды (ОС). Контроль их состояния требует использования комплексных систем геоэкологического мониторинга, обеспечивающих управление рисками в задачах управления экологической безопасностью проектов НГК.

Успешное решение данного класса задач во многом зависит от методов зонирования территорий, обеспечивающих пространственную градацию участков проявления рисков возникновения ЧС, соответствующего уровня воздействия. Наличие таких зон позволяет оптимальным образом выбрать системы мониторинговых наблюдений соответствующего уровня, обеспечивающих получение полной информации о происходящих процессах. Такой подход предполагает установление соответствия между информационными показателями системы дистанционных мониторинговых наблюдений и градациями натурных моделей, используемых для описания воздействий опасных процессов, инициирующих вариации контролируемых параметров геологической среды. Его применение ориентировано на комплексное использование рассматриваемых методов при переходе к автоматизированным и автоматическим режимам интерпретации результатов мониторинга.

Разработка методов зонирования опасностей, должна выполняться с учетом:

уровня охвата контролируемой территории;

места расположения и функциональных параметров реализуемого проекта;

видов источников и уровней воздействия риск-факторов, инициирующих проявление опасных процессов (природных и техногенных);

условий реализации проекта на различных стадиях его «жизненного цикла» (проектирование, строительство, эксплуатация, ликвидация);

значений допустимого риска возникновения аварий на зонируемой территории;

характеристик систем мониторинга, используемые для контроля уровня воздействий опасных процессов на зонируемой территории.

Здесь под опасностью или риск-фактором понимается потенциальный источник потерь (вреда), который может быть нанесен людям, имуществу или ОС, а также любое неконтролируемое событие или условие, способное самостоятельно или в совокупности с другими событиями и условиями привести к инциденту, аварийной или чрезвычайной ситуаций (ЧС). При этом выделяются уровни опасности, которые при наличии неопределенной ситуации, могут привести к возможным серьезным последствиям. Основные методические подходы решения данного класса задач рассматриваются в ходе проведения работ по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах (ОПО) [4, 5]. Основное внимание в данных работах уделено подходам, ориентированным на оценку формальных статистических показателях, рассматривающих связь «частота событий-тяжесть последствий» (таблица 1).

Таблица 1. Матрица критичности «частота – тяжесть последствий»

Частота возникновения события		Тяжесть последствий			
		Катастрофическое	Критическое	Некритическое	Событие с пренебрежимо малыми последствиями
Частое	>1	A	A	A	C
Вероятное	10^{-1}-10^{-2}	A	A	B	C
Возможное	10^{-2}-10^{-4}	A	B	B	C
Редкое	10^{-4}-10^{-6}	A	B	B	Д
Практически невероятное	$<10^{-6}$	B	C	C	Д

Представленное в таблице зонирование событий по тяжести последствий характеризует четыре уровня:

катастрофическое событие (I) – приводит к нескольким смертельным исходам для персонала, полной потери объекта; невосполнимому ущербу ОС;

критическое событие (II) – угрожает жизни людей, приводит к существенному ущербу имуществу и ОС;

некритическое событие (III) – не угрожает жизни людей, возможны отдельные случаи травмирования людей, не приводит к существенному ущербу имуществу или ОС;

событие с пренебрежимо малыми последствиями (IV) – событие, не относящееся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий.

Приведенная форма оценки воздействий является полуколичественной. В этом случае градация воздействий по уровням выполняется на основе имеющихся количественных оценок. При отсутствии последних классификация воздействий осуществляется на качест-венном уровне. Исходя из практики анализа риска, использование уровней воздействий вместо количественных оценок практически не снижает общую точность оценок, так как выделение 4 ровней позволяет охватить весь диапазон воздействий, а количественные оценки в реальных условиях дают результаты с точностью до порядка значений расчетных величин. В ряде исследований, для упрощенного анализа используются 3-х интервальная шкала (принцип «светофора») и более детальные 6-ти градационные шкалы. Выбор числа уровней зонирования определяется мощностью воздействий, что требует их адаптации к объектам исследований и техническим системам мониторинга.

Особое место в задачах оценки состояния геологической среды на объектах НГК связано с задачами геодинамики. Современная геодинамика изучает проявление на земной поверхности глубинных динамических процессов различного протяжения и периодичности в форме параметров движений и деформаций геологической среды, вариаций во времени их геофизических и геохимических параметров. Геоэкологические риски, источниками которых являются эндогенные и экзогенные процессы, по своим разрушениям и материальному ущербу занимают одно из лидирующих мест среди других природных катастроф. В первую очередь, к ним относятся деформации горных пород, землетрясения, геокриологические процессы и метеорологические процессы.

В основе решения данного класса задач лежит установление законов развития геодинамических процессов, которые определяют пространственно-временные и энергети-ческие закономерности их возникновения. Для этих целей используют аэрокосмические, геодезические и геофизические методы мониторинговых наблюдений поверхностных и глубинных индикаторов. Они позволяют выполнить зонирование территорий по степени их геодинамической активности, сейсмической и климатической опасности. Их особенностью является использование контролируемых параметров состояния геологической среды на основе различных физических моделей измерений. Это требует унификации и верификации получаемых результатов измерений на основе единых методических подходов.

Целью работы является разработка методики зонирования воздействия опасных природных и техногенных процессов на геологическую среду в задачах дистанционного геоэкологического мониторинга месторождений нефти и газа. Для ее достижения в ходе работы решались следующие основные задачи:

1. Проведено обоснование структуры построения методики зонирования воздействия опасных природных и техногенных процессов в задачах дистанционного геоэкологического мониторинга геологической среды месторождений нефти и газа;

2. Разработана обобщенная модель зонирования вариации параметров воздействия опасных процессов на основе интервальных вероятностных оценок;

3. Разработана информационная модель параметров систем ДЗЗ для использования в задачах зонирования опасных геоэкологических процессов

4. Представлены примеры практической апробации методов зонирования воздействия опасных процессов на состояние геологической среды на объектах НГК.

Модели и методы. Реализация рассматриваемой методики зонирования ориентирована на использование геоинформационной среды исследуемой территории, в качестве которой выделяется пять уровней охвата: планетарный (глобальный), государственный (федеральный, отраслевой), региональный (республика, область, штат), локальный (район, предприятие, полигон), детальный (объектовый) (рис. 1). Такое пространственное административное зонирование (деление) используется во многих системах территориального и отраслевого мониторинга, так как их реализация осуществляется рамках проектов, инициируемых международными отраслевыми организациями и территориальными органами управления государств. Применительно к задачам зонирования в работе рассмотрены структуры территориального зонирования литосферы и тропосферы.

Следует отметить, что для решения данного класса задач начинают использоваться методы, основанные на оценки уровня опасности исследуемых процессов посредством ввода интервальных (разностных) шкал. Они характеризуют измеренные количественные величины и их эквивалентные свойства исследуемых процессов в заданных интервалах. Данный подход удобно использовать в оценках уровней воздействия опасных процессов на состояние интересующих объектов с позиций их устойчивости и безопасности при получении измерительной информации от различных систем мониторинговых наблюдений.

Он находит применение при отображении результатов мониторинговых наблюдений дистанционных измерительных систем в виде соответствующих территориальных и объектно-ориентированных моделей в соответствующих геопорталах.

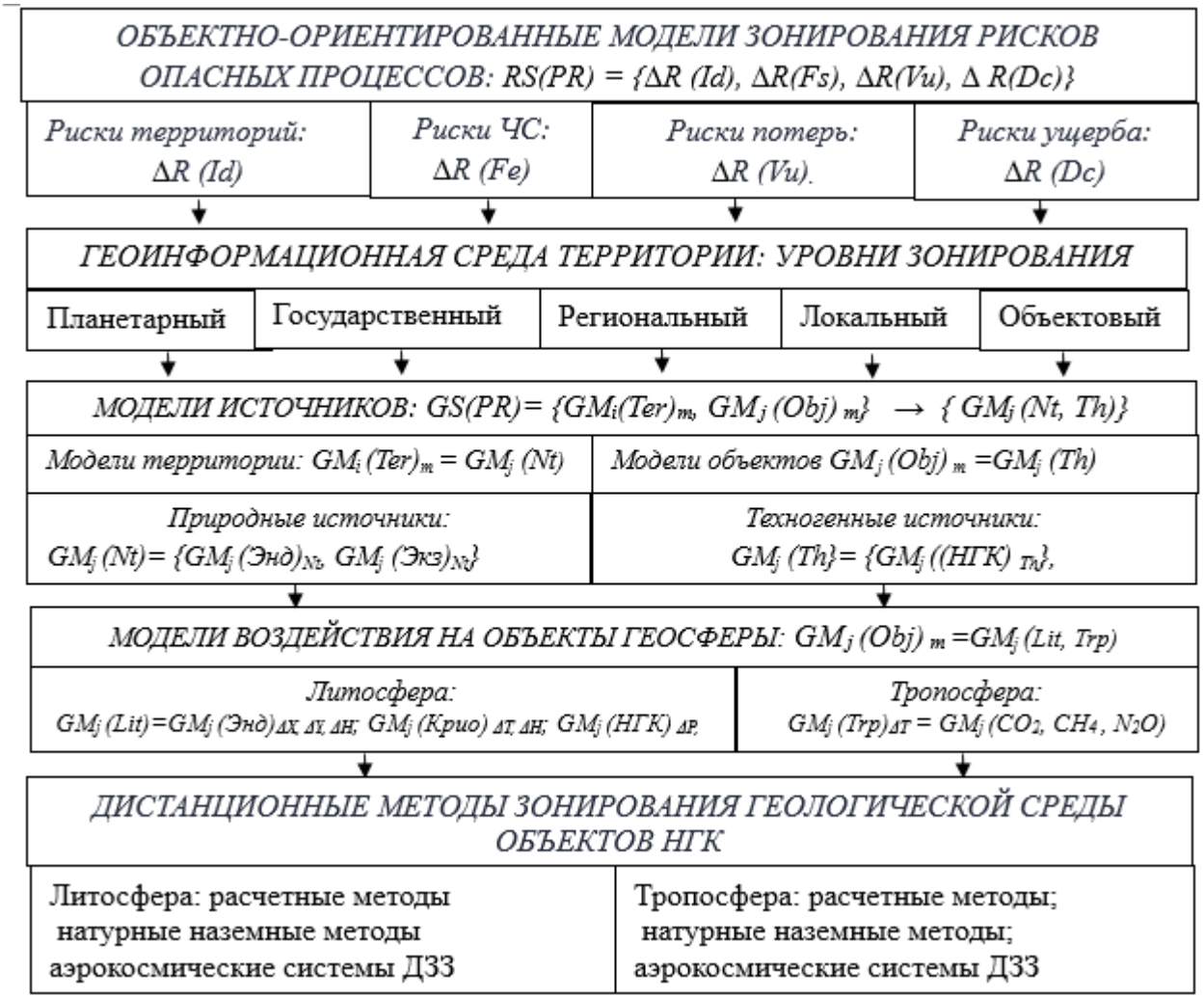


Рис. 1. Структурная модель зонирования геологической среды объектов НГК

В этой таблице значения физического параметра (ΔR_4, ΔR_3, ΔR_2, ΔR_1) характеризуют количественные оценки его изменения, соответствующие различным уровням воздействия риск-фактора на объекты земной поверхности (рис. 2).

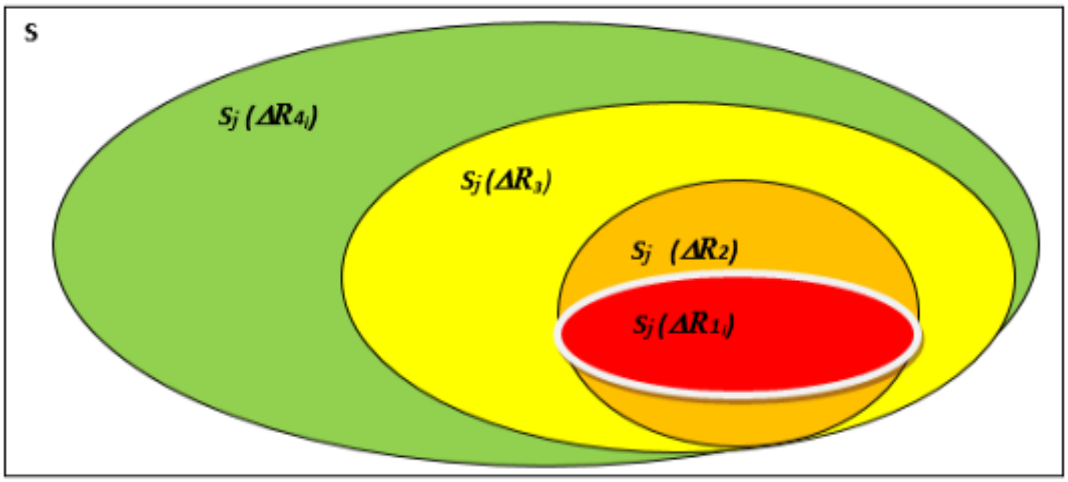


Рис. 2. Мощность воздействия j-го риск-фактора на исследуемой территории

Полученные таким образом вероятностные оценки определяет долю возможных потерь объектов, находящихся на исследуемой территории в случае реализации j -го риск-фактора. Их значения определим из соотношений геометрических вероятностей:

$$P_j\,(N,A) = P_j\,(\Delta R_i) = S_i(\Delta R_i)\,/S\,(\Delta R),$$

где $P_j\,(\Delta R_i)$ – вероятность возникновения j-го риск-фактора на территории площадью S, воздействия которого i-го уровня ΔR_i имеют место на площади S_i. (i=1-4)

Здесь

$$S_i = \tfrac{1}{2} \sum_{i=1} X_i\,(Y_{i+1}-Y_{i-1}),$$

где X_i , Y_{i+1}, Y_{i-1} – вычисленные прямоугольные координаты вершин многоугольника, площадью S_i .

Представленные методические решения позволяют определить оценки уровня воздействия на природные компоненты ОС, находящиеся на исследуемой территории в случае реализации j -го риск – фактора, а также стоимость исследуемого воздействия. В их основе лежит целевая задача, связанная с оценкой динамики изменения наблюдаемых параметров геоинформационных моделей территориальных объектов

В основе методики решения целевой задачи лежит оценка динамики изменения наблюдаемых параметров геоинформационных моделей территориальных объектов. В общем случае она может быть представлена уравнениями вида

$$\Delta R_i\,(t) = R_i\,(t_c) - R_i\,(t_o),$$

где $R_i\,(t_c) = (X_i\,(t_c), Y_i\,(t_c), H_i\,(t_c), U_i\,(t_c))$- значения параметров i-го наблюдаемого объекта на момент времени (t_c);

$R_i\,(t_o) = (X_i\,(t_o), Y_i\,(t_o), H_i\,(t_o), U_i\,(t_o))$- значения параметров i-го наблюдаемого объекта на момент времени (t_o);

$\Delta R_i\,(\Delta t) = (\Delta X_i\,(\Delta t), \Delta Y_i\,(\Delta t), \Delta H_i\,(\Delta t), \Delta U_i\,(\Delta t))$ – изменение значений параметров i- го наблюдаемого объекта за промежуток времени (Δt).

Здесь

$$\Delta X_i\,(\Delta t) = X_i\,(t_c) - X_i\,(t_o),$$
$$\Delta Y_i\,(\Delta t) = Y_i\,(t_c) - Y_i\,(t_o),$$
$$\Delta H_i\,(\Delta t) = H_i\,(t_c) - H_i\,(t_o),$$
$$\Delta U_i\,(\Delta t)_{X,Y,Z} = U_i\,(t_c)_{X,Y,Z} - U_i\,(t_o)_{X,Y,Z},$$

где $X_i\,(t_c), Y_i\,(t_c), Hi\,(t_c), U_i\,(t_c)$ –значения пространственных координат и уровня, отображаемого сигнала i- го наблюдаемого объекта на момент времени (t_c);

$X_i(t_o)$, $Yi(t_o)$, $H_i(t_o)$, $U_i(t_o)$ – значения пространственных координат и уровня, отображаемого сигнала ***i***- го наблюдаемого объекта на момент времени (t_c);

$\Delta X_i(\Delta t)$, $\Delta Y_i(\Delta t)$, $\Delta H_i(\Delta t)$, $\Delta U_i(\Delta t)$ – изменение значений координат параметров и уровня сигнала ***i***- го наблюдаемого объекта за промежуток времени (Δt);

$\Delta U_i(\Delta t)_{X,Y,Z}$ – изменение значений уровня сигнала ***i***-го наблюдаемого объекта с координатами (***X,Y,Z***) за промежуток времени (Δt).

В качестве наблюдаемого сигнала $U_i(t)$ используются параметры температуры, давления, влажности, газовых компонентов, уровня радиоактивности, электромагнитного излучения, шума, уровня загрязнения атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, спектральной яркости почвенного и растительного покрова.

Особенностью рассматриваемых моделей оценки рисков является необходимость унификации данных, получаемых различными измерительными системами координат (СК): ДЗЗ, геодезическими, геофизическими, метеорологическими и экологическими. С позиций формальной интерпретации получаемой информации она сводится к измерению уровня (мощности) сигнала и позиционированию его местоположения в метрической СК:

$$U_j(B, L, H) \rightarrow U_j(X,Y,Z) \rightarrow u_j(x,y,z) \rightarrow u_j(x,y) \rightarrow u_j(S_{x,y}),$$

где $U_j(B,L,H)$ – значение сигнала j-го измеряемого параметра в геодезической СК (***B*** – широта, ***L***- долгота, ***H***- высота);

$U_j(X, Y,Z)$ – значение сигнала j-го измеряемого параметра в прямоугольной геоцентрической СК земной поверхности (X – абсцисса, Y – ордината, Z – аппликата);

$u_j(x,y,z)$ – значение сигнала j -го измеряемого параметра в прямоугольной трехмерной СК модели (*x – абсцисса, y ордината, z – аппликата);*

$u_j(x,y)$ – значение сигнала j-го измеряемого параметра в прямоугольной двухмерной СК модели (x -абсцисса, y – ордината*);*

$u_j(S_{x,y})$ – значение сигнала j-го измеряемого параметра фигуры площадью $S_{x,y}$.

Важное место при использовании интервальных шкал имеет возможность согласования шкал и метрики параметров реальных объектов с их соответствующими модельны-ми представлениями измерительных систем ДЗЗ. Для этих целесообразно использовать показатели информационной емкости используемых измерительных систем [6].

Величину информационной емкости текущих состояний изображений **W,** в общем случае, определим по формуле

$$W = N \times \log_2 M,$$

где ***N*** – число наблюдаемых элементов в изображении; ***M*** – число уровней квантования в изображении

С учетом рассмотренных моделей отображения изображений величину информационной емкости на выходе съемочной системы **W(S)** определим по формуле

$$W(S) = N_{\Delta\lambda} \times W_{\lambda}(K),$$

где $W_{\lambda}(K)$ – информационная емкость одного канала съемочной системы.

Здесь

$$W_{\lambda}(K) = N_{\lambda}(K) \times \log_2 M_{\lambda}(K),$$

где $N_{\lambda}(K)$ – число наблюдаемых элементов в изображении *К-го* канала;

$M_{\lambda}(K)$ – число уровней квантования в изображении *К-го* канала.

Здесь

$$N_{\lambda}(K) = (S_M / \Delta X_M \Delta У_M) = (S_{x,y} / \Delta x_u \Delta y_u),$$

где S_M – площадь территории, охватываемое кадром изображения; ΔX_M, $\Delta У_M$ – размеры элемента изображения (пикселя)на местности; $S_{x,y}$ площадь условного кадра цифрового изображения; Δx_u, Δy_u – шаг дискретизации цифрового изображения (приемника съемочной камеры).

Применительно к системам регистрации различают *спектральное* ***R(SP),*** *пространственное* ***R(PR)*** *и радиометрическое* ***R(RM)*** *виды разрешений.*

Спектральная зона может быть широкой, как одна зона черно-белого панхроматического снимка (0,38–0,77 мкм), или достаточно узкой как красная зона снимка, полученного камерой

Landsat TM (0,63–0,69 мкм). Чем шире зона электромагнитного спектра, тем ниже спектральное разрешение. У гиперспектральных камер число спектральных зон $N_{\Delta\lambda}$ может доходить до 256–312.

Спектральное разрешение R(SP) соответствует числу каналов (зон) съемки $N_{\Delta\lambda}$ и зависит от типа съемочной системы. При равномерном делении зон, что имеет место, как правило, в гиперспектральных камерах, данная величина находится из соотношения

$$R(SP)=N_{\Delta\lambda} = (\lambda_{max} - \lambda_{min}) / \Delta\lambda,$$

где λ_{max}, λ_{min} – максимальное и минимальное значения длин волн, принимаемое съемочной системой; $\Delta\lambda$ – диапазон одной спектральной зоны, регистрируемой приемником съемочной камеры.

Пространственное разрешение определяется минимальной угловой или линейной величиной, покрываемой пикселом (элементом изображения) на земной поверхности.

При оценке информационной емкости исходных изображений в качестве граничной пространственной частоты $\nu_{гр}$ принимается разрешающая способность снимка **R**, определяющая количество пар линий на 1 мм. Шаг дискретизации исходного изображения должен выбираться таким образом, чтобы зрительная система оператора не воспринимала разности между соседними элементами. Это происходит, когда при уменьшении ширины линий белая и правая полосы становятся неразличимы и сливаются в одну. В этом случае

должно соблюдаться соотношение

$$\Delta_{x,y} = 1/2R_{x,y} = 1/2\nu_{гр}.$$

Радиометрическое разрешение определяется чувствительностью детекторов к различиям в значениях спектральной плотности энергетической яркости отраженного от поверхности сигнала и фиксируется набором четко дифференцированных уровней квантования битового динамического диапазона. Количество бит определяет число возможных значений в цифровой записи каждой зоны снимка (в файле данных). Оно связано с технологическими параметрами датчиков и характеризует максимальный диапазон изменения «сырых» значений спектральной яркости. При 8-битовом радиометрическом разрешении значения спектральной яркости изменяются от 0 до 255, а при 7-битовом – от 0 до 127.

В общем случае число уровней квантования цифрового изображения M_u определится из соотношения

$$R(RM) = M_u = (U_{max}-U_{min}) / \Delta U\sigma_s,$$

где U_{max}, $Umin$ – максимальное и минимальное значения цифрового сигнала приемника съемочной камеры; $\Delta U\sigma_s$ – шаг квантования цифрового сигнала, соответствующий уровню шума светочувствительного элемента приемника (прибора зарядовой связи) съемочной камеры.

Рассмотренные модели позволяют связать параметры измерительных систем ДЗЗ с характеристиками реальных объектов на земной поверхности, а также параметрами измерительных систем, используемых также для проведения измерений.

Пространственные модели описывают динамику изменения деформации горных пород, связанную с геодинамическими и геокриологическими процессами. Функциональные модели характеризуют уровень воздействия и физическую природу наблюдательной системы, а также параметры излучательной способности объекта. Здесь для контроля воздействия опасных геодинамических процессов в литосфере, инициируемых эндогенными и экзогенными источниками, используются территориальные модели сейсмических, геодезических и геокриологических мониторинговых сетей наблюдения. Их характерной особенностью является наблюдения за уровнями деформационных процессов, протекающих в геологической среде при воздействии природных и техногенных сейсмических процессов, а также геокриологических процессов, обусловленных температурными изменениями поверхностного слоя многолетнемерзлых пород (ММП), вызванных вариациями параметров климатической сисемы Земли (КСЗ).

Динамические деформации внутрикоровых землетрясений очаговых землетрясений, кроме сотрясений ОС посредством сейсмических волн, вызывают сдвиговые деформации вдоль разломов земной поверхности. При возникновении землетрясений поверхностные нару-

шения могут достигать нескольких метров и приводить к разрушению ствола скважин, внутрипромысловых и магистральных трубопроводов (таблица 2) . Для их описания в работе предложена формула вида [7]:

$$\log A_M = 0{,}6M - 3{,}8,$$

где A_M – средние и интервальные (в скобках) величины амплитуды смещения бортов разломов вдоль линеаментов ранга шириной W в течение интервала времени Δt, инициализации очага землетрясения соответствующей магнитуды M.

Таблица 2. Связь магнитуды землетрясений и уровнем деформаций бортов разломов (линеаментов)

M	A_M (м)	W,(км)	Δt, (сек)
8.5 (8.3–8.7)	20 (15–30)	40	90–180
8.0 (7.8–8.2)	10 (7–13)	20	40–80
7.5 (7.3–7.7)	5.0 (4–6.5)	10	20–40
7.0 (6.8–7.2)	2.5 (2.0–3.0)	5	10–20
6.5 (6.3–6.7)	1.3 (1–1.6)	3	6–10
6.0 (5.8–6.2)	0.6 (0.5-0.9)	2	3–5

Наличие связи между магнитудой землетрясений (M) и величиной подвижек (ΔX) земной поверхности была также подтверждена в работе [8] эмпирическим путем на основе анализа более 300 землетрясений (таблица 3).

Таблица 3. Связь магнитуды землетрясений и подвижек земной поверхности

M	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Максимальное ΔX (м)	0.05	0.1	0.3	0.7	2.0	4.0	7.0	10–12	12–15
Средние ΔX (м)	0.01	0.02	0.04	0.10	0.24	0.57	1.36	3.23	7.67
Вероятное ΔX (м)	0.005	0.005	0.01	0.025	0.06	0.15	0.35	0.8–1.0	2.5

Следует отметить, что наряду с природными источниками образования геодинамических активных зон нарушений (ГАЗН), имеют место нарушения геологической среды, вызванные техногенными факторами. Они связаны с просадками горных пород, изменением пластового давления залежей углеводородов, закачкой жидкости в пласт, изменением структуры пласта в ходе разработки и эксплуатации залежей нефти и газа. Индикатором их проявления на земной поверхности является возникновение разломов, трещин, горизонтальных и вертикальных смещений горных пород, что приводит к разрушению подземной инфраструктуры месторождений и возникновению землетрясений. Именно на этих участках требуется проведение мониторинговых наблюдений опасных природных и техногенных процессов.

В частности, в таблице 3 приведены примеры взаимосвязь разработки месторождений нефти и газа с происходящими геодинамическими подвижками горных пород, которые инициируют возникновение аварий и землетрясений. Связь между началом разработки месторождением, закачки воды и появлением сейсмических событий, по выборке более 200 месторождений, была показана в работе [9]. Сейсмичность проявляется, в среднем, через 10–20 лет после начала эксплуатации месторождений, а наиболее сильные землетрясения обычно на 20–30 лет позже.

Таблица 3. Опасные геодинамические процессы на месторождениях нефти и газа

Район	ГЗ, м	Тип	ГИ (год)	Δh, м	$V_{тех}$, см/год	МЗ	НЗ
Газли, Узбекистан	1350	ДН, ДГ	1964–1968, 1968–1974	 –2,31	–0,10 –1,92	6,8 7,3	14
Инглвуд, США	3050	ДН, ДГ	1926–1962	–2,32		5,5	36
Willmington (США)	760–1830	ДН, ЗВ	1928–1966	–8,8	–71	3,3	21
Старогрозненское, РФ	4000	ДН, ЗВ	н/д	н/д	н/д	4,8	8
Ромашкинское, РФ	1600–1800	ДН, ЗВ	1962–2008		–0,7	3–4	39
Ставропольское, РФ	800-1000	ДГ	1956–1962	–1,5	–3,7		
Уренгойское, РФ	1030-4000	ДН, ДГ	1974–1995	0,34	–1,5		
Лак, Франция	600-3000	ДН, ДГ	1957–1989	–0,06		4,4	12
Lagunilas (Венесуэла)	300–1200	ДН, ЗВ	1928–2012	–6,4	-20	5,2	70
East Texas, США	1113	ДН, ЗВ	н/д	н/д	н/д	4,3	28
Бурунное, Туркмения	1190–4460	ДН, ЗВ	н/д	н/д	н/д	6,0	13
Кум-Даг, Туркмения	485–1520	ДН, ЗВ	н/д	н/д	н/д	5,7	34
Экофиск, Норвегия	2900	ДН, ЗВ	1984, 1999	–10	–50	3,4	11

Примечание: ГЗ- глубина залежи; ДН – добыча нефти; ЗВ-закачка воды; ДГ-добыча газа; ГИ – годы измерений; Δh – изменение высоты репера (просадка); $V_{тех}$ – вертикальная скорость смещения (см/год); МЗ – магнитуда землетрясений; НЗ – начало землетрясений (года после начала эксплуатации).

В настоящее время контроль воздействия процессов добычи углеводородов на состояние геологической среды месторождений нефти и газа осуществляется посредством геодинамических полигонов, где используются геофизические, геодезические и аэрокосмические методы наблюдений. Их эффективность во многом зависит от точности пространственной и временной локализации ГАЗН, где происходят значительные смещения горных пород. Однако здесь не определены пространственные и временные интервалы наблюдаемых параметров процессов, а также принципы сравнения результатов измерений, получаемых различными измерительными системами, что имеет важное значение в задачах построения систем геоэкологического мониторинга.

Для обеспечения комплексного сравнения получаемых результатов наблюдений в работе был рассмотрен подход, обеспечивающий переход от оценки отдельных параметров наблюдаемых процессов к их модельным представлениям в рамках единой геоинформационной среды реализуемого проекта. Оценка состояния геологической среды посредством комплексных систем наблюдений геоэкологического мониторинга предполагает разработку специализированных геопорталов геодинамических полигонов

Длительная эксплуатация месторождений нефти и газа предполагает контроль состояния геологической среды, где важное значение играют ее параметры, характеризующие величину техногенного воздействия на состояние горных пород. К ним относятся: мощность пласта – r, глубина залегания пласта – H, объемный модуль упругости вмещающих горных пород – K, изменение пластового давления – ΔP, вертикальные смещения земной поверхности за определенный интервал времени – Δh.

Знание данных параметров позволяет установить функциональную связь между вариациями высот точек земной поверхности и состоянием горных пород внутри пласта.

В частности, для связи изменения рельефа местности $\boldsymbol{\Delta h}$ с вариацией пластового давления на временном интервале в работе [10] была предложена формула вида

$$\Delta h = \frac{6{,}25 \times r^2}{H \times K} \times \Delta P,$$

а для оценки пластового давления при изменении дебита жидкости в скважине формула

$$\Delta P = \frac{\Delta t \times g}{S} \times \Delta Q,$$

где $\boldsymbol{\Delta P}$ – изменение пластового давления, $\boldsymbol{\Delta t}$ – интервал времени извлечения жидкости, $\boldsymbol{S}$ – диаметр штуцера, $\boldsymbol{g}$ – сила тяжести, $\boldsymbol{\Delta Q}$ – изменение дебита жидкости.

Данные математические модели показывают взаимосвязь параметров, описывающих состояние геологической среды и динамику изменения рельефа местности. Традиционно данная задача решается в рамках геодинамических полигонов посредством создания нивелирных сетей и сетей постоянно действующих базовых станций (ПДБС) глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Ограничения данного подхода обусловлены большим объемом полевых работ, что требует значительных временных и финансовых затрат. Их удалось существенно сократить посредством использования для измерения высот точек метод радиолокационной интерферометрии. Он позволяет оценивать динамику изменений высот точек местности, получаемой на основе изменения интерференционной картины отраженных радиоволн от уголковых отражателей, размещаемых на территории геодинамических полигонов при разных пролетах спутника. Ограничения данного метода связаны с оптимальным выбором мест размещения уголковых отражателей, обеспечивающих покрытие ГАЗН.

Успех реализации представленного подхода во многом определяется возможностью унификации различных аналоговых представлений измеряемых параметров геологической среды месторождений нефти и газа посредством их цифровых сигналов в едином геопозиционированном пространстве исследуемой территории. Такой подход позволяет установить взаимосвязь динамики изменения параметров геологической среды, характеризующих состояние горных пород нефтегазоносных пластов залежей нефти и газа, и структурных форм рельефа местности на земной поверхности. Данные структуры отображаются на местности в виде гигантских симметрично-полигональные решетчатых линеаментных систем зон нарушений, имеющих различную ориентацию. Они традиционно используются в качестве начального поискового индикатора расположения залежей нефти и газа в ходе геологоразведочных работ по материалам аэрокосмических съемок [10].

Интерпретация морфометрических моделей на основе линеаментного анализа предполагает выделение геометрических и спектральных индикаторов структурных элементов местности по изображениям. Они проявляются в виде резкого перепада градиента уровней сигнала на изображениях исследуемых объектов. Это позволяет использовать данное свойство в задачах интерпретации аномалий физических полей, приводящих к нарушению структуры геологических пород, которые приурочены к геодинамически активным зонам разломов и являются их поисковым индикатором.

Структурная схема алгоритма локализации границ ГАЗН на основе линеаментного анализа изображений исследуемой территории в ПК «Линеамент» приведена на рисунке 3.

1.НОРМАЛИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ: (рис. 4.а) → (рис. 4.б);
RGB → Gray (R-red, G-green и B- blue -компоненты модели RGB.
$U(i, j) = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B$; $U(i, j)$-пиксели черно-белого снимка

↓

2. НИЗКОЧАСТОТНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ: (рис.4.б) → (рис. 4.в) ;
$F(i, j) = G * U(i, j)$. G =Gaussian Blur – сглаживающий фильтр по Гауссу;
$F(i, j)$- сглаженное изображение.

↓

3.ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ: (рис. 4.в) → (рис. 4.г);
3.1. ВЫЧИСЛЕНИЕ ГРАДИЕНТА:

$G_{i,j}(i,j) = \sqrt{G_i(i,j)^2 + G_j(i,j)^2}$; где $G_i(i,j) = G_i * F(i,j)$; $G_j(i,j) = G_j * F(i,j)$;

G_i, G_j - *сверточные маски;* $\theta((i,j) = arctg\,(G_i(i,j)/\,G_j(i,j))$. $\theta((i,j) = \{0^0, 45^0, 90^0, 135^0\}$.

3.2. ПОДАВЛЕНИЕ «ЛОЖНЫХ МАКСИМУМОВ» :

1. Границы образа проходят в точках, в которых градиент имеет максимальное значение, а точки «ложных максимумов» подавлены.
2. Величина $G_i(i,j)$ и направление $\theta((i,j)$ градиента вычисляется в каждом пикселе.
3.Сохранение всех локальных максимумов градиентного изображения и удаление «ложных максимумов» позволяет добиться тонких краёв

3.3. ПОРОГОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ:

$$Bit\,(i, j) = \begin{cases} 1, \text{ если } G_{i,j}(i,j) > T_{high}, \text{ (градиент пикселя выше верхнего порога } T_{high}), \\ 1, \text{ если } T_{low} < G_{i,j}(i,j) < T_{high} \text{(градиент пикселя между порогами } T_{low}, T_{high}), \\ 0, \text{ если } G_{i,j}(i,j) < T_{low} \text{.(градиент пикселя ниже нижнего порога } T_{low}). \end{cases}$$

$Bit\,(i, j)$ -битовое изображение контуров (рис. 4.г).

↓

4. ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУР ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: (рис.4.г) → (рис. 4.д);
В основе лежит преобразование Хафа: $\rho = x_0 \times \cos\theta + y_0 \times \sin\theta$;
ρ – радиус-вектор (нормаль к прямой, проведенной из начала координат (x_0, y_0), (i_0, j_0);
θ- угол между радиус-вектором и осью абсцисс.
Задаются: области точек битового изображения с координатами Bit (i , j) ;
Line length- минимальная длина искомых отрезков;
Line gap - длина возможных разрывов на искомой линии.

↓

5. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ГРАНИЦ ГАЗН: (рис.4.д) → (рис.4.е);
Включает: Построения роз ориентации линеаментов и определение их плотности.
Исходные параметры: размеры квадрата для построения;
angle - угол для построения роз ориентации.

Рис. 3. Алгоритм зонирования границ ГАЗН в ПК «Линеамент»

Локализация ГАЗН в программном комплексе «Линеамент» предполагает выполнение следующих технологических процессов: нормализацию цифровых сигналов исходного изображения; низкочастотное сглаживание цифровых сигналов черно-белого изображения; выделение контуров оптических плотностей; построение структур линейных элементов; локализацию границ ГАЗН (рис. 4).

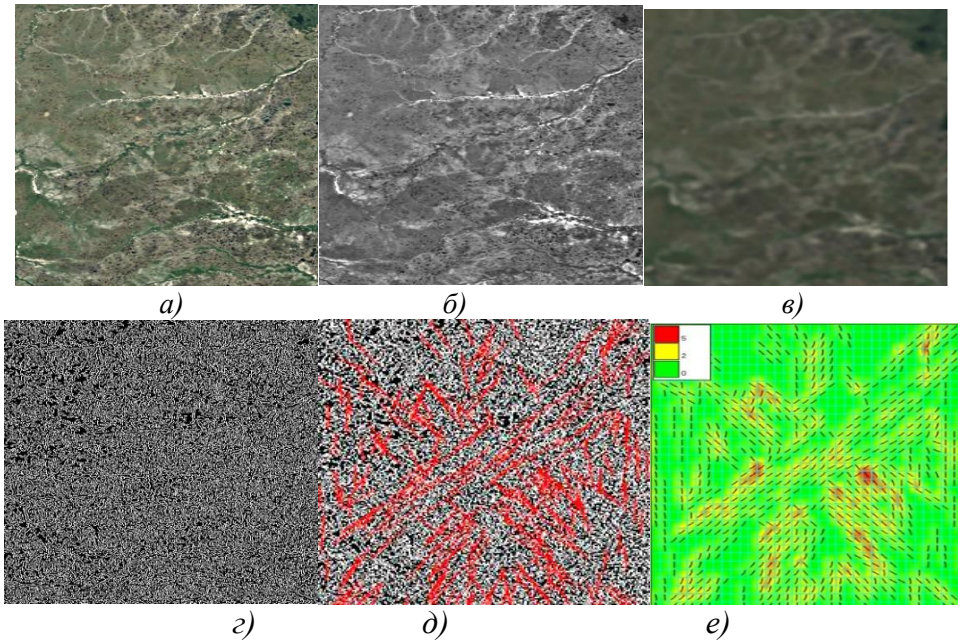


Рис. 4. Процедуры зонирования ГАЗН в ПК «Линеамент» на примере УНГКМ:
а) Исходный снимок, *б)* Нормализация сигналов, *в)* Сглаживание шума,
г) Выделение контуров, *д)* Построение линеаментов, *е)* Зонирование ГАЗН

Результаты и обсуждение. Апробация методов зонирования ГАЗН была проведена на примере Уренгойского НГКМ . Их выбор обусловлен длительным сроком эксплуатации и наличием значительных просадок горных пород геологической среды на их территории.

Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение расположено, в центре Надым-Пур-Тазовской нефтегазоносной области. Оно введено в эксплуатацию в 1978 году.

В разрезе месторождений Большого Уренгоя выделено три этажа газоносности. Верхний этаж – сеноманские газовые залежи, залегают на глубине 1030–1280 м. Средний этаж газоносности – нижнемеловые нефтегазоконденсатные залежи, образуют отдельные месторождения: Уренгойское, Ен-Яхинское, Северо-Уренгойское и Песцовое. Они относятся к валанжинским залежам, в которых располагается 17 газоносных пластов на глубинах от 1700 до 3340 м. Нижний этаж газоносности – ачимовские нефтегазоконденсатные залежи, располагаются на глубине 3550–4000 м.

Для условий УНГКМ в качестве определяющих в работе рассмотрены укрупненные элементы геологического разреза. Здесь верхняя часть разреза содержит слой многолетнемерзлых пород мощностью –200 м; далее расположен слой глинистых пород мощностью 150–200 м; затем слой песчаных отложений мощностью 300–200 м и слой глинистых пород мощностью –550 м; а в нижней части залегает толща в виде чередования песков, глин, аргиллитов, алевролитов, песчаников мощностью 200 м.

Эксплуатация сеноманских, валанжинским и ачимовских залежей начала осуществляться с 1978, 1985 и 2008 г., соответственно. Добыча газа из сеноманской залежи сопровождалось падением пластового давления в ее центральной части до уровня 10–15 МПа. Это привело к образованию депрессионной воронки, включившей отдельные депрессии Уренгойской, Ен-Яхинско-Песцовой и Северо-Уренгойской газовых залежей. Её размеры составили: длина – 230 км, ширина – 64–68 км.

В ходе апробации методов геодинамического мониторинга в работе рассмотрена локализация положения ГАЗН на основе:

геометрического нивелирования положения реперов (рис. 4);

параметров разработки залежи УНГКМ (рис. 6. (1–2) – (1–4)) ;

постоянно действующих базовых станций (ПДБС) (рис. 6. (2–1) -(2–4) ;(3-1) -(3–2):

радиолокационной интерферометрии (РЛИ) спутников Sentinel-1(рис.6. (3–3));

линеаментного анализа и локализации ГАЗН на ПК «Линеамент» (рис. 6. (3–4)).

На начальном этапе контроль состояния горных пород коллекторов осуществлялся посредством нивелирования на геодинамическом полигоне, который был создан на месторождении в 1974–1976 гг. Он состоял из нивелирной сети II класса протяженностью около 900 км, которая включала 11 поперечных профилей, длиной 55 км и одного продольного профиля, проходящего через сводовую часть месторождения. Всего на полигоне использовано 10 типов центров, среднее расстояние между которыми по меридиану составили 1,6 км. В поперечниках закладка реперов произведена попарно через 1,7–9,1 км. Общее количество опорных и рабочих реперов на объекте составило 568 единиц. С 1975 по 2003 г. на месторождении было выполнено 4 серии наблюдений, характеризующие процессы сдвига земной поверхности на месторождении за 20 лет. Эти данные были использованы в примере верификации расчетных моделей связи изменения пластового давления и рельефа местности (рис. 5.) [11].

$$\Delta h = \times\ (m \times \beta_{пор} + (1-m) \times \beta_{тв}) \times \Delta P,$$

где $\beta_{пор}, \beta_{тв}$ – коэффициенты сжимаемости пор и твердой фазы, m – плотность, r – эффективная толщина пласта (мощность); ΔP – изменение пластового давления.

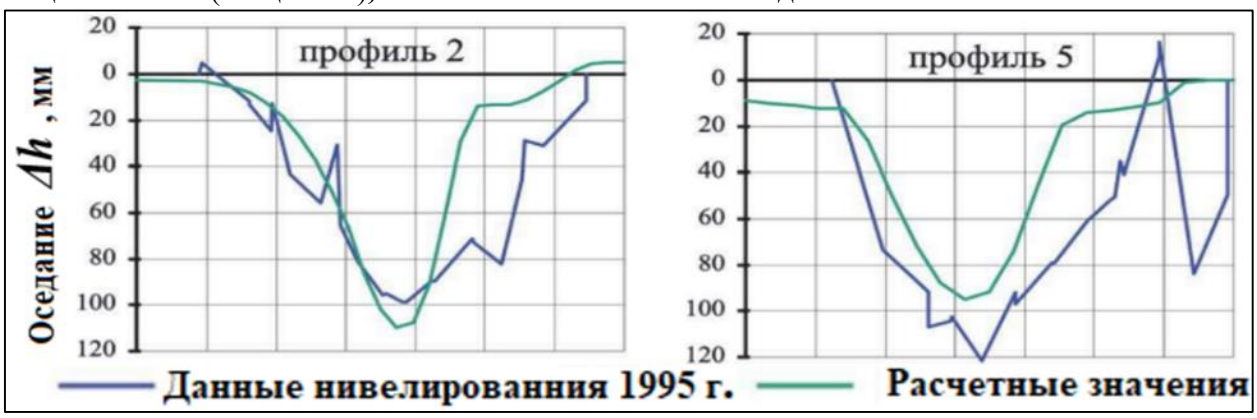


Рис. 5. Верификация просадок рельефа на геодинамическом полигоне УНГКМ

В ходе проведения работ по верификации методов локализации участков ГАЗН были использованы результаты наблюдений, которые выполнялись на геодинамическом полигоне с 2004 по 2023 гг. (рис. 6) [12].

Для верификации методов локализации участков техногенной деформации горных пород были использованы были использованы модели: расположения сеноманских, валанжинских и ачимовских залежей (рис. 6. (1–1)), отбора газа (рис. 6 (1–2)), добычи газа (рис. 5. (1–3)), вариаций пластового давления (рис. 6. (1–4)).

Для характеристики вариаций рельефа земной поверхности использовались модели , полученные на основе результатов геодезических измерений. Они включали наблюдения за горизонтальными ($V_{\Delta X}$, $V_{\Delta Y}$) и вертикальными скоростями смещениями точек на ПДБС глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), используемые при оценке динамики литосферных плит. Расположение данных станций на месторождении и на лицензионных участках (ЛУ) представлены, соответственно, на рис. 6: (2.1) – (2–2). Скорости горизонтальных и вертикальных смещений пунктов ПДБС на рис. 6: (2–3) – (2–4).

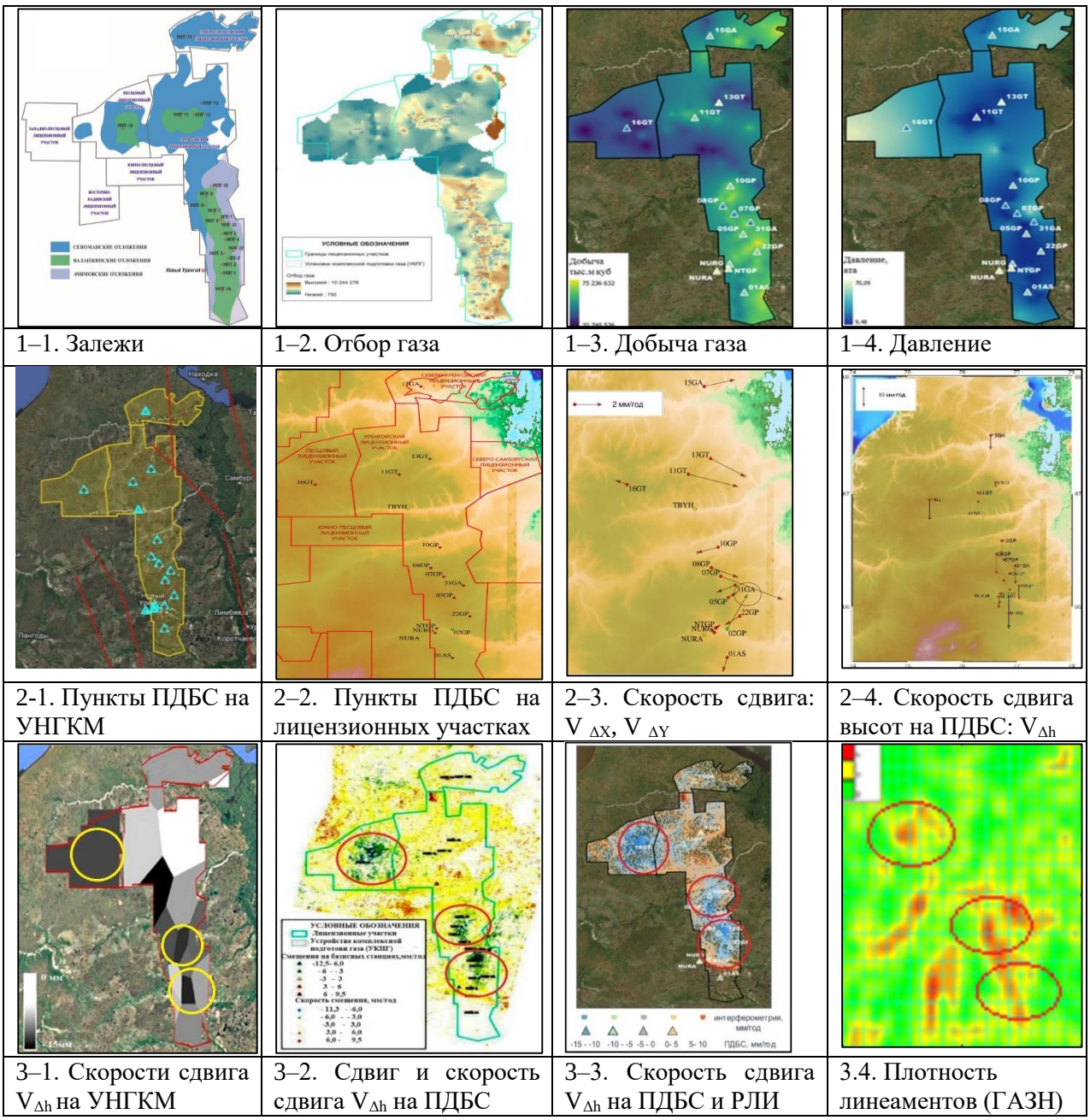
Результаты верификации методов локализации участков ГАЗН на объектах геодинамического полигона УНГКМ, представлены на рис. 6. (3.1) – (3–4). Здесь представлены модель локализации ГАЗН на основе:

аппроксимации скоростей вертикального смещения точек ПДБС – рис. 6. (3–1).

интерпретации измеренных значений сдвига точек рельефа местности ***Δh(мм)*** и скоростей их сдвига $V_{\Delta h}$ (мм/год) на объектах УНГКМ – рис. 6. (3–2);

данных скоростей смещения высот точек $V_{\Delta h}$ (мм/год) на основе радиолокационной интерферометрии и ПДБС ГНСС показана на рис. 6. (3–3);

линеаментного анализа территории по космическим изображениям – рис. 6. (3–4).



1–1. Залежи	1–2. Отбор газа	1–3. Добыча газа	1–4. Давление
2-1. Пункты ПДБС на УНГКМ	2–2. Пункты ПДБС на лицензионных участках	2–3. Скорость сдвига: $V_{\Delta X}$, $V_{\Delta Y}$	2–4. Скорость сдвига высот на ПДБС: $V_{\Delta h}$
3–1. Скорости сдвига $V_{\Delta h}$ на УНГКМ	3–2. Сдвиг и скорость сдвига $V_{\Delta h}$ на ПДБС	3–3. Скорость сдвига $V_{\Delta h}$ на ПДБС и РЛИ	3.4. Плотность линеаментов (ГАЗН)

Рис. 6. Методы зонирования ГАЗН на Уренгойском НГКМ

Сравнительный анализ границ ГАЗН, полученных в ходе использования рассмотренных методов их локализации на Уренгойском НГКМ, показал их высокую корреляцию. Данный результат подтвердил возможность использования метода линеаментного анализа в задачах зонирования ГАЗН при эксплуатации месторождений нефти и газа.

Выводы. Представленные в работе исследования контроля деформаций геологической среды на территориия Уренгойского НГКМ показали связь уровней проседания горных пород и добычи углеводородов на месторождении. Данная ситуация требует проведения постоянных мониторинговых наблюдений за данными процессами на основе использования геодезических методов и методов ДЗЗ на осное использования методов радиолокационной интерферометрии. Для повышения эффективности размещения сети реперных точек на геодинамических полигонах могут быть использованы методы зонирования геодинамически активных зон на основе линеаментного анализа. Они позволяют выполнить локализацию ГАЗН на месторождениях

при минимальных финансовых затратах и с высокой производительностью. Такой подход позволяет учитывать влияние геодинамических факторов на состояние экологической и промышленной безопасности объектов в рамках систем геоэкологического мониторинга на всех этапах реализации проектов. Дальнейшее развитие методов зонирования ГАЗН должно быть ориентировано на учет процессов геодинамических подвижек с учетом геокриологических риск-факторов зон МПП, а также изменения температуры тропосферного воздуха и его приземного слоя, вызванного эмиссией парниковых газов природного и техногенного происхождения.

Список литературы

1. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 годы. Организация Объединенных Наций; 2015. Адрес доступа: http://cso-central.asia/ wp-content/uploads/2014/08/N1524455.docx.
2. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года: указ Президента РФ от 19 апр. 2017 г. № 176. – URL:
3. О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 02 июля 2021 г. № 400. – URL: https://base.garant.ru/401425792/ (дата обращения 14.01.2025).
4. Фалеев М.И., Малышев В.П., Быков А.А., Кондратьев В.П. Методологические подходы к зонированию территорий Российской Федерации по уровням риска чрезвычай-ных ситуаций природного и техногенного характера . Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования, т.5, №1, с. 67-90.
5. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Приказ Федеральной службы по экологическому технологическому и атомному надзору от 03.05._2015 г. N 188.
6. Аковецкий В.Г. Аэрокосмический мониторинг месторождений нефти и газа// ООО «Недра-Бизнес-центр»,2008,. 454 с.
7. Уломов В.И., Шумилина Л.С. «Проблемы сейсмического районирования территории России.// Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве. М.: ВНИИНТПИ Госстроя России, 1999,56 с.
8. Стром А.Л., Никонов А. А. Соотношения между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений. Изв. РАН ФЗ. 1997. №12. С.55-67.
9. Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
10. Аковецкий В.Г. Геофизические аспекты интерпретации дистанционных наблюдений в задачах геологических и геоэкологических исследований геодинамических процессов// Геофизика, 2019, №6, с. 2-10.
11. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья: Учебное пособие. – М.: Издательство «Горная книга», 2019.– 552 с
12. Материалы технического отчета «Обработка и интерпретация спутниковых геодезических наблюдений с целью выявления смещений земной поверхности и гео-динамический мониторинг состояния недр в процессе эксплуатации УНГКМ», за II-й этап, подготовленного в соответствии с Договором № 34-2023-3 от 26.04.2022

УДК 620.181:678.019.32:620.193.21
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-28-32

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА: МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД (МИКРО-МЕЗО-МАКРО)

Кычкин А.К. [1], *Лебедев М.П.* [2], *Старцев О.В.* [1], *Гаврильева А.А.* [1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
[2]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: kychkinplasma@mail.ru

Аннотация. *Представлен обзор многолетних исследований долговечности базальтопластиков, эксплуатируемых в условиях холодного климата. Обоснована необходимость комплексного анализа на микро-, мезо- и макроуровнях. Показаны ключевые механизмы деградации эпоксидной матрицы в составе композита: влаго- и термодиффузионные процессы, УФ-облучение, биологическое воздействие и развитие внутренних напряжений при термоциклировании, приводящие к изменению адгезии на границе волокно–матрица и накоплению дефектов. Отмечены преимущества базальтопластиков над стеклопластиками по устойчивости свойств при длительной эксплуатации.*

Ключевые слова: *базальтопластики, долговечность, климатическое старение, термоциклирование, эпоксидная матрица, адгезия.*

CLIMATIC RESISTANCE AND DURABILITY OF BASALT FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES IN EXTREMELY COLD ENVIRONMENTS: A MULTI-SCALE (MICRO-MESO-MACRO) APPROACH

Kychkin A.K. [1], *Lebedev M.P.* [2], *Startsev O.V.* [1], *Gavrilieva A.A.* [1]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences
[2]Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Abstract. *A review of long-term studies on the durability of basalt fiber-reinforced polymer composites operated in cold climate conditions is presented. The necessity of an integrated analysis at the micro-, meso-, and macro-scale levels is substantiated. The key degradation mechanisms of the epoxy matrix within the composite structure are identified, including moisture and thermal diffusion processes, UV-induced degradation, biological impact, and the development of internal stresses under thermal cycling, which lead to changes in fiber–matrix interfacial adhesion and defect accumulation. The advantages of basalt composites over glass fiber-reinforced composites in terms of property retention during prolonged service are demonstrated.*

Keywords: *basalt fiber-reinforced polymers, durability, climatic aging, thermal cycling, epoxy matrix, interfacial adhesion*

Базальтопластики (БП) в виде ламинатов или однонаправленной арматуры получили мировое признание как конструкционные материалы для использования в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, судостроение, автомобилестроение и энергетику, благодаря своим выдающимся механическим свойствам, малому весу, высокой прочности и коррозионной стойкости. Это подтверждается сведениями, опубликованными в обзорах последних лет, например, в [1–4].

Авторы работы [1] показали, что по сравнению с углеродными, стеклянными или другими минеральными волокнами, базальтовые волокна в наименьшей степени влияют на окружающую среду в процессе всего производственного цикла. Базальтовые волокна после обработки их поверхности химически активными реагентами способны существенно повысить адгезию к полимерным матрицам и тем самым улучшить прочность и долговечность армированных структур.

В обзоре [2] рассмотрено применение БП для изделий, испытывающих динамические нагрузки. Анализ преимуществ БП над стеклопластиками (СП) в строительной индустрии представлен в [3]. Здесь продемонстрирована эффективность БП в различных строительных применениях, таких как армирование существующих конструкций (например, бетона или каменной кладки) с помощью БП-

стержней, сеток или листов, а также примеры разработок новых проектных решений, интегрирующих БП в существующие структурные системы.

В работе [4] исследованы проницаемость, электрические свойства, непроводимость и изоляционные свойства базальтовых волокон и выявлена более высокая прочность на изгиб БП по сравнению с углепластиком (УП). Благодаря указанным преимуществам, добавление базальтового волокна и композитов на его основе может быть использовано в звукопоглощающих, а также теплоизоляционных материалах.

Авторы обзора [5] обсудили преимущества использования БП для защиты и усиления бетонных конструкций с точки зрения механических свойств и примеров применения. Несущая способность укрепленных конструкций может быть увеличена до 60 % по сравнению с конструкциями без усиления. Срок службы бетонных конструкций, армированных БП, может быть увеличен до 50 лет в суровых условиях, что значительно превышает срок службы обычных железобетонных конструкций. Предложены перспективные строительные технологии с использованием БП, такие как большепролетные мосты, ферменные конструкции и композитные сваи.

По данным [6] базальтоволокнистые траверсы перспективны для использования в линиях электропередач с повышенной стойкостью к тайфунам и сложным погодным условиям. В [7] представлен систематический обзор современного состояния базальтовых волокон, базальтовых композитных материалов и их применения в области гражданского строительства.

Особенно перспективно расширенное применение БП в холодном климате в таких инфраструктурных объектах, как железные дороги, платформы, мосты, дороги, трубопроводы и др. Низкие температуры существенно влияют на механические свойства строительных материалов и создают проблемы для безопасности и долговечности этих инженерных сооружений [8]. В этих условиях способность БП к сохранению стабильного состояния при действии агрессивных сред [9] и высоких сезонных перепадов температуры [10] дает им существенное преимущество по сравнению с другими полимерными композиционными материалами (ПКМ).

Актуальность расширенного использования БП в арктических условиях оказалась причиной углубленного исследования этого типа композитов в ИФТПС ЯНЦ СО РАН. Систематические работы были начаты более 15 лет назад с обоснования способа армирования бетонных блоков базальтовой фиброй [11], усовершенствования состава эпоксидных матриц [12], оптимизации технологии формования непрерывных базальтовых волокон [13, 14], исследований свойств базальта Якутского месторождения [15], измерения механических показателей БП после экспонирования в открытых климатических условиях Якутска [16].

Исключительная сложность моделирования и прогнозирования состояния и долговечности гетерогенных базальтопластиковых структур потребовала выполнения исследований на трех масштабных уровнях. Сущность этого фундаментального подхода для проектирования и создания материалов рассмотрена в работах [17, 18], а для испытаний и прогнозирования свойств в агрессивных условиях изложена в работе [19].

Рассмотрим схему исследований долговечности ПКМ, изображенную на рис. 1 [19].

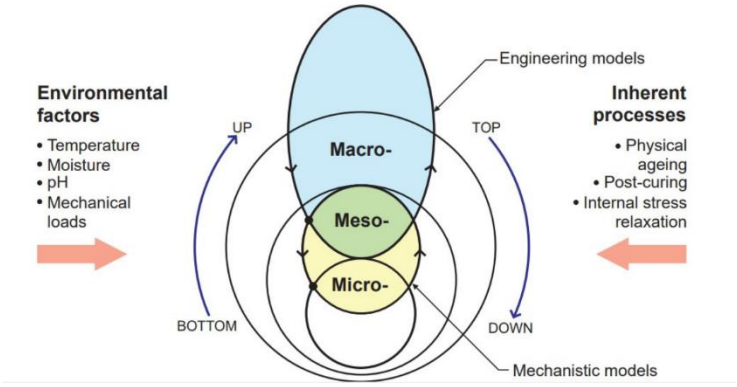


Рис. 1. Схема моделей, используемых для прогнозирования долговечности композитных материалов [19]

Чтобы всесторонне охарактеризовать долговечность БП, необходимо установить степень воздействия на материал таких факторов внешней среды, как температура, влажность, pH, механические нагрузки, чтобы выявить протекание физического старения, доотверждения, релаксации внутренних

напряжений, показанных на рис. 1. Однако наши многолетние исследования показали необходимость дополнительного учета суточных и сезонных термоциклов [20], УФ-облучения Солнца [21, 22], химически активных веществ [9], микроскопических грибов и бактерий [23], чтобы на качественном и количественном уровнях характеризовать деструкцию эпоксидной матрицы на поверхности [24] и во внутренних слоях [25] стержней и пластин, пластификацию эпоксидных матриц сорбированной влагой [9, 10, 24, 25], ослабление адгезии на границе волокно-связующее [9], усадку базальтовых волокон [9, 10], накопление микротрещин под действием внутренних напряжений [26], и перерастание их в макроразрушения [27, 28].

Отправной точкой для таких исследований может быть выбран любой из трех масштабов. Один из вариантов начинается с мезомасштаба, который находится между проектированием материала и его изготовлением. На этом масштабе можно выявить правила для материалов, получая информацию из других масштабов. Здесь подход «сверху вниз» подразумевает анализ полномасштабной формы. Исследование «снизу вверх» дает информацию о свойствах материалов на микро- и мезомасштабе, чтобы на основе моделирования предсказывать прочностные и другие макроскопические свойства материала в условиях эксплуатации [17–19].

В соответствии с рис. 1 БП может исследоваться на микроуровне методами микроскопии, инфракрасной спектроскопии, динамического механического анализа, элементного анализа и др. [9]. С их помощью анализируется микроуровень эпоксидных матриц: молекулярная подвижность локального и сегментального типа, зависящая от химического строения макромолекул, степень поперечного сшивания, интенсивность межмолекулярного взаимодействия, микрофазовое расслоение, регулярность в расположении боковых фрагментов полимерных цепей, температурные границы перехода из стеклообразного в высокоэластическое состояние, влияние природы наполнителя на температуру стеклования [9, 10, 20, 24, 29]. Состояние базальтового волокна определяется методами микроскопии, рентгеноструктурного элементного анализа, дилатометрии [9]. Для этого совершенствуется инструментарий и развиваются методические основы его применения. Например, была повышена чувствительность методов динамического механического и термомеханического анализа [30], профилометрии [31], гравиметрии [32].

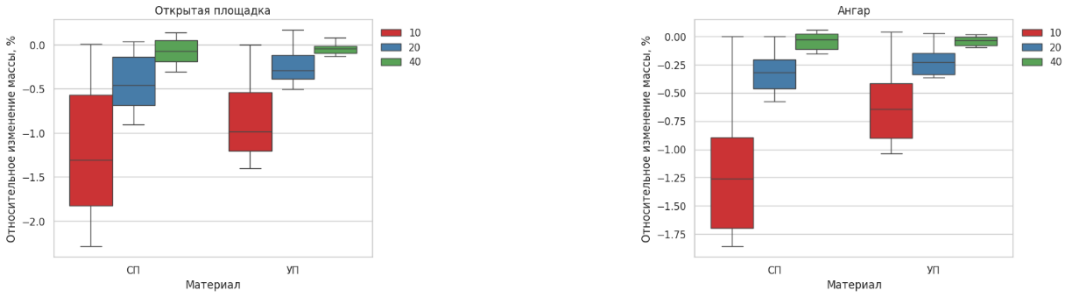
Обширную информацию при переходе от микро- к мезоуровню мы получаем методами термомеханического и гравиметрического анализа. В итоге на макроуровне, удается количественно определить параметры анизотропии показателей БП: масштабный эффект влагопереноса в однонаправленных стержнях [32], градиент показателей механических свойств по толщине пластин на разных этапах экспонирования [24,25], перерастание миротрещин в макротрещины [26], различия в коэффициентах диффузии влаги в направлении оси стержня или в радиальном направлении [31], зависимость скорости удаления продуктов деструкции из объема ПКМ от размеров тестируемых образцов [33].

Характерным примером исследований БП на трех масштабных уровнях является работа [23]. В ней проведено экспонирование эпоксидной профилированной базальтопластиковой арматуры диаметром 6, 8, 10 мм в открытых климатических условиях Якутска и Тикси. Продолжительность экспозиции составила 54 месяца. Стержни базальтопластиковой арматуры испытывались без предварительной обработки и после заражения поверхности набором нейтральных по отношению друг к другу микроорганизмов, устойчивых к действию холодного климата: актинобактерий рода *Streptomyces*, спорообразующих бактерий рода *Bacillus*, плесневых грибы родов *Aspergillus* и *Penicillium*. Показано, что после 12, 24 и 54 месяцев экспозиции предел прочности и модуль упругости при растяжении необработанных стержней увеличиваются на 5–14 % из-за доотверждения эпоксидной матрицы. В биозараженных стержнях эти показатели уменьшаются в среднем на 11 %. Клетки бактерий и мицелий плесневых грибов, проникших в поверхностные неоднородности профилированной арматуры, в открытых климатических условиях способствует не только развитию микротрещин и ухудшению механических показателей базальтопластиковой арматуры, но также вызывают дополнительный рост коэффициента диффузии влаги в радиальном направлении стержней.

Еще одним примером недавно завершенных исследования является работа [33], в которой выявлены преимущества БП над СП. Пластины этих композитов экспонировались в течение 3 лет на открытом стенде в условиях Якутска. Анализ результатов показал, что в БП и СП происходит деструкция эпоксидной матрицы. Это подтверждается снижением предела прочности и модуля упругости при растяжении, уменьшением массового содержания полимерной матрицы в объеме экспонированных пластин, понижением температуры стеклования полимерной матрицы, изменением коэффициента линейного термического расширения в широком интервале температур. Сравнением результатов и математическим моделированием доказано, что главной причиной деструкции полимерной матрицы является

действие внутренних напряжений, усиливающееся при низких температурах из-за различий коэффициентов линейного термического расширения стеклянных, базальтовых волокон и эпоксидной матрицы.

В этом исследовании была установлена общая закономерность: возрастание потерь массы в ПКМ с увеличением времени их экспонирования в открытых климатических условиях. Обобщенные результаты выполненных измерений представлены на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Влияние 405 суток экспонирования на потери массы образцов БП и СП разного размера: а) – старение на открытом стенде, б) – старение в ангаре

При экспонировании на открытом стенде образцы обоих материалов теряли массу. Для образцов размерами 10x10 мм потери массы были наибольшими и составили 2,3 % в СП и 1, 3 % в БП. При увеличении размеров образцов до 20x20 мм потери массы уменьшились до 0,9 % и 0,5 %, соответственно. Образцы размерами 40x40 мм теряли массу на уровне 0,3% и 0,1 %. (рис. 2а).

Наиболее интересный результат выполненных измерений состоит в том, что экспонирование в ангаре также вызывает потерю массы образцов. При экспонировании в ангаре не действует УФ облучение. Поэтому потери массы при отсутствии УФ облучения уменьшаются на 30-50 % в зависимости от размеров образцов (рис. 2б). Но эти потери достаточно существенны, чтобы утверждать, что их причиной являются внутренние напряжения, обусловленные температурным воздействием.

Таким образом, результаты представленных работ показывают высокую результативность определения механизмов старения и долговечности базальтопластиков при объединении микро-, мезо- и макроуровней масштабирования.

Список литературы

1. Jagadeesh P., Rangappa S.M., Siengchin S. (2024) Basalt fibers: an environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites. *Construction and Building Materials*. vol. 436. art.no. 136834. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.136834
2. Elmahdy A., Verleysen P. (2021) Comparison between the mechanical behavior of woven basalt and glass epoxy composites at high strain rates. *Materials Today*: Proceedings. vol. 34, part 1. pp. 171-175. DOI:10.1016/j.matpr.2020.02.284
3. Duan S.-J., Feng R.-M., Yuan, X.-Y., Song, L.-T., Tong, G.-S., Tong, J.-Z. (2025) A Review on research advances and applications of basalt fiber-freinforced polymer in the construction industry. *Buildings*. 2025. vol. 15. art.no. 181. DOI: 10.3390/buildings15020181
4. Tavadi A.R., Naik Y., Kumaresan K., Jamadar N.I., Rajaravi C. (2024) Basalt fiber and its composite manufacturing and applications: an overview. *International Journal of Research Findings in Engineering, Science and Technology*. vol. 6, no. 1, pp. 50-56. DOI: 10.48028/iiprds/ijrfest.v6.i1.07
5. Yan W., Shi J., Cao X., Zhang M., Li L., Jiang J. (2025) A Review on the applications of basalt fibers and their composites in infrastructures. *Buildings.* vol.15, art.no. 2525. DOI:10.3390/buildings15142525
6. Liu Y., Zhang M., Liu H., Tian L., Liu J., Fu C., Fu, X. (2022) Properties of basalt fiber core rods and their application in composite cross arms of a power distribution network. *Polymers.* vol. 14, no. 12, art.no. 2443. DOI:10.3390/polym14122443
7. Monaldo E., Nerilli F., Vairo G. (2019) Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering. *Composite Structures*. vol. 214, pp. 246-263. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.02.002
8. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // В сборнике: Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2013. Якутск, 2013. Т.1. С. 5-7.
9. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. (2020) Ehe effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics. *Heliyon*. 2020. vol. 6, no. 3, art.no. e03481. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03481
10. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. (2022) Aging of basalt plastics in open climatic conditions. *Polymer Science, Series D*. vol. 15, no. 1, pp. 101-109. DOI:10.1134/S1995421222010191

11. Матус Н.В., Кычкин А.К. Способ приготовления базальтофиброармированных бетонных блоков и конструкций Патент на изобретение RU 2393085 C1, 27.06.2010. Заявка № 2009101376/03 от 19.01.2009.
12. Зимин Д.Е., Татаринцева О.С., Кычкин А.К. Наномодификация эпоксидного связующего для создания базальтопластика с улучшенными эксплуатационными свойствами // Ползуновский вестник. 2013. № 3. С. 282-285.
13. Гаврильева А.А., Винокуров Г.Г., Кычкин А.К., Орешко С.М. Технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон при фильерном способе их получения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4-2. С. 448-450.
14. Гаврильева А.А., Винокуров Г.Г., Кычкин А.К. Вязкость расплава и технологические режимы формования непрерывных базальтовых волокон при фильерном способе получения // Наука и образование. 2014. № 1 (73). С. 24-27.
15. Васильева А.А., Кычкин А.К., Ананьева Е.С., Лебедев М.П. Исследование свойств базальта Васильевского месторождения Якутии в качестве сырья для получения непрерывных волокон // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 9. С. 516-520.
16. Кычкин А.К., Васильева А.А. Исследование физико-механических характеристик композиционных арматурных стержней, изготовленных на основе базальтового ровинга // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2012. Т. 9. № 3. С. 80-85.
17. Echtermeyer A.T., Gagani A., Krauklis A., Mazan T. *Multiscale modelling of environmental degradation-first steps.* In book: Durability of Composites in a Marine Environment 2/ Davies P., Rajapakse,Y., Eds. Springer: Berlin, 2018. vol. 245. pp. 135–149. DOI: 10.1007/978-3-319-65145-3_8
18. Oghazian F., Vazquez E. (2021) A multi-scale workflow for designing with new materials in architecture: case studies across materials and scales. Proceedings of the *26th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA)*. vol. 1, pp. 533-542.
19. Starkova O., Gagani A.I., Karl C.W., Rocha I.B.C.M., Burlakovs J., Krauklis A.E. (2022) Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites–durability prediction methods. *Polymers*. vol. 14. art.no. 907. DOI: 10.3390/polym14050907
20. Кычкин А.К., Старцев О.В., Лебедев М.П., Лукачевская И.Г., Терешкин А.Л., Копырин М.М., Марков А.Е., Кычкин А.А., Кротов А.С. Измерение и анализ количества циклов «замораживание-оттаивание» эпоксидных стекло- и углепластиков в условиях экстремально холодного климата // Южно-Сибирский научный вестник. 2025. Т. 3, № 61. С. 129-141.
21. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. (2020) Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structural Integrity*. 2020. vol. 30, pp. 71-75. DOI:10.1016/j.prostr.2020.12.012
22. Lukachevskaia I.G., Kychkin A., Kychkin A.K., Vasileva E.D., Markov A.E. (2025) Effect of 2000-hour ultraviolet irradiation on surface degradation of glass and basalt fiber reinforced laminates. *Polymers*.vol. 17. art.no. 1980. DOI: 10.3390/polym17141980
23. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.A., Lukachevskaya I.G. (2025) The effect of biocontamination on mechanical strength and moisture transfer performance of epoxy basalt fiber reinforcement bar exposed to arctic conditions. Polymers. vol. 17, no 4, art. no. 460. DOI:10.3390/polym17040460
24. Кычкин А.К., Старцев О.В., Гаврильева А.А., Кычкин А.А. *Влияние экстремальных условий Севера на свойства базальтопластиковых стержней.* В книге: Надежность материалов, техники и конструкций в условиях экстремально холодного климата. Н: Сибирское отделение РАН, 2025. С. 148-162.
25. Лебедев М.П., Старцев О.В. Закономерности старения полимеров и полимерных композиционных материалов в условиях Крайнего Севера // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72. № 2. С. 553-565.
26. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composites in extremely cold climates // Izvestiya of Altai State University. 2020. No 1 (111). P. 41-51. DOI:10.14258/izvasu(2020)1-06
27. Startsev O.V., Kychkin A.K., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effects of moisture on aging of polymer composite materials in a cold climate // Procedia Structural Integrity. 2020. V. 30. P. 162-166. DOI:10.1016/j.prostr.2020.12.025
28. Старцев О.В., Поляков В.В., Салита Д.С., Лебедев М.П. Акустическая эмиссия в вершине трещины при охлаждении влагонасыщенного композита // Доклады российской академии наук. Химия, науки о материалах. 2020. Т. 492-493. № 1. С. 157-161.
29. Startsev O.V., Perepechko I.I. (1984) Molecular mobility and relaxation processes in an epoxy matrix – 1.influence of the reinforcing filler. *Mechanics of Composite Materials.* vol. 20, no. 3, pp. 271-274.
30. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirov Y.M., Kychkin A.K. (2020) Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis. *Mechanics of Composite Materials*. vol. 56, pp. 227-240. DOI:10.1007/s11029-020-09875-5
31. Старцев В.О., Лебедев М.П., Фролов А.С. Измерение показателей рельефа поверхности при изучении старения и коррозии материалов. 2.Полимеры, полимерные композиционные материалы и алюминиевые сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. №7. С. 24-29.
32. Gavrilieva A.A., Startsev O.V., Lebedev M.P., Krotov A.S., Kychkin A.K., Lukachevskaya I.G. (2024) Size effects in climatic aging of epoxy basalt fiber reinforcement bar. *Polymers*. vol. 16, art.no. 2550. DOI:10.3390/polym16182550.
33. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Krotov A.S., Kychkin A.A., Gavrilieva A.A. (2025) Durability of basalt- and glass fiber-reinforced polymers: influence of internal stresses, mass loss modeling, and mechanical/thermomechanical properties under extreme cold climate exposure. *Polymers*. vol. 17, art. no.2457. DOI: 10.3390/polym17182457

УДК 620.16.620.17
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-33-37

БУРООПУСКНЫЕ СВАИ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ММГ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Ялыгин С.А.[1], Голиков Н.И. [2], Ермаков Б.С.[3], Слепцов О.И.[2], Швецов О.В.[3]
[1] ПАО «ГАЗПРОМНЕФТЬ»
[2] ИФТПС СО РАН
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: Ermakov55@bk.ru

Аннотация. *Развитие нефтегазовой отрасли связано исключительно с освоением новых северных территорий РФ. Обустройство месторождений в условиях многолетнемерзлых грунтов резко увеличивает себестоимость строительных, в первую очередь фундаментных работ. Одним из путей снижения себестоимости обустройства является отказ от послесварочной термической обработки сварных соединений прямошовных сварных СВЧ труб. В работе приведены результаты исследований механических свойств, коррозионной стойкости, трещиностойкости, усталостных испытаний подтверждающие возможность отказа от избыточного режима термической обработки.*

Ключевые слова: *многолетнемерзлые грунты, буроопускные сваи, послесварочная термическая обработка*

BOREHOLE PILES FOR FOUNDATIONS OF OIL AND GAS FIELDS IN THE PFS AREA, PROBLEMS AND SOLUTIONS

Yalygin S.A.[1], Golikov N.I.[2], Ermakov B.S.[3], Sleptsov O.I.[2], Shvetsov O.V.[3]
[1]PJSC GAZPROMNEFT
[2]IPTPN SB RAS
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. *The development of the oil and gas industry is solely related to the development of new northern territories of the Russian Federation. The development of deposits in permafrost conditions dramatically increases the cost of construction, primarily foundation work. One of the ways to reduce the cost of construction is to abandon the post-welding heat treatment of welded joints of straight seam welded microwave pipes. The paper presents the results of studies of mechanical properties, corrosion resistance, crack resistance, and fatigue tests confirming the possibility of eliminating excessive heat treatment.*

Keywords: *permafrost soils, borehole piles, post-welding heat treatment*

Основное развитие нефте- и газодобывающих отраслей в нашей стране приходится на до- послевоенный период с середины 30-х до конца 50-х годов прошлого века, когда началось освоение наиболее крупных месторождений, расположенных в центральных регионах России – в Приволжье, в районе Ухты, Печорском и Ставропольском регионах. Интенсивное использование этих месторождений сделало нашу страну практически независимой от иностранных поставок ресурсов, привело к созданию новой отрасли машиностроения, нацеленной на разработку и изготовление мощных аппаратов для добычи, перекачки и переработки нефти. Начиная с 80-х годов XX века центр тяжести добычи энергоресурсов постепенно начал смещаться в северные и северо-восточные регионы страны. На первом этапе освоения были задействованы наиболее крупные и легкодоступные ресурсы, однако их постепенное исчерпание в настоящее время потребовало изменить подход к оценке разведанных объемов. Уже в начале XXI века встал вопрос о необходимости вовлечения в добычу средних и малых месторождений нефти и газа.

Такое изменение политики добычи привело к изменению подхода к процессу сборки и обработки продукта. На крупных месторождениях была разработана и использована система централизованного сбора, когда добываемый флюид из кустов скважин подается на установки комплексной подготовки и там, до направления в магистральный трубопровод проходит промысловую очистку и обработку на установках комплексной подготовки продукта. После предварительной обработки очищенный продукт с крупных месторождений поступает в магистральный газо- или нефтепровод и направляется на перерабатывающие предприятия.

В условиях малых месторождений, в основном, используется система индивидуальной сборки флюида, при которой на месте добычи происходит его первичная обработка. Затем флюид поступает в сборный коллектор и через него, подается на сборный пункт для его окончательной очистки и обработки, после чего обработанный продукт подается в магистральный трубопровод или через сепарационные установки, промысловые насосные станции и термохимические установки подается для последующего сбора в резервуарные парки, а затем в нефтепровод наземной или подземной прокладки. Вариант прокладки, в первую очередь, зависит от геолого-климатических условий региона добычи [1].

К настоящему времени основными регионами добычи полезных ископаемых стали области, расположенные в Западной и Восточной Сибири. В настоящее время более 90% добычи природного газа и большую часть нефти в нашей стране добываются на территории Ямало-Ненецкого автономного округа [2]. Подобное смещение центров добычи из центральных регионов страны в слабо освоенные северные окраинные территории привело к созданию ряда проблем, которые необходимо решить при строительстве и обустройстве новых промысловых площадок. По мнению специалистов [3] к таким особенностям относятся:

1. Удаленность от промышленно развитых регионов, отсутствие развитой инфраструктуры, сложности с транспортировкой и значительные стоимости доставки на строительную площадку материалов, оборудования, рабочей силы;

2. Неблагоприятные гео-климатические условия территории, выражающиеся в суровом климате, большом количестве рек и озер, высокой заболоченности, что затрудняет проходимость техники и ведение строительно-монтажных работ;

3. Сложные инженерно-геологические условия территории освоения и обустройства северных месторождений требуют более детального изучения и анализа данных инженерно-геокриологических изысканий при проектировании и строительстве объектов обустройства месторождений.

Согласно ВСН 39.1.06-84 оборудование обустройства нефтяных месторождений, размещаемое на открытых площадках добычи и первичной переработки и требующее установки на различного типа фундаменты представляет собой сложный производственный комплекс, в котором можно выделить несколько основных технологических групп. Это каркасные здания и здания с несущими стенами; блочно-комплектные сооружения; компрессорные цеха, прессы и другие агрегаты; надземные, заглублённые и подземные резервуары и сооружения; открытые площадки с расположенным на них технологическим оборудованием, емкостями для хранения различных продуктов и т. п. [4]. Кроме основных технологических сооружений на площадках располагаются вспомогательные объекты – складские помещения, гаражи, пожарные депо, вахтовые жилые комплексы, объекты медицинского и социально-культурного назначения. Практически все эти сооружения и объекты устанавливаются на свайные фундаментные основания, изготавливаемые в соответствии с требованиями СП 25.13330.2020 [5], причем каждая вторая свая, выполненная в северных регионах, – буроопускная. Учитывая, что количество таких, свай, используемых ежегодно нефте- или газодобывающей компанией составляет несколько десятков тысяч штук, суммарная стоимость поставок свай в северные регионы страны превышает несколько миллиардов рублей, а масса поставки – тысячи тонн [6].

Применяемые при строительстве объектов ТЭК технические решения обеспечивают необходимую прочность сооружений и обладают надежностью при строительстве и эксплуатации объектов. Однако свайное основание имеет недостатки – неиспользованные в полной мере прочностные характеристики металла (несущая способность свай по грунту намного меньше несущей способности по материалу), высокая стоимость строительно-монтажных работ и низкая экономическая эффективность фундамента в целом; невозможность надежной защиты сваи от грунтовой коррозии, что особенно актуально для засоленных грунтов северных регионов [3].

Анализ условий эксплуатации свайных фундаментов в условиях ММГ показал, что ни в одном из случаев аварийных разрушений или повреждений свайных фундаментов не было отмечено разрушения металла свайных опор, связанных с недостаточной хладостойкостью материала сваи, с возникновением в зоне сварного шва прямошовной сварной трубы каких-либо дефектов, например, хрупких трещин, потери несущей способности или нарушений геометрической формы трубы. Единственным фактором риска, приводящим к аварийным ситуациям, являлась проблема коррозионных повреждений, что следует связывать с некачественной антикоррозионной обработкой сваи и развитие хрупких трещин замедленного разрушения при потере геометрической целостности свайного поля и перераспределения вида нагрузок на сваю со сжимающих на изгибающие.

Обычно стальные сваи, не предназначенные для магистральных трубопроводов и используемые при обустройстве площадок добычи и первичной переработки проектируют из стальных прямошовных труб изготовленных, в основном, методом сварки токами высокой частоты – СВЧ. Следует отметить,

что в соответствии с требованиями СП16.13330.2017 [8] все трубы, изготовленные методом высокочастотной сварки (СВЧ) и идущие на производство свай должны быть подвергнуты послесварочной термической обработке. Однако, как показали ранее проведенные исследования, в частности [9,10], объемная термическая обработка не может полностью устранить дефекты сварного соединения, полученного СВЧ методом, а работоспособность данного типа сварного шва должна быть обеспечена за счет формирования структур повышенной прочности или образования при сварке усиления сварного шва. Обоснованием необходимости термической обработки свай после сварки давлением с нагревом зоны стыка токами высокой частоты является необходимость выравнивания свойств между металлом сварного соединения и основного металла. Однако, как было показано в работах [6-11] такое выравнивание не достигается из-за малого времени выдержки при термической обработке, а в ходе эксплуатации ни разу не было отмечено, что аварийное разрушение фундаментов оказывалось связанным с какими-либо свойствами сварного шва. Следует особо подчеркнуть, что СП 25.13330.2020, декларируя необходимость термической обработки труб, не прописывает режим этой термической обработки и не дает ссылок на другие нормативно-технические документы, где эти режимы могут быть указаны.

В работе были проведены исследования влияния послесварочной термической обработки на механические, усталостные и коррозионные свойства металла сварных соединений прямошовных сварных, методом СВЧ, труб из стали 09Г2С (ГОСТ 20295-85), использованных при изготовлении буроопускных свай, которые были установлены на опытном полигоне ЯНЦ СО РАН. Срок полигонных испытаний составил два с половиной года, а выбор места проведения испытаний был обоснован тем, что гео-климатические условия полигона практически полностью соответствуют гео-климатическим условиям основного добывающего региона – ЯНАО. Для проведения испытаний были использованы трубы с объемной и локальной послесварочной обработкой и без послесварочной термической обработки.

Оценка влияния послесварочной обработки на работоспособность буроопускных свай, изготовленных из прямошовных труб, проведена путем испытаний основного металла и металла сварного соединения на растяжение на универсальной испытательной машине Instron 8850 и ударный изгиб на маятниковом копре Instron мод. 600MPX (ГОСТ 1497-84, ГОСТ 6996-66, ГОСТ 9454-78). Металлографический анализ на поперечных шлифах выполнен на оптическом микроскопе «Reichert-Jung MeF3A» при увеличениях в 50–500 раз. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе «Reichert-Jung Micro-Duromat 4000E» в соответствии с процедурой ГОСТ 9450-76. Коррозионная стойкость металла сварного соединения была испытана в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Испытания на усталость выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502-79. Ультразвуковой контроль металла сварного соединения свай выполнен с помощью импульсного дефектоскопа УД2В-46П в соответствии с требованиями ГОСТ 55724-2013. Магнитопорошковая дефектоскопия выполнена в соответствии с ГОСТ 565123-2015.

Первоначально был проведен анализ фактического состояния сварных соединений трубных элементов свай неразрушающими методами. Результатами визуально измерительного, ультразвукового и магнитопорошкового контроля показано, что в сварных соединениях труб отсутствуют недопустимые дефекты. Исследование химического состава и механических свойств основного металла и сварных соединений труб подтвердил их соответствие требованиям ГОСТ 20295–85. Изготовленные сваи были погружены в соответствии с требованиями нормативной документации в декабре 2022 г и извлечены в 2025 г. Температура окружающего воздуха при установке свай составляла минус 30 – минус 35 ^{0}С. После извлечения свай в 2025 г. был выполнен повторный неразрушающий контроль сварных соединении, по результатам которого не было выявлено каких-либо дефектов, связанных с их длительным пребыванием в условиях полигона или развития ранее обнаруженных дефектов сварных швов.

Извлеченные сваи (трубные элементы свай) были разрезаны на образцы для проведения испытаний. Было показано, что механические свойства основного металла труб (вне зависимости от вида и наличия послесварочной термической обработки) находятся в пределах: предел текучести 450–470 МПа, временное сопротивление 560–610 МПа, относительное удлинение 25–30%. В ходе испытания механических свойств сварных соединений труб по ГОСТ 6996-66 – определено, что все испытанные образцы были разрушены по основному металлу – то есть прочность сварных швов превышает прочность основного металла труб.

По результатам испытаний было показано, что механические свойств металла труб с различными видами послесварочной термической обработкой и без нее практически не отличаются друг от друга как в состоянии поставки, так и после полигонных испытаний. Особое внимание было уделено испытаниям ударной вязкости сварных соединений. В соответствии с требованиями СП 16.13330.2016 разрешается эксплуатация свай, продольные сварные соединения которых, при динамических испытаниях при температуре минус 60 ^{0}С обладают ударной вязкостью не менее 34 Дж/см^2. Данные по результатам

испытаний ударной вязкости трубы с объемной (1) и локальной (2) послесварочной термической обработкой и без термической обработки (3) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ударная вязкость сварных соединений труб

Труба	KCV Дж/см^2, при температуре ^{0}C				
	20	0	–20	–40	–60
1	64	55	51	29	14
2	53	51	47	25	12
3	52	49	46	26	14

Как следует из приведенных данных ни одна из трех труб с различным видом послесварочной термической обработки не соответствует требованиям СП 16.13330.2016. Одной из причин недостаточной ударной вязкости сварных соединений труб может являться недостаточность интенсивности (времени нахождения при температуре нагрева) термической обработки. Для подтверждения этого предположения в работе были проведены сравнительные исследования ударной вязкости сварных соединений труб без послесварочной термической обработки, после объемной и локальной термической обработки, выполненной по режимам, принятым на металлургических заводах, а также после проведения различных модельных режимов термической обработки сварных соединений в лабораторных условиях. Были выполнены следующие виды термической обработки: нагревы до температур 930 ºС – температура нормализация стали 09Г2С, 680 ºС и 450 ºС – температуры высокого и среднего отпуска, выдержки при этих температурах в течение 2 часов с последующим охлаждением на воздухе. Было показано, что в результате проведенных испытаний при температуре минус 60 ºС требование СП16.13330.2016 выполняются только на металле после нормализации в лабораторных условиях (930 ºС 2 часа выдержки охлаждение на воздухе) – то есть ни один из исследованных трубных элементов свай, вне зависимости от наличия или отсутствия послесварочной термической обработки, не соответствует требованиям 16.13330.2016.

Анализ коррозионной стойкости сварных соединений трубных элементов свай показал, что коррозионная стойкость сварных соединений в кислых – 1–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с доведением уксусной кислотой до pH = 3; и щелочных – 2–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с концентрацией 0,1 масс. % доведением гидроксидом натрия до pH = 11 средах находится в пределах 0,3 мм/год в кислых и около 0,1 мм/год в щелочных средах. Имитация режима эксплуатации свай (понижение температуры испытательных сред) привели к значительному снижению скорости коррозии. Влияния послесварочной термической обработки на коррозионную стойкость зон сварного соединения труб обнаружено не было.

Анализ усталостной прочности сварных соединений труб проведен согласно ГОСТ 25.502-79 на базе 2 000 000 циклов, при напряжении 353 МПа (60 % $\sigma_в$ стали 09Г2С). Все образцы швов без видимых дефектов сварных соединений, связанных с особенностями СВЧ сварки, выдержали испытания без разрушения. Наличие таких дефектов приводит к ускоренному усталостному разрушению сварных соединений. Основными дефектами сварных швов, выявленными при анализе сварных соединений, явились – сосредоточенная и рассеянная пористость, блистеры, трещины и оксидные включения в зоне «белой линии».

Оценкой трещиностойкости (CTOD) – δ_c сварных соединений по ГОСТ 25.506-85 показано, что вне зависимости от термической обработки сварных швов их трещиностойкость находится в пределах – 0,35–0,40 мм. Как следует из приведенных данных трещиностойкость основного металла и зон сварного соединения трубы без термической обработки и после объемной послесварочной термической обработки близки между собой как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний.

В представленном исследовании приведены результаты анализа влияния послесварочной термической обработки на механические свойства, коррозионную стойкость, усталостную прочность и трещиностойкость сварных соединений прямошовных труб, изготовленных методом СВЧ и использованных при изготовлении буроопускных свай для фундаментов в зоне Арктики. По результатам лабораторных и полигонных испытаний было показано:

– послесварочная термическая обработка не оказывает существенного влияния на структуру и свойства сварных соединений, так как приводимые в условиях трубных предприятий режимы недостаточно интенсивны для устранения последствий сварки токами высокой частоты;

– проведенными исследованиями показано, что послесварочная термическая обработка не оказывает существенного влияния на свойства и микроструктуру свай из стали 09Г2С как в состоянии поставки, так и после эксплуатационной выдержки в грунтах различного типа.

Благодарность: *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSEG-2024-0009 Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах).*

Список литературы

1. Элияшевский И.В. Технология добычи нефти и газа. /Недра, Москва, 1976 г., 256 стр.
2. Добыча газа и нефти. / https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/ электронный ресурс.
3. Минкин М. А., Потапова О. А. Особенности обустройства северных нефтяных и газовых месторождений России и основания и фундаменты зданий и сооружений объектов обустройства. / https://www.fundamentproekt.ru/publications/pub016.html/ электронный ресурс.
4. ВСН 39.1.06-84. Ведомственные нормы строительного проектирования. Нормы и правила проектирования объектов нефтяной промышленности. / https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9712/.
5. Свод Правил СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88/М., 2020, 136 с.
6. Ялыгин С.А., Ермаков Б. С., Столяров А.В., Койнов Е.Г., Швецов О.В., Ша-пошников Н.О., Токарев В. О., Голиков Н. И. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай. / PRO Нефть, т.9, №1, 2024, с.173-182.
7. Драчков Д.С. Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Сб. ст. V. науч.-практ. конф. – Пенза, 2017 – С. 133–135.
8. Свод Правил СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81. М.,2020. 151 с.
9. Ткачук М. А., Багмет О.А., Степанов П. П. Разработка режимов локальной термической обработки сварного шва труб среднего диаметра, сваренных токами высокой частоты // Сталь. 2016. №3. С. 54–59.
10. Гончаров Н. Г., Юшин А. А., Колесников О. И., Нестеров Г. В., Азарин А.И. Исследование влияния термической обработки на металлофизические свойства металла сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. №11. С. 412–419.
11. Швецов О.В., Ермаков Б. С. Влияние объемной термической обработки на эксплуатационные свойства буроопускных свай, установленных в условиях многолетнемерзлого грунта. / В книге: Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. Сборник тезисов VII научно-технической конференции. Томск, 2024. С. 172–177.

СЕКЦИЯ 1. СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ, УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОРМ И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.891
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-38-41

ПРОБЛЕМА АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ В АРКТИКЕ И МЕТОДЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Голиков Н.И.[1], Семёнов С.В.[1], Слепцов Г.Н.[1], Сараев Ю.Н.[1], Тихонов Р.П.[1], Кузнецов С.В.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
[2]Алмазы Анабара
E-mail: n.i.golikov@mail.ru

Аннотация. *Климатические и горнотехнические условия Якутии (перепады температур, вибрации, ударные нагрузки) вызывают ускоренный износ карьерной техники. Исследование на примере бульдозеров выявило наиболее уязвимые узлы: коронки/стойки рыхлителя и гусеничный движитель. Лабораторный анализ коронок от разных производителей показал прямую зависимость износостойкости от твёрдости и ударной вязкости при низких температурах. Наилучшие результаты показали кованые коронки. Практические решения включают разработку спецтребований к материалам для Арктики и внедрение технологии наплавки. Это позволило «Алмазам Анабара» значительно сократить потребление коронок и повысить эффективность работ.*

Ключевые слова: *износ, коронка рыхлителя, натурные испытания, механические свойства, импульсно-дуговая наплавка*

ABRASIVE WEAR OF MINING EQUIPMENT COMPONENTS IN THE ARCTIC AND METHODS FOR ITS MITIGATION

Nikolay I. Golikov[1], Sergey V. Semenov[1], Gavriil N. Sleptsov[1], Yuri N. Saraev[1], Ruslan P. Tichonov[1], Sergey V. Kuznetsov[2],
[1] FRC «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»
[2]Almazy Anabara

Abstract. *The climate and mining conditions of Yakutia (temperature fluctuations, vibrations, shock loads) cause accelerated wear of quarry equipment. A study on bulldozers identified the most vulnerable components: ripper tips/shanks and the crawler system. Laboratory analysis of tips from various manufacturers revealed a direct correlation between wear resistance and both hardness and low-temperature impact toughness. Forged tips demonstrated the best results. Practical solutions include developing special material requirements for the Arctic and implementing hardfacing technology. This has allowed Almazy Anabara to significantly reduce annual tip consumption and improve operational efficiency.*

Keywords: *wear, ripper crown, full-scale tests, mechanical properties, pulsed arc surfacing*

Введение. Интенсивное освоение Арктики и Северо-Востока актуализировало проблему низкотемпературной работоспособности техники. Практика показывает [1], что в экстремальных климатических условиях ресурс машин сокращается в 2–3 раза, производительность труда падает в 1,5–2 раза, а затраты на ремонт возрастают в 5–8 раз. Коэффициенты отказа техники при разработке мерзлых грунтов достигают критических значений: 0,5 для автомобилей, 0,55–0,6 для тракторов и 0,8 для экскаваторов.

При добыче полезных ископаемых, например, на россыпях Якутии, широко используются бульдозерно-экскаваторные комплексы. Низкие температуры и многолетняя мерзлота приводят к их ускоренному абразивному износу, что влечет за собой рост нагрузок, простоев и затрат на ремонт [2]. Ежегодные потери металла исчисляются тысячами тонн [3].

Основным видом разрушения деталей (зубьев экскаваторов, ножей бульдозеров) является абразивный износ [4–6]. Однако влияние низких температур на износостойкость сталей изучено неоднозначно. Исследования [7] констатируют ухудшение износостойкости углеродистых сталей на холоде, в то время как в [8] отмечен ее рост в диапазоне от 293 до 240 К с последующим снижением. Это противоречие объясняется комплексным влиянием температуры, схемы абразивного воздействия и характера нагрузки [8]. Таким образом, износ зависит от множества эксплуатационных и конструктивных факторов.

Цель данной работы – на примере АО «Алмазы Анабара» выявить основные детали карьерных бульдозеров, подверженные абразивному износу в Арктике, и найти рациональные пути решения этой проблемы.

Материалы и методы. Исследование проведено на наиболее изнашиваемых деталях карьерных бульдозеров Komatsu и «ЧЕТРА», эксплуатирующихся в Арктике при разработке мерзлых грунтов. Несмотря на доминирование импортной техники (свыше 65% парка – Komatsu), акцент на отечественные аналоги («ЧЕТРА», «ДСТ-Урал», и др.) является стратегически важным.

Для оценки износостойкости материалов использовался комплекс методов:

- **Измерение твердости** на твердомере AFFRI 206RTD (основной) и динамическом ТЭМП 2 (для полевых условий).
- **Определение химического состава** на спектрометре Foundry-master UVR.
- **Механические испытания** на растяжение (машина Zwick Roell Z600) и на ударную вязкость при –50 °C (копер Amsler RKP 450).
- **Оценка износостойкости** на специальной установке, имитирующей ударно-абразивное воздействие. Износ определяли по потере массы образцов после 30-минутных циклов испытаний.

Результаты и обсуждения. Наиболее изнашиваемой деталью гусеничного бульдозера является коронка рыхлителя эксплуатации в условиях отрицательных температур (до –60 °C) возможны хрупкие разрушения рабочей части. Коронки изнашиваются до потери рабочей грани, теряя до 1/3 исходной массы (16–18 кг). Перемещение режущей кромки в результате износа превышает 100 мм. Восстановление коронок до первоначальных размеров экономически нецелесообразно из-за больших затрат и технологических трудностей.

Значительные затраты на приобретение и сильный разброс износостойкости коронок от разных производителей побудили АО «Алмазы Анабара» провести серию испытаний для выбора оптимальных по стоимости и производительности образцов. Исследовались коронки для бульдозера Komatsu D375 из Италии, КНР, Австралии, России и др. Спектральный анализ показал, что производители применяют среднелегированные высокоуглеродистые стали, близкие к отечественным маркам 35ХГСА, 30ХГСА и 30ХГТ (ГОСТ 4543-71) [9]. Содержание основных элементов, %: 0,23–0,30 C; 0,31–1,70 Si; 0,64–1,20 Mn и 1,08–1,67 Cr.

Предел прочности импортных коронок составляет 1417–1700 МПа, предел текучести – 1340–1515 МПа. Наилучшее относительное удлинение (δ=10%) выявлено у коронок № 1 и 3. У остальных образцов этот показатель ниже из-за дефектов в виде пор (таблица 1). Ударная вязкость (KCU) при –50 °C коронок № 1, 3 и 6 соответствует нормативным значениям. Наибольшая твердость – 47 HRC – у коронки № 1, наименьшая (30–32 HRC) – у № 4 и 6. Сравнительный анализ показал, что коронки № 1, 2, 3 и 5 имеют сопоставимую и более высокую износостойкость по сравнению с № 4 и 6.

Таблица 1. Механические свойства металла коронок

№	Производитель	Среднее значение механических характеристик				
		Предел прочности, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Ударная вязкость, KCU, Дж/см²	Твердость, HRC
1.	ITALRICAMBI (Италия)	1700	1515	10,56	63	47
2.	ESTI S.R.L. (Италия)	1417	1340	1,52	16	40
3.	Ningbo Lingfeng (КНР, кованная)	1606	1475	10,14	65	46
4.	Ningbo Turbo Int.Trading Co. (КНР)	1472	1440	0,43	28	32
5.	Bradken (Австралия)	1540	1427	0,69	24	42
6.	ЗЛАТМАШ (Россия)	992	926	5,42	32	30

Результаты испытаний демонстрируют прямую корреляцию между твердостью и износостойкостью. Наибольший массовый износ зафиксирован у коронок № 4 и 6, которые обладают самой низкой твердостью. При этом сталь коронки № 6 показала и наихудшие прочностные характеристики среди всех испытанных образцов (табл. 1).

Помимо лабораторных испытаний, эксплуатирующая организация провела натурные испытания коронок с участием производителей. Каждый изготовитель предоставил от 9 до 18 коронок. Испытания производились в зимнее время, при этом температура окружающего воздуха опускалась до –47°С.

Во-первых, выявлены проблемы с креплением: плотная посадка коронок на адаптер вызывала изгиб фиксирующего пальца и затрудняла замену. Причиной послужил недостаточный зазор в отверстии коронки. Для продолжения испытаний отверстия пришлось растачивать, а производители впоследствии стали выпускать коронки с измененной конструкцией. Во-вторых, износ коронок разных производителей существенно различался. Разница в максимальном объеме рыхления достигала 4 раз, что стимулирует производителей к улучшению качества, а предприятие – к выбору наиболее износостойких вариантов. При этом коронки китайского производства показали высокую производительность при относительно низкой стоимости. В-третьих, коронка ESTI S.R.L. (Италия), имеющая наименьшую ударную вязкость, разрушилась, что подтвердило необходимость применения в Арктике хладостойких материалов. В-четвертых, данные лабораторных и натурных испытаний хорошо коррелировали: коронки с высокими механическими свойствами показали лучшую производительность.

По итогам испытаний были разработаны технические требования к коронкам для арктических условий, включающие показатели твердости, ударной вязкости, прочности и химического состава. Это позволило предприятию повысить производительность рыхления и сократить годовой расход коронок с 26 тыс. до 14–16 тыс. штук, получив значительный экономический эффект.

Абразивному износу подвержена и стойка рыхлителя. Ресурс стоек различается: Komatsu D375 – до 7000 моточасов, ITALRICAMBI – 6300-6400, тогда как ООО «Профессионал» – лишь 900–1500 часов. Низкий ресурс последних часто связан с преждевременным разрушением. Для решения этой проблемы разработана оптимальная технология сварки [10], успешно применяемая предприятием для восстановления стоек.

Эксплуатация бульдозеров в условиях Крайнего Севера сопряжена с интенсивным износом деталей гусеничного движителя: траков, звеньев, пальцев и втулок. Наиболее уязвимым узлом является пара трения «втулка-палец», на которую воздействуют значительные нагрузки и абразивный износ при работе с мёрзлыми породами, что снижает общий ресурс техники.

Статистика эксплуатирующей организации показывает, что оригинальные втулки гусеницы бульдозера Komatsu D375 в среднем работают 3000–4000 моточасов. После выпрессовки и поворота на 90° их ресурс увеличивается на 1500–2000 моточасов, достигая в сумме около 5000 часов. Аналогичную наработку имеют детали BERCO, тогда как втулки бульдозера ЧЕТРА служат в среднем 2300 моточасов без возможности переворота.

Помимо этого, абразивному износу подвергаются пальцы узлов сопряжения, что приводит к уменьшению их сечения и увеличению зазоров. Спектральный анализ показал, что для изготовления этих деталей в основном применяются углеродистые стали с твердостью 55–60 HRC.

Для восстановления изношенных деталей перспективным методом является импульсно-дуговая наплавка. Исследования структуры и свойств покрытий, нанесенных электродами УОНИ 13/55 и Т590, показали, что данный метод формирует более однородную мелкозернистую структуру по сравнению со стационарными режимами [9, 11–13]. Рациональные режимы наплавки обеспечивают меньшее выгорание легирующих элементов, повышая твердость и износостойкость покрытий.

В настоящее время изучаются наплавленные слои из новых отечественных материалов, наиболее подходящих для восстановления деталей горной техники с использованием импульсных источников питания. Полагаем, что регулируемое тепловложение импульсно-дуговой наплавки способно улучшить эксплуатационные характеристики покрытий для пальцев сопряжения и деталей гусеничного движителя бульдозеров.

Заключение. Эксплуатация карьерных бульдозеров в Арктике вызывает ускоренный абразивный износ и хрупкое разрушение деталей (коронок, стоек рыхлителей, элементов гусеничного движителя), что значительно снижает производительность и увеличивает затраты на ремонт.

Комплексные испытания коронок выявили прямую зависимость износостойкости от механических свойств материала. Наилучшие результаты показали кованые коронки с высокими значениями твёрдости (45–47 HRC), ударной вязкости (>60 Дж/см² при –50 °С), прочности ($\sigma_т$ 1475–1515 МПа,

$\sigma_в$ 1606–1700 МПа) и пластичности (~10%), соответствующие сталям типа 30ХГТ и 35ХГСА. Разработанные технические требования к коронкам позволили сократить их годовое потребление с 26 до 14–16 тысяч штук.

Для восстановления изношенных деталей (стоек, пальцев и втулок) рекомендована импульсно-дуговая наплавка, обеспечивающая однородную мелкозернистую структуру с повышенной твёрдостью и износостойкостью.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М. Создание техники северного исполнения – проблема социально-экономического развития восточных регионов России. *Вестник Российской академии наук*. 2015;85(2):155-163. https://doi.org/10.7868/S0869587315020097
2. Лебедев Д.И., Федоров М.В., Голиков Н.И. [и др.] Натурные испытания служебных характеристик наплавленной коронки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A. *Наука и образование*. 2016;(2(82)):81-87.
3. Коротков В.А., Замотин В.А. Восстановление деталей горного оборудования. Горный журнал. 2001;(8):53–58.
4. Petrica M., Katsich C., Badisch E. [et al.]. Study of abrasive wear phenomena in dry and slurry 3-body conditions. *Tribology International*. 2013;(64):196–203. http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2013.03.028
5. Stolarski T.A. *Tribology in machine design*. Reprinted ISBN 0750636238. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2000. 298.
6. Андреева Л.И. Данилкин А.А. Оценка факторов, оказывающих влияние на работоспособность техники, работающей в условиях развития горнотехнических систем. *Горное оборудование и электромеханика*. 2023;(4(168)):20-27. https://doi.org/10.26730/1816-4528-2023-4-20-27
7. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. *Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений*. Новосибирск: Наука; 1976. 206 с.
8. Ан И.К., Вольф Э.Л., Сараев Ю.Н. Физико-механические аспекты абразивного изнашивания сталей в условиях охлажденной воздушной среды. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2019;21(1):108–121. https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.1-108-121
9. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Максимова Е.М., Семенов С.В. Повышение износостойкости деталей землеройной техники, эксплуатирующихся в условиях холодного климата. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018;14(12):543-547.
10. Слепцов Г. Н., Слепцов О. И., Степанова К. В. [и др.] Разработка оптимальной технологии сварки при реновации стойки рыхлителя высокопроизводительного бульдозера. *Сварка и диагностика.* 2022;(5):53-58. https://doi.org/10.52177/2071-5234_2022_05_53
11. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Слепцов О.И. [и др.] Импульсно-дуговая наплавка для восстановления изношенных деталей. *Наука и образование*. 2015;(3(79)):69-75.
12. Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П. [и др.] Способ восстановления деталей горнодобывающей техники, эксплуатирующейся в условиях Севера. *Наука и образование*. 2017;(4(88)):82-87.
13. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Перовская М.В. [и др.] Влияние структуры покрытий, наплавленных электродами Т-590 низкоуглеродистой стали на абразивное изнашивание. *Сварочное производство.* 2022;(3):15-21.

УДК 621.791
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-42-46

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ МАРТЕНСИТНЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ

Жужгина Т.А., Скутин В.С.
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
E-mail: zhyzhginata@yandex.ru

Аннотация. *Целью работы является оценка влияния технологических параметров сварки: температуры предварительного подогрева и силы сварочного тока на структуру и свойства зоны термического влияния сварных соединений из 9 и 12 % хромистых мартенситных сталей.*

По результатам исследований сделаны выводы об необходимости ограничения температуры подогрева и нецелесообразности уменьшения силы сварочного тока, а также даны рекомендации по вышеуказанным параметрам сварки, которые оказывают непосредственное влияние на формирование оптимальной структуры зоны термического влияния и свойств сварного соединения.

Ключевые слова: *параметры сварки, микроструктура ЗТВ, твердость ЗТВ, хромистые мартенситные стали, разупрочнение, дельта-феррит*

INFLUENCE OF WELDING TECHNOLOGY PARAMETERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS MADE OF MARTENSITIC CHROME STEELS

Zhuzhgina T.A., Skutin V.S.
CRISM «Prometey» of NRC «Kurchatov Institute»

Abstract. *The purpose of the work is to assess the effect of welding process parameters: preheating temperature and welding current strength on the structure and properties of the heat-affected zone of welded joints of 9 and 12 % chromium martensitic steels. Based on the research results, conclusions are drawn about the limitation of the preheating temperature and the inadvisability of reducing the welding current, and recommendations are given on the above-mentioned welding parameters, which have a direct impact on the formation of the optimal heat-affected zone structure and the properties of the welded joint.*

Keywords: *welding parameters, microstructure of the HAZ, hardness of the HAZ, chromium martensitic steels, softening, delta ferrite*

Проблематика. Хромистые стали относятся к ограниченно свариваемым материалам мартенситного класса, сварка которых представляет собой сложную научно-техническую задачу по следующим причинам:

– Образование холодных трещин и к рост ферритного зерна в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных соединения. Эта проблема особенно остро проявляется при выполнении корневых проходов под воздействием сварочного нагрева, а также вследствие значительного уровня остаточных сварочных напряжений и малого объема наплавляемого металла.

– Высокохромистые материалы склонны к разупрочнению под воздействием термического цикла сварки в зоне межкритического интервала температур. Формирование локальной мягкой прослойки в ЗТВ, в которой не происходит мартенситное превращение, может приводить к трещинам IV типа и стать причиной разрушений в процессе эксплуатации [1].

– Сварные соединения из мартенситных хромистых сталей требуют проведения обязательной послесварочной термообработки. Отличия химического состава, влияющие на температуры полиморфных фазовых превращений, определяют разные допускаемые диапазоны температур послесварочного отпуска для сварных соединений. Это различие может оказать критическое влияние на свойства разнородного сварного соединения, повышает вероятность возникновения недопустимых структурных изменений как в ЗТВ, так и непосредственно в мартенситной стали.

С учетом изложенных обстоятельств необходимо оценивать совокупное влияние технологии сварки на структурные превращения и разупрочнение в ЗТВ сварных соединений.

Цель работы заключается в оценке влияния технологических параметров сварки, таких как температура подогрева и сила сварочного тока, на структуру и свойства ЗТВ сварного соединения из хромистых мартенситных сталей для разработки оптимальной технологии сварки указанных материалов, обеспечивающей качество сварных соединений и заданные служебные характеристики.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются разнородные сварные соединения стали с 9 % и 12 % Cr, выполненные из кольцевых заготовок диаметром 230, 325 и 436 мм толщиной от 30 до 40 мм. Содержание химических элементов в исследуемых материалах представлено в таблице 1.

Таблица 1. Содержание химических элементов, масс. %

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb	Al	N	Ti
9 % Cr (1)	0,089	0,29	0,56	0,011	0,003	8,84	0,21	0,13	0,88	0,21	0,14	-	-	0,001
9 % Cr (2)	0,099	0,29	0,48	0,022	0,002	9,35	0,32	0,1	0,86	0,19	0,15	-	-	-
12 % Cr	0,100	0,22	0,65	0,014	0,003	12,20	0,94	0,08	0,97	0,21	0,07	0,029	0,053	0,002

Исследование микроструктуры сварных соединений из вышеуказанных хромистых мартенситных сталей проводилось на инвертированном тринокулярном микроскопе JX-200E. Анализу подвергались образцы, выполненные ручной дуговой сваркой покрытыми электродами при разной величине силы сварочного тока и температуры подогрева в исходном после сварки состоянии.

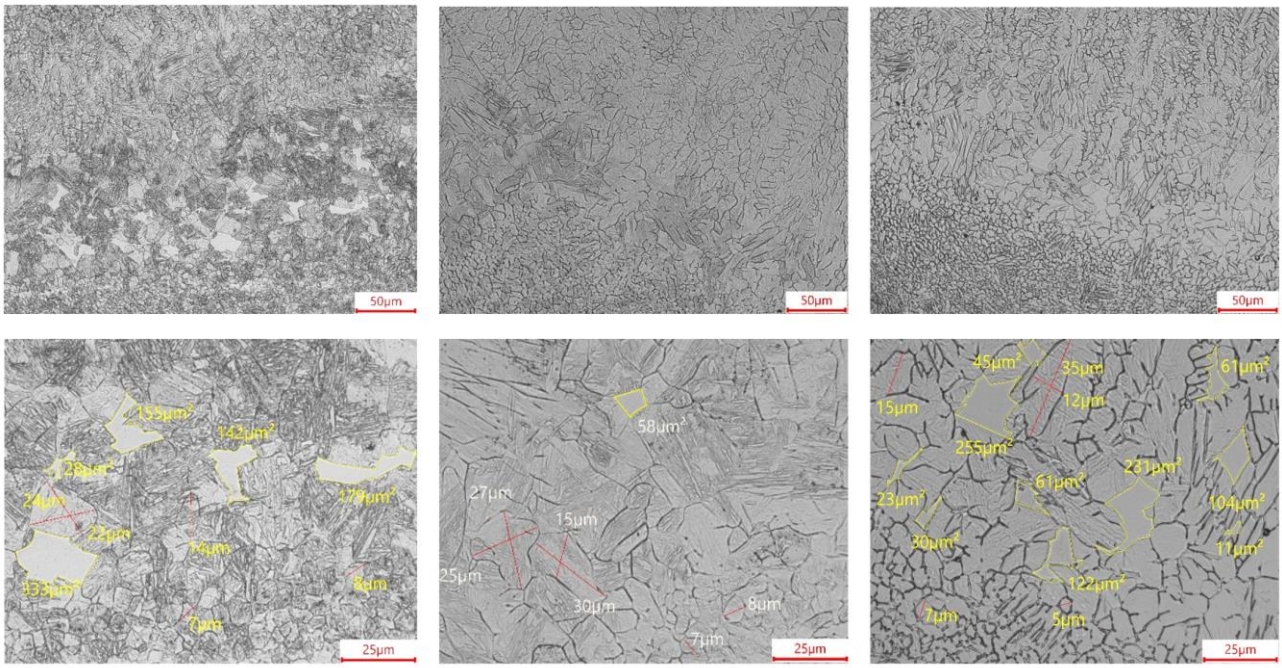
Пробоподготовка выполнялась с использованием комплексной лаборатории фирмы Struers, затем с целью выявления структуры образцы подвергались электролитическому травлению в 10 % растворе щавелевой кислоты при силе тока 6 А и напряжении 8 В.

Химический поэлементный анализ проводился на сканирующем электронном микроскопе Vega II Tescan в режиме высокого вакуума с помощью программного обеспечения Vega TC.

Твердость определялась в поперечном сечении сварных соединений. Измерения твердости по Виккерсу производились на оборудовании EmcoTest DuraScan-20, при нагрузке в 3 кг.

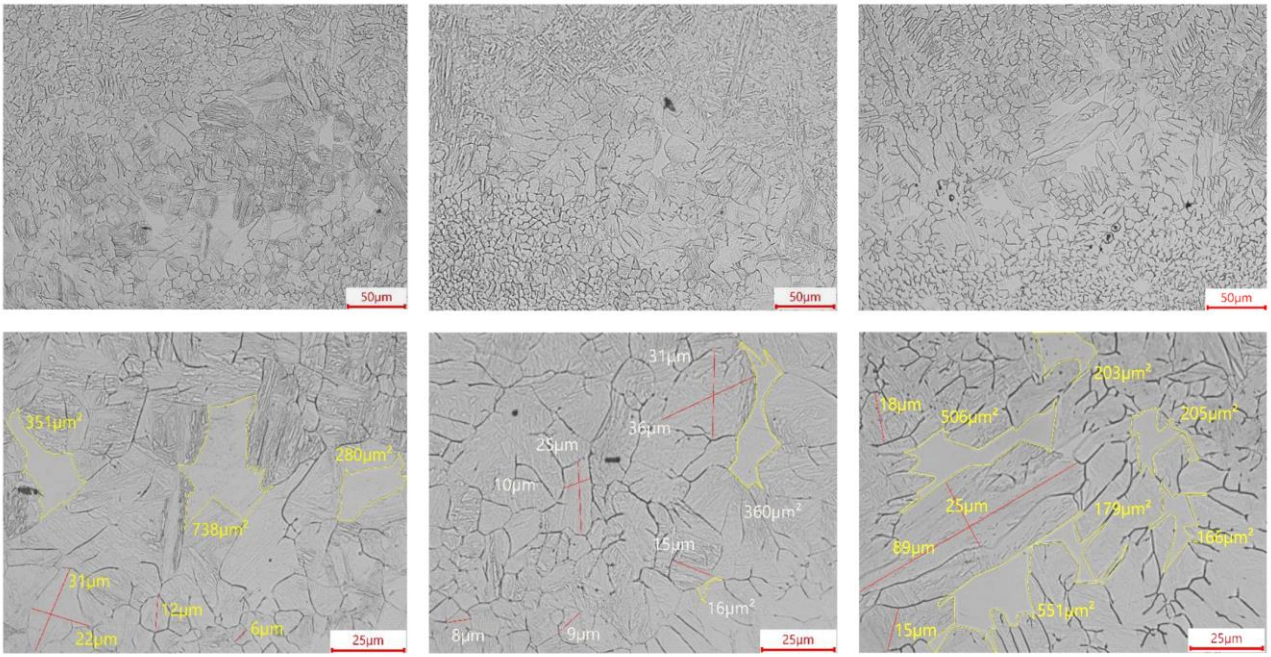
Результаты исследования. При исследовании влияния технологических параметров сварки основное внимание уделялось температуре предварительного и сопутствующего подогрева, а также величине силы сварочного тока.

Влияние температуры подогрева на ЗТВ мартенситных сталей. Первоначально при одинаковом значении силы сварочного тока варьировалась температура подогрева, значение которой составляло 220 °С и 300 °С (рис. 1 и 2).



а *б* *в*

Рис. 1. Микроструктуры ЗТВ при температуре подогрева 220 °С:
а) – сталь с 9 % Cr (1); б) – сталь с 9 % Cr (2); в) – сталь с 12 % Cr



а *б* *в*

Рис. 2. Микроструктуры ЗТВ при температуре подогрева 300 °С:
а) – сталь с 9 % Cr (1); б) – сталь с 9 % Cr (2); в) – сталь с 12 % Cr

Результаты исследований показали, что повышенная температура подогрева 300 °С и, соответственно, низкая скорость охлаждения ЗТВ при сварке мартенситных сталей, особенно для больших толщин, приводит к повышению объемной доли структурно свободного крупнозернистого дельта-феррита, что может снижать технологическую прочность и механические свойства, а также повышает вероятность хрупкого разрушения сварного соединения [2].

С учетом полученных результатов, была проведена оценка влияния снижения температуры подогрева от 220 °С до 160 °С на твердость в ЗТВ сварных соединений мартенситной 9% хромистой стали, выполняемых при пониженных (90 А) и повышенных значениях силы сварочного тока (110 А). Замеры твердости производились с шагом 0,5–1 мм в поперечном сечении вдоль прямой от линии сплавления перпендикулярно ЗТВ, полученные результаты представлены на рисунке 3.

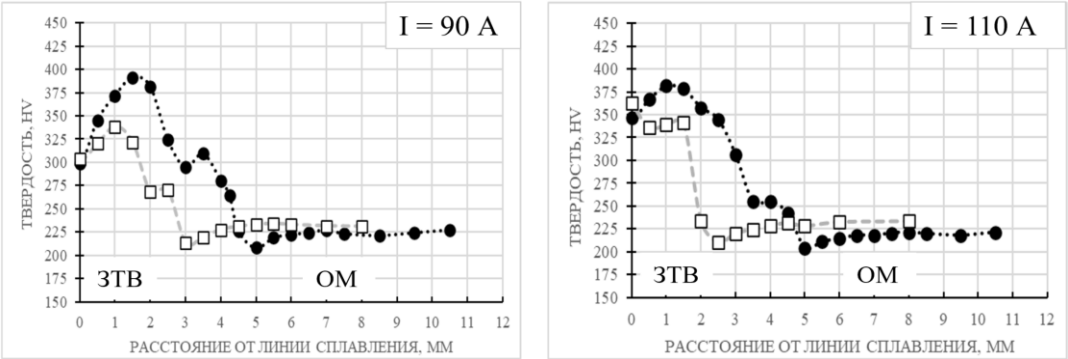


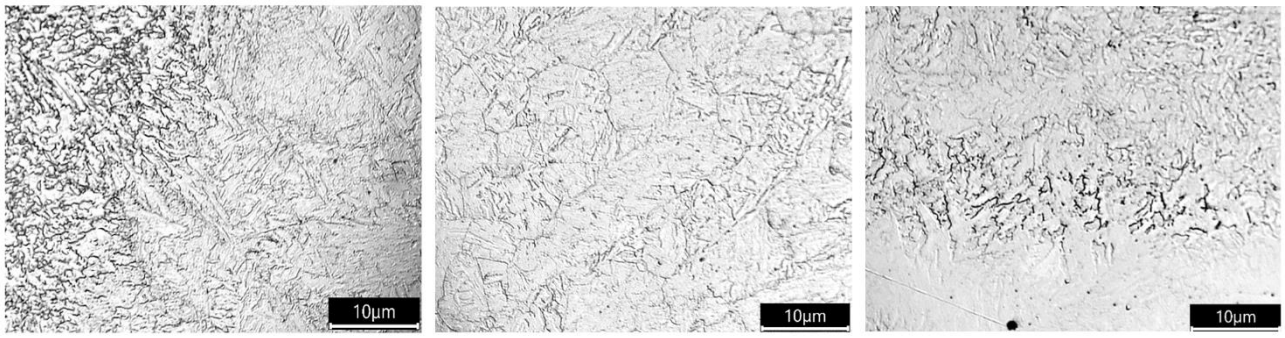
Рис. 3. График средних значений твердости ЗТВ стали с 9 % Cr:
● *– температура подогрева 160 °С;* □ *– температура подогрева 220 °С*

Анализ данных, представленных на рисунке 3 показал следующее. При пониженной температуре подогрева 160 °С в ЗТВ наблюдается увеличение твердости на 10–15 %, как при силе сварочного тока 90 А, так и при 110 А, которое связано с увеличением скорости охлаждения металла ЗТВ при сварке. Это приводит к образованию закалочных структур на околошовном участке ЗТВ и повышает вероятность образования холодных трещин.

На основании выполненных исследований установлено, что для получения оптимальной структуры и свойств ЗТВ мартенситных хромистых сталей необходимо ограничивать верхний предел мак-

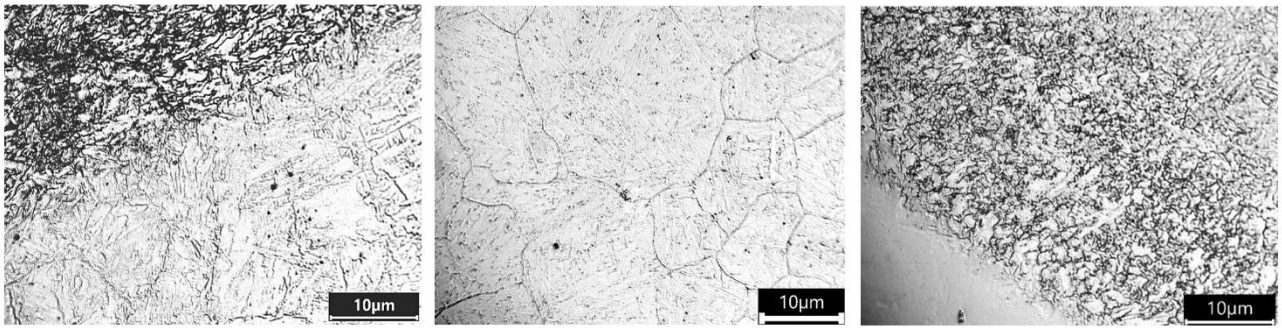
симальной температуры предварительного подогрева с целью снизить вероятность образования неблагоприятной структуры крупнозернистого дельта-феррита в околошовной зоне. Нижний предел температуры предварительного подогрева должен быть регламентирован с целью избежать формирования закалочных структур с максимальной твердостью.

Влияние силы сварочного тока на ЗТВ мартенситных сталей. Исследования проводились на образцах из 9 % Cr мартенситной стали с наплавкой, выполненной ручной дуговой сваркой покрытыми электродами диаметром 3 мм при силе сварочного тока 90 и 110 А в исходном после сварки состоянии (рис. 4–5).



а *б* *в*

Рис. 4. Микроструктура ЗТВ при силе сварочного тока 90 А:
а) – граница сплавления; б) – участок перегрева; в) – межкритический участок



а *б* *в*

Рис. 5. Микроструктура ЗТВ при силе сварочного тока 110 А:
а) – граница сплавления; б) – участок перегрева; в) – межкритический участок

Сравнительный анализ микроструктурных составляющих показал, что при исследуемых параметрах силы сварочного тока не наблюдается существенных различий в микроструктуре ЗТВ 9 % Cr мартенситной стали.

После исследования микроструктуры ЗТВ были проведены замеры твердости с шагом 0,5–1 мм на образцах, выполненных при значениях силы сварочного тока 90, 110 и 130 А (рис. 6).

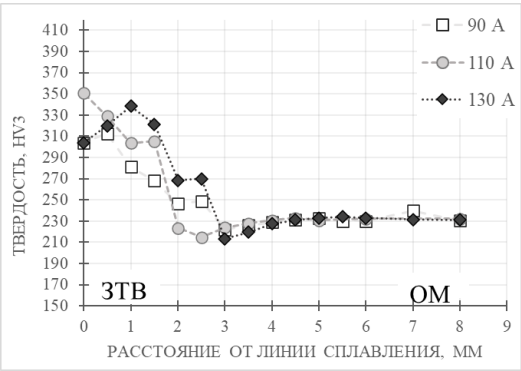


Рис. 6. График значений твердости ЗТВ стали с 9 % Cr

Анализ твердости в зоне термического влияния образцов показал, что уменьшение силы сварочного тока не привело к значимому снижению твердости в ЗТВ, при этом использование пониженной величины силы сварочного тока повышает вероятность недопустимых дефектов типа несплавлений.

С целью подтверждения вышеуказанной гипотезы о нецелесообразности использования режимов сварки с минимальным значением силы сварочного тока были проведены исследования химического состава образцов с наплавкой, выполненной покрытыми электродами при силе сварочного тока 90, 110 и 130 А, чтобы оценить миграцию хрома и других легирующих элементов из наплавленного металла в околошовную зону. На рис. 7 показаны результаты полученные значения для некоторых химических элементов, аналогичная ситуация наблюдается для всех энергетических спектров исследуемых участков.

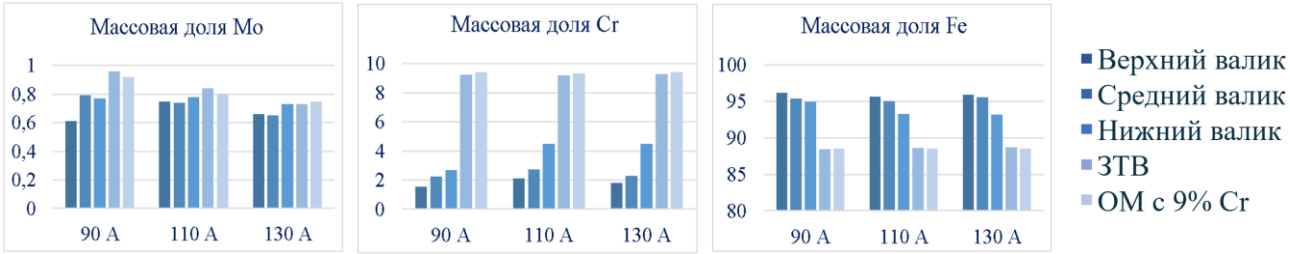


Рис. 7. Диаграммы изменения массовых долей Mo, Cr и Fe при варьировании силы сварочного тока

Анализ данных приведённых на рисунке 7 подтвердил нецелесообразность уменьшения силы сварочного тока, так как при режимах сварки 110 и 130 А было обеспечено более равномерное перемешивание наплавленного металла с 9 % хромистой сталью [3].

Заключение. На основании полученных результатов исследований выбран интервал температуры предварительного и сопутствующего подогрева от 180 °С до 220 °С при выполнении сварных соединений мартенситных сталей с 9 и 12 % Cr, с целью получения оптимальной структуры ЗТВ, которая оказывает непосредственное влияние на свойства разнородного сварного соединения.

Уменьшение силы сварочного тока с целью снижения тепловложения в основной металл не привело к значимому понижению твердости и не оказало существенного влияния на процессы закалки в ЗТВ мартенситной стали. При исследовании структуры и химического состава образцов также не выявлено существенных преимуществ использования минимальных значений силы сварочного тока при. Рекомендуемые значения силы сварочного тока при разработке технологии сварки мартенситных сталей составили 100–120 А для покрытых электродов диаметром 3 мм.

Список литературы

1. Деменин, М. Ф. Методы предотвращения трещин IV типа в сварных соединениях жаропрочных высокохромистых сталей мартенситного класса / М. Ф. Деменин // Электрические станции. – 2021. – № 8(1081). – С. 13-20. – EDN EWWWRH.
2. Сагалевич Е. А., Потак Я.М., Сачков В. В. Влияние δ-феррита на свойства низкоуглеродистых мартенситных нержавеющих сталей. Сборник трудов ЦНИИЧерМет. 1968. № 63. С.90-95.
3. Жужгина, Т. А. Исследование влияния режимов дуговой сварки и термообработки на свойства разнородных сварных соединений из теплоустойчивых сталей / Т. А. Жужгина, С. А. Вологжанина, В. С. Скутин // Современные проблемы машиностроения : Сборник статей XVI Международной научно-технической конференции, Томск, 27 ноября – 01 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. – С. 279-282. – EDN BBHVRE.

УДК 669-151.8:622.691.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-47-53

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ВЫЯВЛЯЕМЫХ В ОСНОВНОМ МЕТАЛЛЕ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Курган К.А.[1,3], Клопотов А.А.[2], Клименов В.А.[3], Стрелкова И.Л.[3]
[1]ООО «Газпром трансгаз Сургут», Инженерно-технический центр
[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет
[3]Национальный исследовательский Томский политехнический университет
E-mail: kurgan_ka@mail.ru

Аннотация. *Проведенные исследования позволили выделить три характерные картины сигналов при ультразвуковом контроле образцов стальных труб 10Г2ФБЮ, бывших в употреблении: от бездефектного металла; от образца с загрязненностью металла неметаллическими включениями; от образца с расслоением. Также в ходе исследования образцов с загрязненностью металла неметаллическими включениями, в некоторых случаях наблюдается объединение точечных неметаллических включений в строчку. При ультразвуковом контроле, строчечное распределение сорбитообразного перлита имеет имеют похожий сигнал, такой же, как и загрязненность металла неметаллическими включениями. При испытании образцов на растяжении, только в одном случае образец порвался по намеченной точке (по дефекту), но в тоже время полученные прочностные данные, как и у всех образцов соответствовали нормативным.*

Ключевые слова: *расслоение, загрязненность металла неметаллическими включениями, ультразвуковой контроль, сорбитообразный перлит, растяжение металла.*

STUDY OF METALLURGICAL DEFECTS DETECTED IN THE BASE METAL OF MAIN GAS PIPELINES

K.A. Kurgan[1,3], A.A. Klopotov[2], V.A. Klimenov[3], I.L. Strelkova[3]
[1]LLC «Gazprom transgaz Surgut», Engineering and Technical Center
[2]Tomsk State University of Architecture and Building
[3]National Research Tomsk Polytechnic University

Abstract. *The conducted studies allowed us to identify three characteristic signal patterns during ultrasonic testing of samples from used A710 Grade A steel pipes: from defect-free metal; from a sample with metal contamination by non-metallic inclusions; and from a sample with delamination. Furthermore, during the study of samples contaminated with non-metallic inclusions, a clustering of point-like non-metallic inclusions into linear chains was observed in some cases. During ultrasonic testing, the chain-like distribution of sorbite-like pearlite produces a similar signal to that of metal contamination by non-metallic inclusions. During tensile testing of the samples, only in one case did a sample rupture at the intended point (at the defect). However, the strength data obtained for this sample, as for all others, met the standard requirements.*

Keywords: *delamination, metal contamination by non-metallic inclusions, ultrasonic testing, sorbite-like pearlite, tensile testing.*

Введение. На сегодняшний день трубопроводные системы являются важной частью топливно-энергетического комплекса. Обширные сети трубопроводов, как за рубежом, так и внутри страны, поддерживают жизненно важные функции государств, а также являются одним из основных факторов экономического развития.

При изготовлении труб на заводах, в металле могут возникать дефекты: расслоения, закаты, плены, пористость, ликвационные зоны, газовые пузыри, загрязнённость неметаллическим включениями, образующиеся при кристаллизации металла [1–3].

Наибольшую опасность для газопроводов представляют такие дефекты как расслоения металла [4–8]. В настоящее время выделяют два типа расслоений: металлургические и водородные [9–14]. Из определения термина «расслоение» можно понять, что неметаллические включения являются первопричиной развития расслоений [15]. Неметаллические включения очень сильно влияют как на механические, так и на коррозионные свойства трубных сталей, в литературе большое внимание уделено исследованиям по влиянию химического состава, размерам, распределению включений и их морфологии

на механические свойства стали [16–23]. Неметаллические включения, особенно при длительной работе металла под нагрузкой, могут деформироваться с выкрашиванием и образованием пустоты. При этом может происходить зарождение коррозионных дефектов в местах вытравливания неметаллических включений [2].

Также в зонах расслоения нередко обнаруживаются раскатанные загрязнения, характерные для трубных кремнемарганцовистых сталей. Эти участки имеют большую химическую неоднородность, загрязнены примесями (оксиды, нитриды, сульфиды, силициды), то есть являются ликвационными зонами, отличающимися по значениям характеристик механических свойств от основного металла трубы [24, 25].

Помимо известных причин образования расслоений, связанных с неметаллическими включениями, ликвационными зонами металла в центральной части проката, а также с его наводораживанием, существует еще одна – выделение карбидной сетки по границам феррито-перлитной матрицы. Этот процесс приводит к охрупчиванию металла, что под действием сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) вызывает появление расслоений [26].

Как видно, расслоения не являются чисто технологическими дефектами производства. Статистические данные свидетельствуют о том, что условия эксплуатации являются фактором, отвечающим за образование и развитие указанных дефектов.

Внутритрубная диагностика (ВТД) не обнаруживает расслоения на газопроводах, за исключением случаев, когда они выходят на наружную или же на внутреннюю поверхность трубы [27, 28].

Опыт проведения диагностических работ на трубопроводах показывает, что конфигурация расслоений накладывает существенные ограничения на возможность их обнаружения различными методами неразрушающего контроля (НК). Так, наилучший результат демонстрирует ультразвуковой контроль, магнитные же методы проигрывают в этом достаточно сильно [29, 30].

Согласно литературным данным [31–33], применение ультразвуковых толщиномеров позволяют точно измерять время задержки ультразвуковых волн, отражающихся от границ включений. Это дает возможность не только определить наличие включений, но и оценить их размеры, что критически важно для оценки прочности материала. Также измерение затухания ультразвуковых сигналов позволяет оценить плотность неметаллических включений. Плотные включения будут вызывать большее затухание, что может быть использовано для классификации включений и их потенциального воздействия на эксплуатационные характеристики трубы.

Результаты ультразвуковой толщинометрии металла с внутренними несплошностями зависят от положения пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП), от длины УЗ волны и от размеров внутренних несплошностей. Авторами [34] было установлено, что при использовании ПЭП с рабочей частотой 5,0 МГц фиксируется в десятки раз больше точек контроля с внутренними несплошностями, чем при использовании датчика с рабочей частотой 2,5 МГц.

Анализ данных ультразвуковых измерений помогает в принятии обоснованных решений о ремонте или замене труб. Поэтому получение данных при помощи ультразвуковых исследований трубных сталей и их анализ с целью выявления дефектности материала является актуальным.

В связи с этим приоритетным встает вопрос оценки опасности дефектов (расслоение, неметаллические включения, ликвационные полосы): во-первых, чтобы обеспечить требуемую безопасность газопровода, а во-вторых, достигнуть этого при минимальных трудовых и материальных затратах.

Целью настоящей работы является выявление характера ультразвуковых сигналов от внутренних дефектов типа расслоение в трубной стали 10Г2ФБЮ.

Материалы и методы исследования. Настоящее исследование выполнено на образцах, отобранных из основного металла труб, бывших в эксплуатации (~ 40 лет), магистрального газопровода ∅1420х16,5 мм.

Спектральный анализ химического состава металла труб проводили на оптико-эмиссионном спектрометре ДФС-100Н. При проведении анализа было установлено, что исследуемые трубы выполнены из конструкционной низколегированной стали 10Г2ФБЮ, что соответствует ГОСТ 19281-2014. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемых труб

Химический состав, масс. %									
C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	S	P
0,09	0,3	1,66	0,26	0,027	0,025	0,14	0,02	0,005	0,02

В исследовании использовался универсальный ультразвуковой толщиномер УДТ-40 фирмы Kropus с прямым раздельно – совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем с рабочей частотой 5МГц. Ультразвуковой контроль проводился эхо-методом в режиме А-скана.

Для вырезки образцов использовали автоматический отрезной станок Полилаб Р100А с применением смазочно-охлаждающей жидкости.

Шлифовку и полировку образцов производили на ручном шлифовально-полировальном станке Полилаб П22Лб с применением шлифовальных кругов различной зернистости и финишной полировкой на тканных кругах с алмазной суспензией.

Травление образцов для выявления микроструктуры проводили 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Анализ макро- и микроструктуры выполнялся с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss AxioVert.

Сканирующая электронная микроскопия проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного энергодисперсионным детектором OXFORD X-Max 50. Ускоряющее напряжение основной СЭМ съемки составляло 20 кВ при силе зондирующего тока 12 нА.

Испытания образцов на растяжение проводили на разрывной машине РГМ-600-А-2. Образцы для испытаний изготавливали по ГОСТ 1497-2023 тип II, пропорциональный плоский без головок.

Результаты эксперимента и обсуждение. На рисунке 1а, 1б, 1в представлены спектры ультразвуковых сигналов (УЗ), полученные от бездефектного образца и образцов с разными типами дефектов. На основе проведенного анализа спектров УЗ, выделили три характерные картины сигналов. Для понимания какой сигнал соответствует той или иной структуре в исследуемых образцах использовали данные, полученные при помощи металлографических исследований. На рисунке 1г, 1д, 1е представлены микрофотографии полированных образцов до травления.

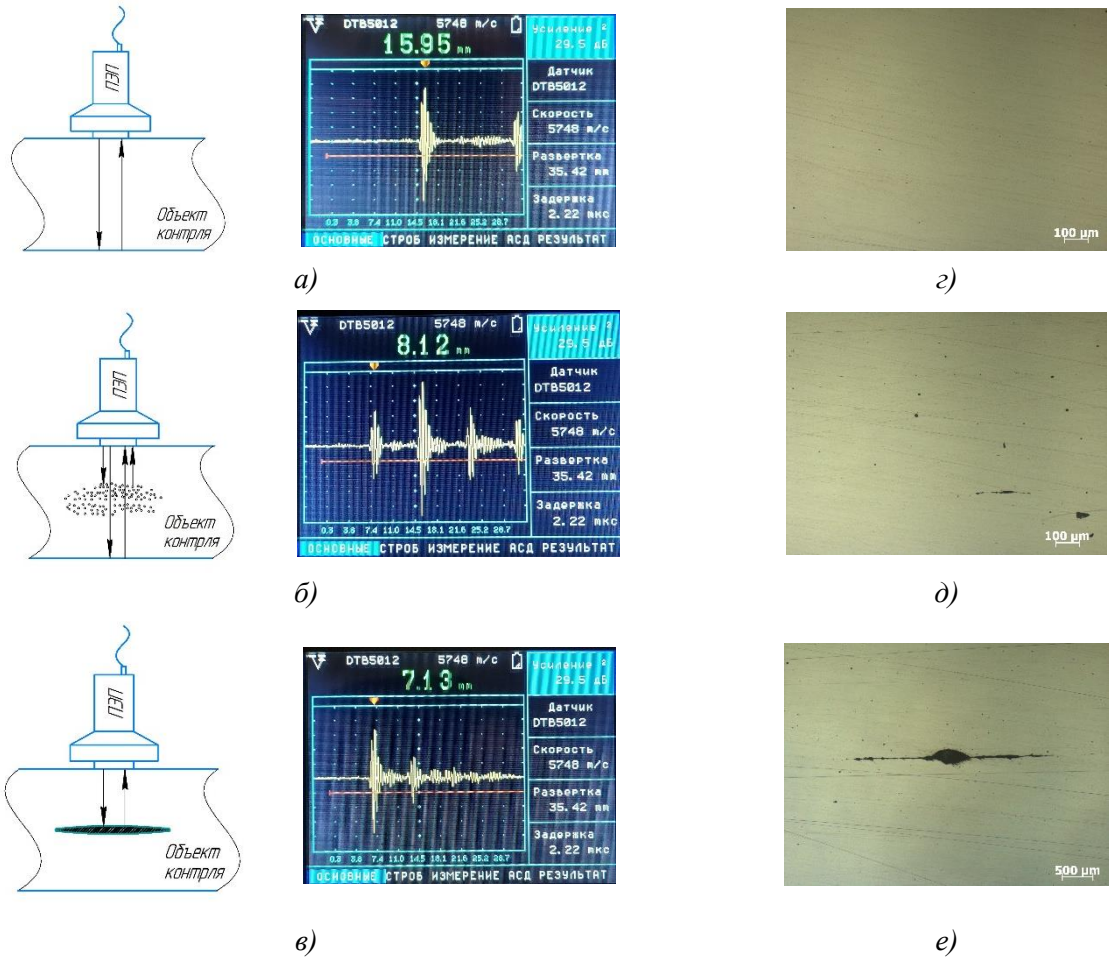


Рис. 1. Картины ультразвуковых сигналов в соответствии с микрофотографиями до травления

На рисунке 1*г* нет никаких особенностей, что характерно для бездефектного металл. На рисунке 1*д* видны точечные включения черного цвета, такая картина соответствует загрязненности металла неметаллическими включениями. На рисунке 1*е* наблюдается нарушение сплошности, воздушная полость – расслоение (рисунок 1*е*).

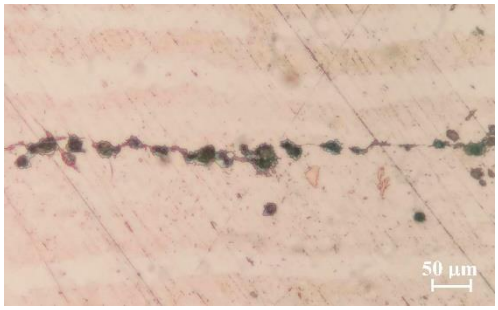
При сопоставлении металлографии с данными ультразвукового контроля можно выявить следующую корреляцию:

- на экране толщиномера от бездефектного металла видно донный сигнал, фактическая толщина трубы (рисунок 1*а*, 1*г*);
- от образца с загрязненностью металла неметаллическими включениями на экране толщиномера видно картину частичного отражения луча от дефекта и от дна (рисунок 1*б*, 1*д*);
- от образца с расслоением видно полное отражение ультразвукового сигнала от дефекта (рисунок 1*в*, 1*е*).

Можно сделать вывод о том, что картина частичного отражения луча от дефекта и от дна образца свидетельствует о большом загрязнении металла неметаллическими включениями.

Также в ходе исследования образцов с загрязненностью металла неметаллическими включениями, в некоторых случаях наблюдается объединение точечных неметаллических включений в строчку (рисунок 2).

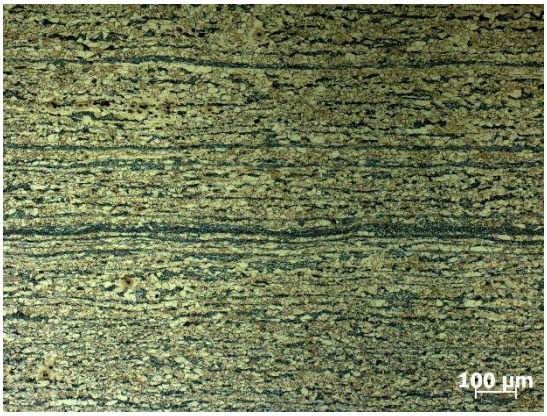
а



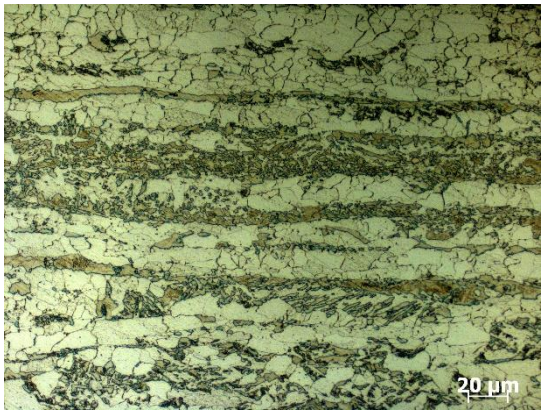
б

Рис. 2. Объединение точечных неметаллических включений в строчку

При металлографических исследованиях образцов труб с металлургическими дефектами выявлено еще одно характерное несоответствие структуры основного металла, которое при ультразвуковом контроле даёт похожий сигнал на дефект – загрязненность металла неметаллическими включениями. Так как структура стали 10Г2ФБЮ феррито-перлитная, то темная полоса на снимке представляет собой сорбитообразный перлит, имеющий строчечное распределение (рисунок 3*а*, 3*б*), которое и дает частичное отражение ультразвуковых волн при контроле.



а)



б)

Рис. 3. Структура образцов

Для понимания какие именно неметаллические включения наблюдаются при металлографических исследованиях, были использованы данные, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). При исследовании СЭМ образцов с неметаллическими включениями, было установлено что неметаллическими включениями являются оксиды (O – 4,22%, Si – 0,42%) (рисунок 4).

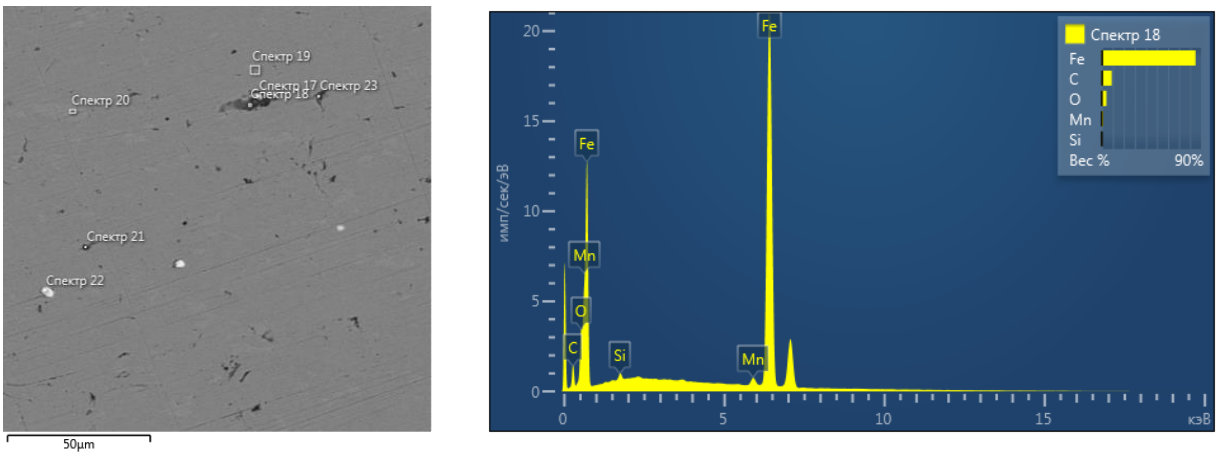


Рис. 4. Исследовании СЭМ образцов с неметаллическими включениями

В связи с тем, что трубы с найденными внутренними дефектами эксплуатируются в газотранспортных Обществах, необходимо понять влияют ли данные дефекты на прочностные свойства металла труб.

Для проведения испытаний на растяжение были отобраны образцы с дефектами: загрязненность металла неметаллическими включениями и строчечное распределение сорбитообразного перлита (рисунок 5*а*).

а *б*

Рис. 5. Образцы до испытаний *а)*, образцы после испытаний *б)*

Дефекты, найденные при помощи ультразвукового контроля, выделили маркером, чтобы установить будут ли они являться концентраторами напряжений.

Как видно из рисунка 5*б*, только в одном случае образец порвался по намеченной точке (по дефекту), но в тоже время полученные прочностные данные, как и у всех образцов соответствовали нормативным (таблица 2).

Таблица 2. Прочностные характеристики исследуемых образцов

Номер образца	Предел прочности, МПа	Соответствие ГОСТ 31447-2012
1	606±5	Соответствует
2	605±5	Соответствует
3	609±5	Соответствует
4	606±5	Соответствует
5	612±5	Соответствует
6	603±5	Соответствует

Заключение. Проведенные исследования позволили выделить три характерные картины сигналов при ультразвуковом контроле образцов стальных труб 10Г2ФБЮ, бывших в употреблении: от бездефектного металла – донный сигнал, фактическая толщина трубы; от образца с загрязненностью металла неметаллическими включениями – картина частичного отражения луча от дефекта и от дна; от образца с расслоением – изменение сигнала, полное отражение луча от дефекта. Картина частичного отражения луча от дефекта и от дна образца свидетельствует о большом загрязнении металла неметаллическими включениями.

Также в ходе исследования образцов с загрязненностью металла неметаллическими включениями, в некоторых случаях наблюдается объединение точечных неметаллических включений в строчку.

При ультразвуковом контроле, строчечное распределение сорбитообразного перлита имеет имеют похожий сигнал, такой же, как и загрязненность металла неметаллическими включениями.

При исследовании СЭМ образцов с неметаллическими включениями, было установлено что неметаллическими включениями являются оксиды (O – 4,22%, Si – 0,42%).

При испытании образцов на растяжении, с заранее отмеченными внутренними дефектами (загрязненность металла неметаллическими включениями и строчечное распределение сорбитообразного перлита), только в одном случае образец порвался по намеченной точке (по дефекту), но в тоже время полученные прочностные данные, как и у всех образцов соответствовали нормативным.

Таким образом, наличие только внутренних дефектов металла таких как, загрязненность металла неметаллическими включениями и строчечное распределение сорбитообразного перлита, редко являются главными причинами отказов. Анализ причин аварий с участием данных дефектов в очаговых зонах позволил установить, что должны присутствовать еще дополнительно другие дефекты, например, коррозия, трещины, коррозионное растрескивание под напряжением. В результате наличие такого комплекса дефектов повышает вероятность разрушения стали в трубопроводах.

Список литературы

1. Колотовский, А.Н. Работоспособность трубопроводов высокого давления при наличии внутренних расслоений металла / А.Н. Колотовский, А.Я. Яковлев, И.Н. Бирилло, Ю.А. Теплинский.- М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2009.-244 с.
2. Комаров, А.В. Методы микроанализа и классификация неметаллических включений в низколегированных сталях для нефтегазопроводов / А.В. Комаров, О.И. Предеин, Н.В. Князев, П.А. Колотовский // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.- 2009.- №8.- С. 26-32.
3. Одесский, П.Д. Сталь в строительных металлических конструкциях / П.Д. Одесский, И.И. Ведяков.- М.: Металлургиздат, 2018.- 905 с.
4. Велиюлин, И.И. Анализ причин разрушения газопроводных труб большого диаметра в различных регионах России / И.И. Велиюлин, С.А. Лубенский, Э.И. Велиюлин, А.Д. Решетников.- М.: МАКС Пресс, 2012.- 232 с.
5. Зорин, А.Е. Научно-методическое обеспечение системы поддержания длительно эксплуатируемых газопроводов: дис. … д-ра техн. наук: 25.00.19 / Зорин Александр Евгеньевич.– М., 2016.– 332 с.
6. Ботвина, Л.Р. Безопасность магистральных и технологических трубопроводов: влияние расслоений на их работоспособность / Л.Р. Ботвина, Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков // Нефть, газ и бизнес.- 2002.- №1.- С.41-46.
7. Конакова, М.А. Закономерности и особенности коррозионного растрескивания под напряжением труб магистральных газопроводов ООО «Севергазпром»: дис. … канд. техн. наук: 05.02.01 / Конакова Марина Анатольевна.- М., 2001.- 181 с.
8. Толстов, А.Э. Структурные особенности трубных сталей, склонных к расслоению в процессе эксплуатации / А.Э. Толстов, Е.Е. Зорин // Обслуживание и ремонт газонефтепроводов – 2014: Материалы 7-й международной конференции.– М.: МАКС Пресс, 2015.– 444 с.– С. 169-175.
9. Матросов, Ю.И. Сталь для магистральных трубопроводов / Ю.И. Матросов, Д.И. Литвиненко, С.А. Головоненко.- М.: Металлургия, 1989.- 289 с.
10. Трещева, М.С. Продление ресурса эксплуатации хранилищ жидкого амиака с расслоением обечайки, не выходящим на поверхность металла / М.С. Трещева, В.А. Платонов, С.В. Панченко, Ю.Н. Тюрин, С.В. Дьяконов // Химическая техника.- 2015.- №11.- С. 35-38.
11. Худяков, М.А. Роль неметаллических включений в расслоении трубных сталей / М.А. Худяков, М.М. Закирничная, М.Х. Муфтахов // Прикладная синергетика – II: Сб. науч. трудов.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004.- Т.2.- С. 156 – 158.
12. Himmer, T. Lamination of metal sheets / T. Himmer, T. Nakagawa, M. Anzai // Computers in Industry.- 1999.- Т. 39.- № 1.- P. 27-33.
13. Skrebtsov, A.M. Dendritic liquation in iron alloys as a function of the mass and physical properties of the secondary elements / A.M. Skrebtov, Y.D. Kuzmin, A.O. Sekachev, A.S. Kachikov, V.V. Terzi // Steel in Translation.- 2014.- T.44.- №9.- P. 652-655.

14. Sun, J. Effects of thermomechanical processing on anisotrophy of cleavage fracture stress in microalloyed linepipe steel / J. Sun, J.D. Boyd // International Journal of Pressure Vessels and Piping.- 2000.- T. 77.- № 7.- P. 369-377.
15. РД-01.120.00-КТН-228-06 Руководящий документ. Магистральный нефтепроводный транспорт. Термины и определения.- М.: ОАО «АК «Транснефть», 2006.- 69 с.
16. Дьяков В. И. Металлургия и свойства конструкционных сталей. – 2015. -Т1. – С.45-67.
17. Арутюнян Н.А. Влияние неметаллических включений и фазовых выделений на стойкость низкоуглеродистых микролегированных сталей к усталостному разрушению металлург/ Арутюнян Н.А., Колдаев А.В., Степанов А.Б., Дунаев С.Ф. // Металлург. – 2024. № 8. С.26-36.
18. Ковалев И. С. Современные методы анализа неметаллических включений в сталях / Материалы и технологии. – 2020. – Т5. -С.34-42.
19. Смирнов М. В. Неметаллические включения и их влияние на свойства сталей. -2017. -Т3. -С.112-130.
20. Федоров Ю. А. Металлургия черных металлов. -2019. -Т2. -С. 155-170.
21. Сидоров А. В. Влияние неметаллических включений на механические свойства низколегированных сталей. Сталь. -2021. -Т14. -С.45-52.
22. Кузнецов И. А. Анализ и контроль неметаллических включений в сталях. Металлургические исследования. -2019. -Т8. -С.60-70.
23. Лебедев Н. М. Физико-химические свойства неметаллических включений. -2020. -С.100-115.
24. Бельченко Г.И. Неметаллические включения и качество стали / Бельченко Г.И., Губенко С.И.// – К.: Техника. -1980. -С.168.
25. Виноград М.И. Включения в стали и ее свойства. – М.: Металлургиздат, -1963. -С.252.
26. Толстов, А.Э. Структурные особенности трубных сталей, склонных к расслоению в процессе эксплуатации / А.Э. Толстов, Е.Е. Зорин // Обслуживание и ремонт газонефтепроводов – 2014: Материалы 7-й международной конференции. – М.: МАКС Пресс, 2015.– 444 с.– С. 169-175.
27. Кушнаренко, В.М. Обеспечение безопасности трубопроводов при повышении количества дефектов / В.М. Кушнаренко, Ю.А. Чирков, А.В. Швец, А.А. Бауэр, Д.Н. Щепинов // Нефтепромысловое дело. – 2009.- №8.- С.62-64.
28. Кушнаренко, В.М Изменение дефектности металла трубопроводов при длительной эксплуатации / В.М. Кушнаренко, Ю.А. Чирков, А.В. Швец, Д.Н. Щепинов // Металловедение и термическая обработка металлов.- 2009.- №9.- С.7-10.
29. Krautkramer J., H. Krautkramer. Ultrasonic Testing of Materials. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. 1990. 677 p. (скачал файл: Ultrasonic Testing книга.pdf)
30. Бородин, Н. Особенности диагностики нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенки / Н. Бородин, Л. Афанасьева, Л. Хасанов, Р. Хайрулин, Р. Мухаметшин // ТехНадзор.- 2016.- №2(111).- С. 134-136.
31. McGowan J. D. W. Non-Destructive Testing of Steel Structures. -2010. -V2. -P. 200-220.
32. Chen C. H. Ultrasonic Techniques for Materials Characterization. -2015. -P. 75-95.
33. McLachlan D. A. Ultrasonic Testing of Materials. -2001. -P.120-150.
34. Бирилло, И.Н. Методика отбраковки труб с внутренним расслоением стенки на стадии эксплуатации объекта / И.Н. Бирилло, А.В. Комаров // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – №2(24). – С.12-15.

УДК 621.79
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-54-59

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НОЖА СРЕДНЕГО ОТВАЛА АВТОГРЕЙДЕРА

Максимова Е.М.[1,2], Слепцов Г.Н.[1], Слепцов О.И.[1], Ноев И.И.[1], Солдатов К.В.[1], Тарасов П.П.[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: maksimova_em85@mail.ru

Аннотация. *В работе выполнено исследование структуры и свойств изношенных ножей среднего отвала автогрейдеров тяжелой группы, эксплуатируемых в условиях Якутии. Раскрыты особенности изнашивания ножа среднего отвала, в условиях низких температур, проведен анализ эксплуатационных данных. Исследованы химический состав, структура и свойства ножей автогрейдеров двух разных производителей. Результаты исследований показали, что элементы рабочих органов тяжелой дорожно-строительной техники отличаются наличием мелкодисперсной игольчатой структурной составляющей, соответствующей проведенной термической обработке.*

Ключевые слова: *абразивный износ, дорожно-строительная техника, мерзлый грунт, наплавка, структура*

RESTORATION OF THE WORKING SURFACE OF THE MEDIUM MOLDBOARD BLADE OF A MOTOR GRADER

Maksimova E.M.[1,2], Sleptsov G.N.[1], Sleptsov O.I.1[1], Noev I.I.[1], Soldatov K.V.[1], Tarasov P.P.[1]
[1]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS
[2]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

Abstract. *This paper examines the structure and properties of worn mid-motor blades on heavy-duty motor graders operating in Yakutia. The wear characteristics of mid-motor blades at low temperatures are revealed, and operational data are analyzed. The chemical composition, structure, and properties of motor grader blades from two different manufacturers were analyzed. The results showed that the working parts of heavy road construction equipment are characterized by the presence of a finely dispersed, needle-like structural component, which undergoes appropriate heat treatment.*

Keywords: *abrasive wear, road transport equipment, frozen ground, surfacing, structure*

Республика Саха (Якутия), как самый большой субъект Российской Федерации сталкивается с серьезными вызовами: экстремальный климат и практически полное отсутствие круглогодичных дорог на большей части территории. Более 15 000 километров зимников ежегодно прокладываются по замерзшим рекам и снежным просторам, обеспечивающих связь отдалённых населённых пунктов с крупными логистическими центрами: Якутском, Нижним Бестяхом, Мирным, Ленском, Нерюнгри и Тикси.

Строительство и содержание зимников требуют значительных ресурсов дорожно-строительной техники, особенно автогрейдеров, применяемых для профилирования полотна и выравнивания дорожной поверхности. Эксплуатация дорожно-строительной техники в условиях Крайнего Севера и арктической зоны сопровождается повышенной интенсивностью износа рабочих органов, что обусловлено низкими температурами, абразивным воздействием мерзлого грунта и песчано-ледяных частиц, а также значительными динамическими нагрузками. Рабочая поверхность ножа среднего отвала автогрейдера подвергается ускоренному абразивно-ударному изнашиванию, что приводит к ухудшению качества планировочных работ, увеличению расхода топлива, снижению производительности и росту затрат на обслуживание.

Повышение износостойкости и продление срока службы рабочих органов дорожно-строительных машин является актуальной научно-технической задачей, направленной на повышение эффективности эксплуатации техники и снижение затрат на её обслуживание. Для восстановления изношенных деталей машин и аппаратов, а также для упрочнения и нанесения слоев на поверхность деталей с особыми свойствами в промышленности применяют различные способы [1, 2] (рис. 1).

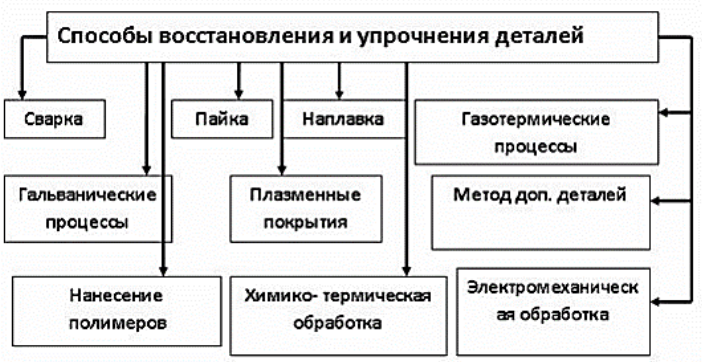


Рис. 1. Способы восстановления и упрочнения поверхностей деталей

В северных регионах замена изношенных деталей сопряжена с высокими материальными затратами и сложностями логистического обеспечения, что обуславливает необходимость восстановления сменных элементов рабочих органов автогрейдера методами наплавки, как наиболее рациональное и экономически целесообразное решение. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является развитие технологий восстановления изношенных конструктивных элементов. Основным преимуществом в этом процессе является применение современных наплавочных материалов, позволяющих восстанавливать геометрию и рабочие характеристики деталей с высокой точностью.

Кроме того, актуальность работы определяется современными экономическими и производственными условиями: уход с российского рынка импортных комплектующих и износостойких деталей для дорожно-строительной техники увеличивает необходимость разработки отечественных технологий восстановления. В этих условиях восстановление ножей автогрейдеров с использованием доступных отечественных материалов становится ключевым фактором повышения надёжности техники, снижения зависимости от импорта и оптимизации эксплуатационных затрат, особенно в суровых северных регионах.

Таким образом, разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий упрочнения рабочих конструктивных элементов дорожно-строительной техники, обеспечивающих повышение их износостойкости и долговечности в условиях низких температур, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит значительно продлить срок их службы, снизить эксплуатационные расходы и обеспечить устойчивую работу в северных и арктических климатических условиях.

Цель исследования – повышение ресурса ножа среднего отвала автогрейдера, эксплуатируемого в условиях Севера и Арктики путем разработки и выбора рациональных наплавочных материалов с определением оптимальных режимов наплавки, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик и износостойкости в условиях низких температур.

Этапы исследований для разработки технологии восстановления:

1. Анализ условия эксплуатации и характера износа ножей среднего отвала.
2. Изучить и оценить существующие технологии восстановления.
3. Определить рациональные наплавочные материалы и режимы наплавки.
4. Исследовать микроструктуру и свойства восстановленных слоёв.
5. Оценить технико-экономическую эффективность предложенной технологии.

Материалы и методика исследований. Основной рабочий орган автогрейдеров – средний отвал с режущими ножами, расположенный между передними и задними колесами при удлиненной базе (рис. 2). В работе проведено исследование структуры и свойств изношенных ножей среднего отвала автогрейдеров, относящихся к категории тяжелых машин.

а) *б)*

Рис. 2. Общий вид автогрейдер: Volvo G930 *а)*, UMG ДЗ-98В *б)*

Исследуемые детали:

1. Изношенный нож среднего отвала трехосного автогрейдера VOLVO G930 (вес – 15,6 т., производство – КНР). Нож состоит из двух сегментов размерами 1825x170x154x18 мм и 1825x152x82x18 мм (рис. 3, *а*, рис. 4).

2. Нож среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В (вес – 19,7 т., производство – Россия). Размер ножа 1260x160x20 мм (рис. 3, *б*).

а)

б)

Рис. 3. Общий вид фрагментов ножей среднего отвала автогрейдера: VOLVO G930 *а)*; UMG ДЗ-98В *б)*

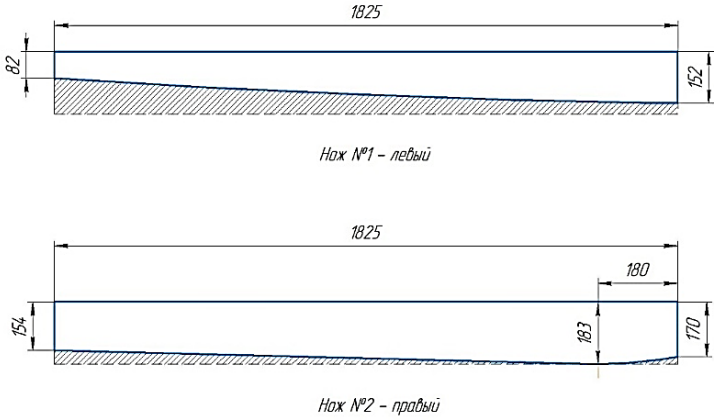


Рис. 4. Геометрические размеры и профиль износа изношенных ножей среднего отвала автогрейдера VOLVO G930

Определение химического состава материала ножей автогрейдера проведено с помощью оптико-эмиссионного спектрометра «CXR-980» в соответствии с ГОСТ 18895-97. Исследование структуры металла ножей автогрейдера выполнено на инвертированном металлографическом микроскопе «NIM-8» при увеличениях 200 и 1000 крат. Шлифы для металлографических исследований изготавливали по стандартной методике механическим способом. Микроструктуру образцов выявлена травлением 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Замер твердости проведен по методам Бринелля и Роквелла на приборе «Affri 206 RTD». Твердость измерена в трех точках по HRC и в шести – по HB. Измерение микротвердости проведено методом Виккерса на микротвердомере «LM 700» при нагрузке 10 гс и времени выдержки 20 сек.

Обсуждение результатов. Эксплуатация дорожно-строительной техники в Республике Саха (Якутия) в процессе планировки и содержания зимников осуществляется в исключительно суровых природно-климатических условиях:

– средняя продолжительность зимнего периода составляет 7–8 месяцев;
– температура воздуха может понижаться до –55 °С;
– промерзание грунта достигает глубины 2,5–3,0 м.
– основной тип покрытия зимних автодорог – уплотнённый снежно-ледовый или мерзлый грунт;
– ударно-абразивные нагрузки.

Такие условия работы существенно влияют на характер износа рабочих органов.

В процессе планировки и содержания зимников автогрейдер работает с высокой силой резания, при этом на режущую кромку ножа отвала действуют значительные ударные и абразивные нагрузки. Износ усиливается при работе по участкам с включениями каменистых пород и промороженного песчано-глинистого грунта. Процесс резания грунта средним отвалом автогрейдера выглядит следующим образом: в первую очередь, возникает контакт и вдавливание клина рабочего инструмента в грунт. Далее, при нарастании усилия резания происходит скол крупного куска грунта. В этот момент ранее тяжело нагруженный клин резко освобождается от нагрузки, но тут же ударяется о следующий массив грунта. Процесс можно охарактеризовать чередованием пиков ударной нагрузки с периодами статического нагружения.

Ножи автогрейдеров изнашиваются по режущей кромке и, в зависимости от абразивности перерабатываемых грунтов, срок их службы составляет период от 5 до 10 суток [3]. На интенсивность изнашивания ножа оказывают влияние следующие факторы: механические свойства грунта (твёрдость, влажность, степень промерзания); скорость и глубина резания, определяющие величину контактных усилий на кромке; температурный режим эксплуатации, влияющий на хрупкость металла; качество используемого материала ножа и состояние его упрочнённого слоя; состояние и настройка навесного оборудования автогрейдера, обеспечивающие равномерное распределение нагрузки. Ножи отвала относят к категории расходных материалов, средний срок службы в условиях работы Якутии составляет от 500 до 1000 моточасов [4].

Относительно короткий период использования рабочего органа напрямую связан с огромным увеличением силы резания при работе изношенными ножами. При продвижении в грунте, кроме сопротивления от движения своей передней части, изношенный нож преодолевает сопротивление площадки износа, имеющей небольшой отрицательный угол относительно основной траектории резания.

Нужно отметить, что износ ножей не равномерен. Имеет неравномерный износ по всей длине, показывающий характер его использования на среднем отвале автогрейдера под углом для выравнивания грунтовых и ледовых автодорог (рис. 2). Вблизи режущей кромки нож контактирует своей поверхностью с частицами грунта, которые ещё являются частью грунтового массива. Они действуют на нож как резцы, интенсивно изнашивая его кромку. По мере удаления от режущей кромки увеличиваются деформации и напряжения в грунте, частицы грунта становятся подвижными, теряя структурные связи между собой. Их перемещение по поверхности резца можно определить как перекатывание, что уменьшает абразивное воздействие на плоскость резца, однако давление на грунт возрастает [4].

Результаты спектрального анализа химического состава исследованных образцов и их аналогов [5] приведены в таблице 1. Металл ножа среднего отвала автогрейдера VOLVO G930 по химическому составу в целом соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 1050-2013 к сталям марок 20Г и 25Г, за исключением незначительного превышения содержания марганца. Металл ножа среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В соответствует сталям марок 50, 55 по ГОСТ 1050-2013.

Конструкционные низколегированные марганцовистые стали 20Г, 25Г с повышенной прочностью, применяется в различных отраслях промышленности, где требуется сочетание прочности, пластичности и износостойкости. Марганец играет ключевую роль в увеличении прочности стали без значительного ухудшения пластичности. Низкое содержание серы и фосфора делает сталь менее хрупкой и более устойчивой к образованию трещин. Незначительное содержание хрома, никеля и меди указывает, что сталь не подвергалась целенаправленному легированию, что характерно для обычных углеродистых конструкционных сталей.

Таблица 1. Химический состав материала ножей автогрейдера, мас. %

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu
Фрагмент ножа автогрейдера VOLVO G930							
0,24	**0.26**	***1.15***	***0.17***	***0.02***	***0.012***	***0.007***	**0.03**
20Г (ГОСТ 1050-2013)							
0,17-0,24	0,17-0,37	0,70-1,00	≤0,30	≤0,30	≤0,03	≤0,035	≤0,30
25Г (ГОСТ 1050-2013)							
0,22-0,30	0,17-0,37	0,70-1,00	≤0,30	≤0,30	≤0,03	≤0,035	≤0,30
Фрагмент ножа автогрейдера UMG ДЗ-98В							
0,52	**0.21**	**0.68**	**0.03**	**0.02**	**0.014**	**0.015**	**0.02**
50 (ГОСТ 1050-2013)							
0,47-0,55	0,17-0,37	0,50-0,80	≤0,25	≤0,30	≤0,03	≤0,035	≤0,30
55 (ГОСТ 1050-2013)							
0,52-0,60	0,17-0,37	0,50-0,80	≤0,25	≤0,30	≤0,03	≤0,035	≤0,30

Как известно, конструкционные углеродистые стали 50 (55) обладают повышенной прочностью и хорошей обрабатываемостью после термообработки.

На рисунках 5 и 6 представлена микроструктура исследуемых образцов. Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера VOLVO G930 представляет собой смесь игольчатых структур мартенситоподобного бейнита с характерной пластинчатой структурой и отпущенного реечного мартенсита. Тёмные участки соответствуют мартенситным иглам, образовавшимся при быстром охлаждении из аустенитного состояния, а светлые прослойки между ними – остаточному аустениту и участкам низкоотпущенного мартенсита. Средняя твердость – 47 HRC (491 HB) (табл. 2).

Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В представлена структурой отпущенного мартенсита, феррито-цементитной смесью и мелкими карбидами. Средняя твердость составляет 47 HRC (496 HB) (табл. 2).

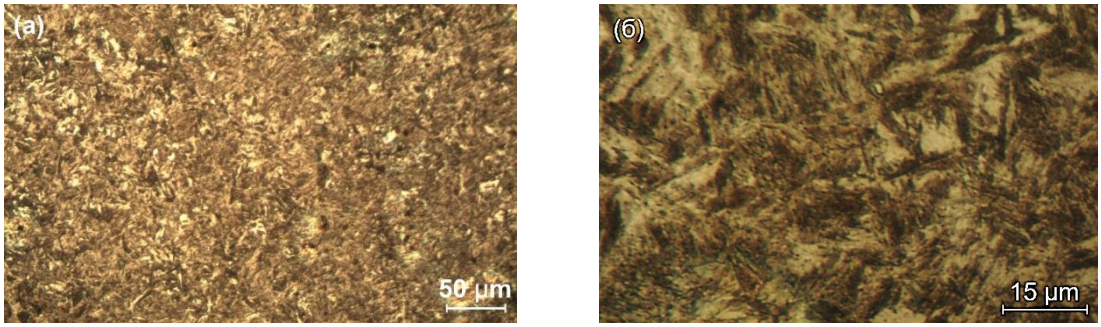


Рис. 5. Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера VOLVO G930, x200 *а)*; x1000 *б)*

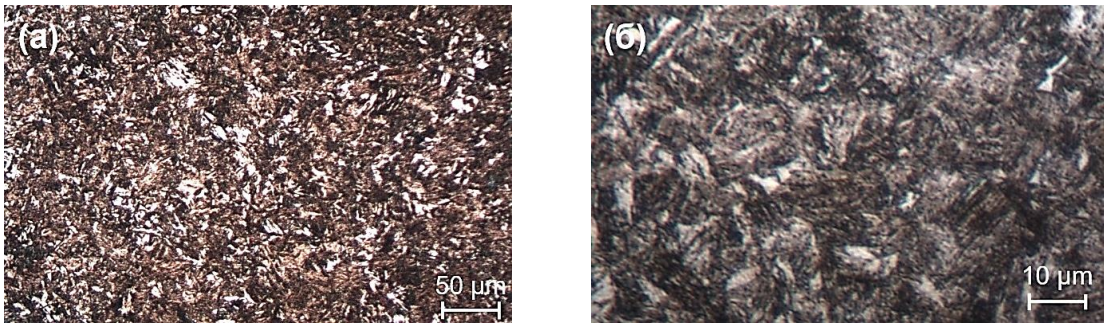


Рис. 6. Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В, x200 *а)*; x1000 *б)*

Таблица 2. Средние значения твердости исследуемых образцов

Образец	HRC	HB
нож среднего отвала автогрейдера VOLVO G930	47	491
нож среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В	47	496

Для измерения твердости отдельных структурных составляющих проведено измерение микротвердости (табл. 3). Каждую структурную составляющую измеряли не менее трех раз.

Таблица 3. Микротвердость участков с различными структурными составляющими

Образец	Структурная составляющая	Микротвердость $HV_{0,01/20}$	МПа	Средняя микротвердость $HV_{0,01/20}$	Средняя микротвердост, МПа
нож среднего отвала автогрейдера VOLVO G930	Светлая	373,0; 297,1; 365,7	3658; 2913; 3586	345	3386
	Темная	383,8; 367,8; 292,6	3764; 3607; 2869	348	3413
нож среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В	Светлая	354,7; 373,0; 375,1	3478; 3658; 3678	368	3605
	Темная	347,9; 277,8; 278,4	3412; 2724; 2730	301	2955

Как видно из таблицы 3, значения микротвердости структурных составляющих исследуемых сталей соответствуют твердости термически обработанной стали на игольчатую и мелкодисперную феррито-карбидную структуры.

Заключение. Проведено исследование структуры и свойств ножей среднего отвала автогрейдеров VOLVO G930 и UMG ДЗ-98В. Определен химический состав исследуемых образцов. Установлено, что российскими аналогами материала изношенного ножа среднего отвала автогрейдера VOLVO G930 могут являться стали марок 20Г и 25Г по ГОСТ 1050-2013 с незначительным превышением содержания марганца в исследуемой стали. Российскими аналогами ножа среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В являются стали марок 50 и 55 по ГОСТ 1050-2013.

Исследование микроструктуры и свойств образцов указывает о термической обработке исследуемых сталей. Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера VOLVO G930 представлена игольчатой структурой, включающей две основные морфологические составляющие – отпущенный реечный мартенсит и игольчатый бейнит при средней твердости 47 HRC (491 HB) и микротвердости HV 2870…3765 МПа. Микроструктура ножа среднего отвала автогрейдера UMG ДЗ-98В характеризуется отпущенным мартенситом и мелкодисперсной ферритно-карбидной смесью при средней твердости 47 HRC (496 HB) и микротвердости HV 2730…3680 МПа.

Полученные данные химического состава, структуры, измерения твердости и микротвердости, будут использованы для разработки оптимальных технологий наплавки при восстановлении геометрии элементов рабочих органов дорожно-строительной техники и для повышения их эксплуатационного ресурса.

Анализ условий эксплуатации ножей рабочих органов дорожно-строительной техники на территории Якутии подтверждает, существование острой необходимости создания оптимальных технологий восстановления изношенных ножей рабочих органов автогрейдеров, в связи со сложной логистикой доставки до нашего региона и дорогой себестоимостью этих деталей.

Список литературы

1. Ельцов В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин: электронное учеб. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015.
2. Бахвалов А.Н. и др. Восстановление и упрочнение деталей дорожно-строительных машин. – Екатеринбург: УрФУ, 2020.
3. Попов Д. А., Патюков С. С. Особенности условий эксплуатации рабочих органов строительно-дорожных машин и факторы, влияющие на их ресурс // Воронежский научно-технический вестник. 2015. № 1(11). С. 85-94. DOI: https://doi.org/10.12737/10908
4. Реновация режущей кромки ножа среднего отвала тяжелой дорожной техники, эксплуатирующийся в условиях Якутии / Г. Н. Слепцов, О. И. Слепцов, И. И. Ноев, К. В. Солдатов // Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. – С. 121-125. – DOI 10.24412/cl-37269-2024-1-121-125.
5. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. и др.; под общ. ред. Сорокина В.Г., – М.: Машиностроение. 1989. – 640 с. Колосков М.М., Долбенко Е.Т., Каширский Ю.В. и др.; Под общей ред. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / Справочное издание. – М.: Машиностроение. 2001. – 672 с.

УДК 621.791.794
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-60-64

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИЗ СТАЛИ 10ХСНД*

Михайлов А.Ю.[1,2], Сидоров М.М.[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
[2]Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: bilugurec@mail.ru

Аннотация. *Исследование посвящено актуальной проблеме управления остаточными сварочными напряжениями (ОСН) в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД. Экспериментально изучено влияние ультразвуковой ударной обработки (УУО) на перераспределение ОСН после сварки при комнатной и отрицательной температурах. Установлено, что после сварки в зоне шва формируются значительные растягивающие напряжения, уровень которых возрастает при низкотемпературной сварке. Показано, что УУО эффективно трансформирует растягивающие напряжения в сжимающие, что способствует повышению усталостной долговечности соединений.*

Ключевые слова: *сварные соединения, послесварочная обработка, низколегированная сталь, остаточные сварочные напряжения, ультразвуковая ударная обработка*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASONIC SHOCK TREATMENT ON RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS MADE OF 10XSD STEEL *

Mikhailov A.Yu.[1,2], Sidorov M.M.[1]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences – a separate subdivision of the Yakutsk Scientific Centre SB RAS
[2]North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

Abstract. *The study is devoted to the urgent problem of residual welding stress management in welded joints made of low-alloy steel 10XSD. The effect of ultrasonic shock treatment (UO) on the redistribution of HP after welding at room and subzero temperatures has been experimentally studied. It is established that after welding, significant tensile stresses are formed in the seam area, the level of which increases during low-temperature welding. It is shown that UO effectively transforms tensile stresses into compressive stresses, which contributes to an increase in the fatigue life of joints.*

Keywords: *welded joints, post-weld treatment, low-alloy steel, residual welding stresses, ultrasonic impact treatment*

Остаточные сварочные напряжения (ОСН), возникающие из-за неравномерного нагрева и охлаждения металла в процессе сварки, являются основным фактором, определяющим работоспособность металлоконструкций специального и ответственного назначения [1, 2]. Эти напряжения оказывают негативное влияние на низкотемпературную прочность и усталостную долговечность сварных соединений [3, 4].

Поскольку минимизировать ОСН с помощью предварительных или операционных методов удается не всегда, широкое применение находят методы послесварочной обработки. В мировой практике разработан целый ряд таких технологий, включая термическую, взрывную, вибрационную и дробеструйную обработку [5-8]. Среди них одним из эффективны и перспективных представляется ультразвуковой ударный метод, особенно для применения в сложных условиях Севера и Арктики.

В связи с этим исследования, направленные на определении эффективности ультразвуковой ударной обработки (УУО) для сварных конструкций, эксплуатирующихся при экстремально низких температурах, являются весьма актуальными. Это обусловлено тем фактом, что прочностные свойства сварных соединений из высокопрочных хладостойких сталей часто не соответствуют характеристикам основного металла, особенно при сварке на холоде.

Цель работ – Исследование влияния ультразвуковой ударной обработки на характер распределения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД, выполненных при различных температурных условиях.

Для сварки использовали источник постоянного тока «НЕОН-315» (обратная полярность, нижнее положение) и стальные пластины из стали 10ХСНД-3 размером 14×170×350 мм (рис. 1). Рабочая длина сварного соединения составила 345 мм. Подготовку кромок выполняли по ГОСТ 5264-80 (тип С17: V-образная разделка без подкладки). Применялись электроды «WN 62U» (старая маркировка «УОНИ-13/мороз»), предварительно прокаленные при 380 °С в течение 1 ч. Для предотвращения деформаций пластины фиксировали в кондукторе.

Сварку выполняли в 5 проходов без принудительного охлаждения между ними при комнатной и отрицательной температуре окружающего воздуха. В процессе сварки выполняли остановки для зачистки шва от шлака, брызг металла и других загрязнений.

УУО проводили с применением технологического комплекса, включающего плавно регулируемый ультразвуковой генератор УЗГТ-0.5/27 и технологическую оснастку типа «Шмель» в виде ударного инструмента, оснащенного соединительным кабелем и шлангами системы охлаждения. Обработку осуществляли со стороны лицевого слоя шва двумя способами:

– Сразу после сварки (температура металла 160-230 ºС);

– После полного остывания соединения через сутки.

Ширина зоны воздействия составляла 40 мм. Инструмент перемещали вручную по трём зонам термического влияния (ЗТВ). Режимы УУО приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры режима УУО

	Частота колебаний, кГц	Амплитуда торца волновода, мкм	Мощность, Вт	Скорость перемещения, м/мин
1 зона	26	20	340	0,5
2 зона	26	20	420	0,5
3 зона	26	20	500	0,5

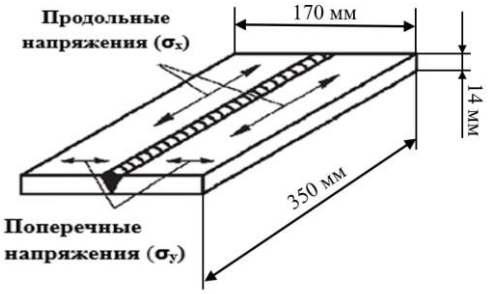


Рис. 1. Направление поперечного и продольного напряжения в пластине

ОСН до и после УУО определяли рентгеновским методом с помощью портативного определителя напряжения, основанного на измерении межплоскостных расстояний в кристаллической решетке. Измеряли поперечные (σ_y) и продольные (σ_x) напряжения (рис. 1). Подробное описание методики приведено в работах [9–10].

На рис. 2 представлены распределения продольных и поперечных остаточных напряжений (ОН) в сварных соединения, выполненных сваркой при отрицательной и комнатной температурах.

Экспериментальные исследования показали, что в сварных соединениях из низколегированной стали 10ХСНД после сварки, формируются значительные растягивающие остаточные напряжения. При комнатной температуре поперечные напряжения достигают 60 МПа, продольные – 148 МПа. Существенное увеличение уровня ОСН наблюдалось при сварке в условиях отрицательных температур: поперечные напряжения возрастали до 160 МПа, а продольные – до 197 МПа, что демонстрирует выраженную зависимость уровня ОСН от температурных условий проведения сварки (рис. 2).

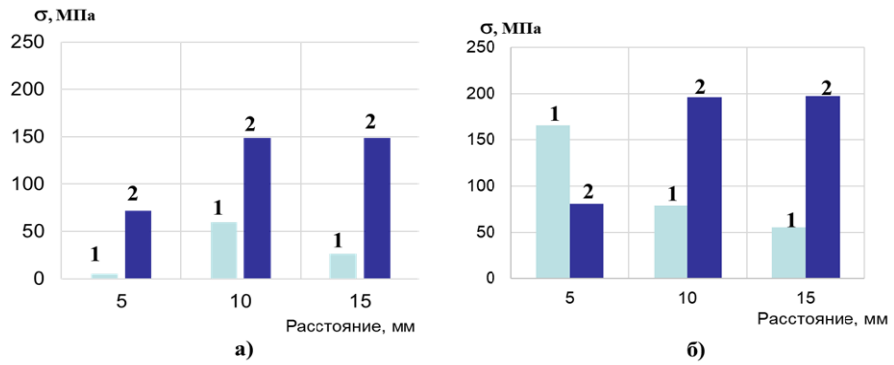


Рис. 2. Распределение ОСН в сварных соединениях пластин из стали 10ХСНД, выполненных сваркой при комнатной +20 °С *а)* и отрицательной температуре -35 °С
б): *1*. Поперечные напряжения, *2*. Продольные напряжения

Применение УУО позволило достичь существенного перераспределения ОСН в сварных соединениях. Во всех исследованных режимах наблюдалось трансформация растягивающих остаточных напряжений в сжимающие. Наиболее эффективная обработка достигалась при мощности 500 Вт, когда в околошовной зоне максимальные значения сжимающих ОН: $\sigma_y = -$ 290 МПа, $\sigma_x = -235$ МПа. На рис. 3–4 видно, как растягивающие напряжения сменяются сжимающими.

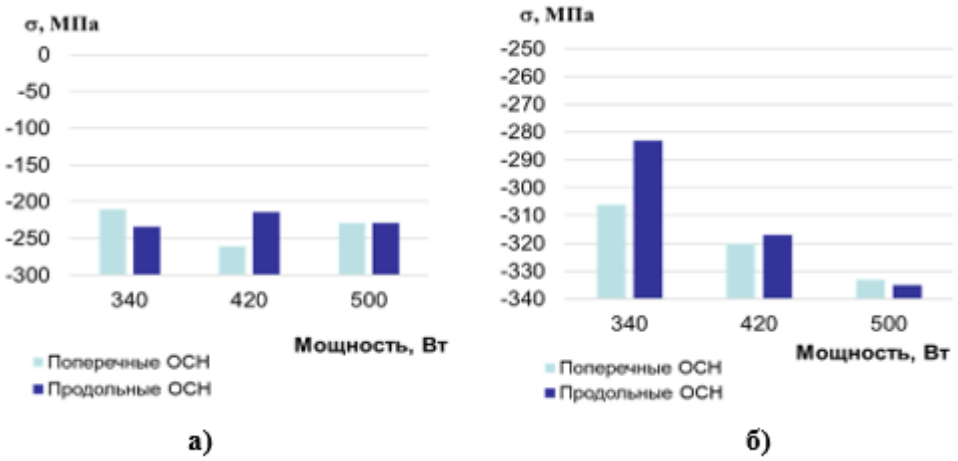


Рис. 3. Перераспределение ОСН в сварном соединении пластины из стали 10ХСНД, выполненной сваркой при комнатной температуре и разных способах УУО: *а)* В горячем состоянии;
б) После полного остывания.

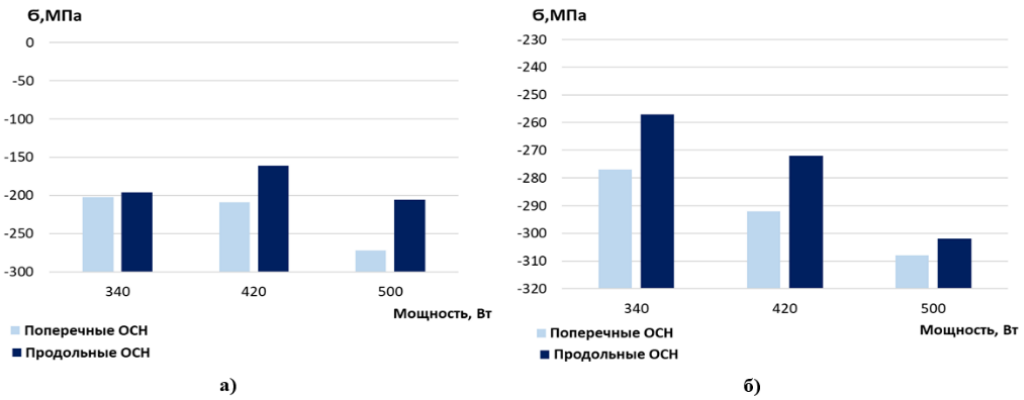


Рис. 4. Перераспределение ОСН в сварном соединении пластины из стали 10ХСНД, выполненной сваркой при низкой климатической температуре (-35 °С) и разных способах УУО:
а) В горячем состоянии; *б)* После полного остывания.

Сравнительный анализ двух способов обработки – непосредственно после сварки («в горячем состоянии») и после полного остывания соединения – выявил существенную разницу в их эффективности.

Наибольшая степень упрочнения и максимальные значения сжимающих остаточных напряжений были получены после УУО, проведенной на полностью остывшем металле. В этом режиме в поверхностном слое околошовной зоны были достигнуты следующие значения:

– продольные сжимающие напряжения составили –283… –337 МПа, а поперечные – – 306… –333 МПа при комнатных условиях.

– продольные сжимающие напряжения составили –257… –302 МПа, а поперечные – – 277… –308 МПа при низких климатических температурах.

Эти показатели в среднем на 15–20 % выше, чем при обработке «в горячем состоянии».

В целом установлено, что УУО демонстрирует стабильную эффективность как при обработке непосредственно после сварки (температура металла 160–230 °С), так и после полного остывания соединения. Это подтверждает перспективность применения технологии в различных производственных условиях, включая монтажные и ремонтные работы в полевых условиях.

Полученные результаты стали закономерным продолжением предыдущих исследований [10–13], в ходе которых был накоплен значительный опыт в области послесварочной обработки сварных соединений трубных сталей, разработаны оригинальные методики и апробированы различные технологические режимы.

Данное направление работ является стратегическим для нашего коллектива и развивается на протяжении многих лет в рамках научной программы Института [14]. Особую значимость этим исследованиям придает тот факт, что они ведутся в год 55-летнего юбилея Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, продолжая и развивая лучшие научные традиции института, заложенные предыдущими поколениями исследователей.

Заключение. Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность ультразвуковой ударной обработки для управления остаточными напряжениями в сварных соединениях из низколегированных сталей. Экспериментально установлено, что УУО позволяет не только снизить уровень растягивающих напряжений, но и целенаправленно создавать благоприятные сжимающие напряжения в поверхностном слое, что может существенно повысить усталостную долговечность сварных конструкций.

Практическим результатом работы является установление рационального режима и способа применения УУО: обработка после полного остывания соединения обеспечивает формирование стабильного поля сжимающих напряжений с максимальными значениями, достигающими –250... –330 МПа.

Проведённая работа представляет собой существенный вклад в развитие научной школы института в области обеспечения долговечности и надёжности сварных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных климатических условиях Севера и Арктики. Результаты исследований имеют важное прикладное значение и могут быть использованы для совершенствования технологий строительства и ремонта магистральных трубопроводов и других критически важных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по государственному заданию СО РАН, шифр проекта FWRS-2024-0034, регистрационный № НИОКТР 124032600078-1.

Авторы выражают благодарность своей группе из отдела технологий сварки и металлургии за помощь в подготовке сварных проб и эксперимента.

Список литературы

1. Ситников В.А., Баранов А.С. Влияние остаточных сварочных напряжений на усталостную прочность металла // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 1(109). С. 141-147.
2. Кравчук В.А. Остаточные сварочные напряжения и деформации при изготовлении металлических конструкций // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. № 1-1. С. 114-119.
3. Голиков Н.И. Влияние остаточных напряжений на работоспособность сварных соединений конструкций, эксплуатирующихся в условиях холодного климата // EURASTRENCOLD-2023 : Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, Якутск, 11–15 сентября 2023 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2023. С. 167-171.
4. Леонов В.П., Мизецкий А.В. Влияние локальных остаточных сварочных напряжений на начальную стадию развития трещин в сварных соединениях // Вопросы материаловедения. 2008. № 4(56). С. 54-65.
5. Пандыа Н.М., Калыанкар В.Д., Наик Х.В. Влияние послесварочной термической обработки на ударную вязкость сварного соединения из стали P91 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 5(791). С. 40-50.
6. Емельянов Р.Т., Турышева Е.С., Шеденко О.И., Кутергина Д.А. Вибрационная обработка сварных конструкций // Вестник КрасГАУ. 2014. № 4(91). С. 239-241.

7. Сидоров М.М., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Слепцов О.И. Развитие технологических способов послесварочной обработки сварных соединений конструкций Севера и Арктики // EURASTRENCOLD-2023 : Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, Якутск, 11–15 сентября 2023 года. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2023. С. 548-552.
8. Вайнерман А.Е., Беляев Н.В. Исследование влияния поверхностного упрочнения методом дробеструйной обработки сварных соединений на работоспособность гребных винтов из алюминиевых бронз // Вопросы материаловедения. 2002. № 4(32). С. 42-45.
9. Сидоров М.М., Голиков Н.И., Тихонов Р.П. Определение напряженно-деформированного состояния магистральных газопроводов, проложенных в зоне вечной мерзлоты // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 12(270). С. 58-63. DOI 10.14489/td.2020.12.pp.058-063.
10. Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на механические свойства и перераспределение остаточных напряжений сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сидоров Михаил Михайлович. Якутск, 2014. 132 с.
11. Сидоров М.М. Снижение уровня остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях труб из низколегированной стали ударно-механической обработкой // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем : материалы и доклады, Красноярск, 16–20 октября 2023 года. Красноярск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий», 2023. С. 167-171. DOI 10.25743/SSTS.2023.43.92.041.
12. Сидоров М.М., Голиков Н.И. Ультразвуковой технологический комплекс для упрочнения поверхностного слоя сварных соединений металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Сибири и Крайнего Севера // Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики : Труды Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию профессора-механика, д.т.н. А.В. Лыглаева, Якутск, 29–30 сентября 2016 года / Утверждено к печати НТС СВФУ им. М.К. Аммосова и Ученым советом ИФТПС СО РАН. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2016. С. 338-342.
13. Сидоров М.М., Голиков Н.И. Воздействие ультразвуковой ударной обработки на перераспределение остаточных напряжений в кольцевом стыке разнотолщинных труб // Сварка в России – 2019: современное состояние и перспективы : тезисы докладов Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Б.Е. Патона, Томск, 03–07 сентября 2019 года / Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. Томск: Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2019. С. 248-249.
14. Научно-технические семинары по проблемам надежности сварных конструкций, эксплуатирующихся в сложно-климатических условиях Севера и Арктики, проводимые на базе ИФТПС СО РАН / Н.И. Голиков, О.И. Слепцов, В.В. Лепов, М.М. Сидоров // Современные технологии, материалы и оборудование для сварочно-монтажных и ремонтных работ в условиях низких климатических температур Севера и Сварка и контроль качества сварных соединений : Сборник материалов Круглого стола «Современные технологии, материалы и оборудование для сварочно-монтажных и ремонтных работ в условиях низких климатических температур Севера» и IV научно-технического семинара «Сварка и контроль качества сварных соединений», посвященного 85-летию выдающегося ученого, д.т.н., проф. А.П. Аммосова, Якутск, 14–18 марта 2022 года / ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН. Якутск: ООО «Компания Дани-Алмас», 2022. С. 5-10.

УДК 622.692.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-65-69

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБНОЙ СТАЛИ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ЭКПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Москвитина Л.В. [1], *Слепцов Г.Н.* [1], *Аммосов Г.С.* [1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: Horo48@yandex.ru

Аннотация. *В данной работе проведено исследование влияния структурного состояния металла ЗТВ трубной стали 09Г2С после сварки и термообработки на деформационные процессы при эксплуатации подземного газопровода под воздействием сезонных деформаций грунтов в условиях криолитозоны. Рассмотрены влияние перестройки структуры металла ЗТВ от послесварочной термообработки на прочностные характеристики и микромеханизмы разрушения. Процессы деформации и разрушения при трехточечном изгибе фиксировались акустической эмиссией.*

Ключевые слова: *сварка, термообработка, структура, микромеханизмы разрушения, акустическая эмиссия, статический изгиб.*

INFLUENCE OF THE STRUCTURAL STATE OF THE METAL OF RING WELDING SEAMS OF PIPELINE STEEL ON DEFORMATION PROCESSES AND FRACTURED DEGRADATION DURING OPERATION OF UNDERGROUND GAS PIPELINES

Moskvitina L.V.[1], *Sleptsov G.N.*[1], *Ammosov G.S.*[1]
[1]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Abstract. *In this work, the influence of the structural state of the ZTV metal of 09G2S pipe steel after welding and heat treatment on the deformation processes during the delayed destruction of an above-ground pipeline under the influence of seasonal soil deformations in the permafrost zone was studied. The influence of the restructuring of the ZTV metal structure from post-welding heat treatment on the strength and ductility characteristics was examined. The deformation and fracture processes during three-point bending were recorded using acoustic emission.*

Keywords: *welding, heat treatment, strength, plasticity, acoustic emission, delayed failure*.

Введение. Большую потенциальную опасность с точки зрения технологических аварий представляет собой эксплуатация подводного газопровода через р. Лена «Павловск-Хатассы». Многолетний мониторинг подземного газопровода показал, что имеются участки, где подземный трубопровод проложенный в вечномерзлом грунте дважды в год деформируется разным образом. Наибольшие деформации трубопровода наблюдаются на склоне возле уреза воды, где труба проложена на границе вечномерзлых пород с таликовой зоной дна Табагинской протоки [1, 2]. В этих условиях ремонтная сварка труб представляет технологическую сложность. Многими исследователями установлено наводораживание металла труб газопровода в течение эксплуатации. В этих условиях наиболее уязвимым участком сварного соединения является металл зоны перегрева, или так называемая зона крупного зерна, в котором из-за действия водорода могут появиться холодные трещины [3]. Поэтому нужна технология, регулирующая размер зерна аустенита, так и строение границ исходного аустенита. При сварке трубопровода толщиной стенки больше 6 мм, а также в поворотных соединениях по РД 153-34.1-003-01 рекомендуется послесварочный отпуск.

Анализ наиболее распространенных причин отказов на газопроводе «Мастах-Берге-Якутск» показал, что более 30% отказов приходится на сварные кольцевые швы, с образованием сквозной трещины – свища. Изучение причин образования свищей показывает, что основными очагами разрушений служат дефекты сварки корневого шва (непровары, поры, шлаки и т. д.) [4].

Актуально исследование эффективности традиционного послесварочного отпуска для ремонтной сварки кольцевых швов трубопровода, испытывающего сезонные деформации в условиях криолитозоны.

Целью работы является исследование влияния структурного состояния металла ЗТВ трубной стали 09Г2С после сварки и термообработки на деформационные процессы при статическом изгибе, изменения прочности, пластичности и механизмов разрушения с фиксацией акустической эмиссии.

Материалы и методика исследования. Для исследования в качестве модели выбрана трубная сталь 09Г2С. Химический состав стали представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав испытуемой стали

Наименование показателя, %	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	V
№ 1	0,10	0,25	1,72	0,03	0,03	0,01	0,01	0,05	0,06
09Г2С ГОСТ 19281-2014	≤0,12	0,17-0,37	1,40-1,80	≤0,30	≤0,30	≤0,03	≤0,04	≤0,30	≤0,12

Однослойная сварка выполнялась на пластинах 200×150 мм толщиной 10 мм. После сварки образцы охлаждались на воздухе. Для испытаний вырезаны образцы ориентированные перпендикулярно сварному соединению.

Размеры и схема нагружения соответствует ГОСТу 25.506-85С.3 1985 (рис. 1).

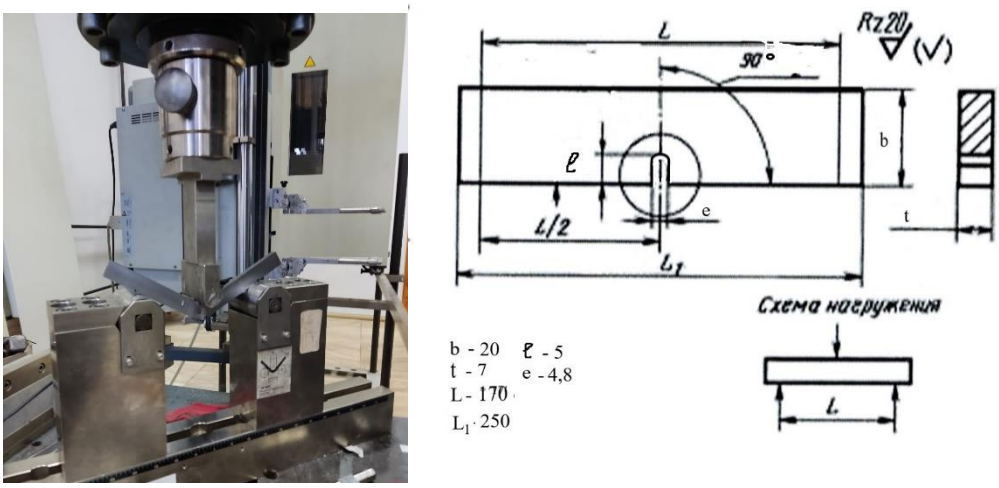


Рис. 1. Схема образца на трехточечный изгиб по ГОСТ 25.506-85С.3. 1985.
Тип 4. Скорость нагружения 15 мм/мин

Закругленный надрез по зоне ЗТВ имитирует коррозионный дефект, который может возникнуть в агрессивной среде при нарушении защитной оболочки при деформации трубы.

Проведена термообработка образцов сварного соединения в муфельной печи Nabertherm по РД 153-34.1-003-01 при температуре 590°С с охлаждением на воздухе при температуре среды 21 °С.

В ходе работы образцы после сварки и образцы, имитировавшие послесварочный отпуск, испытывались на трехточечный изгиб на испытательной машине «Zwick Z600E». Была произведена регистрация сигналов акустической эмиссии при помощи диагностического комплекса «Эксперт-2014», с записью как амплитудных, так и энергетических характеристик сигналов акустической эмиссии.

Количество датчиков АЭ – 1 шт.; диапазон измеряемых частот датчика АЭ – 100–300 кГц; уровень дискриминации (порог) – 50, дБ. Объект: сварной шов на пластине размерами 250×20×7 мм; параметры и условия нагрузки: 15 мм/мин, корнем наружу.

Результаты исследования и обсуждение. При данных условиях сварки металл ЗТВ стали 09Г2С формируется в феррит-перлитной области.

Дефект в зоне ЗТВ сварного соединения является концентратором напряжений, что приводит к образованию локальных типов напряжений и образовании трещины. Затем следует стадия распространения стабильной трещины до критического размера. Завершающая стадия – долом. Результаты испытаний приведены в таблицах 2, 3 и на рисунке 2.

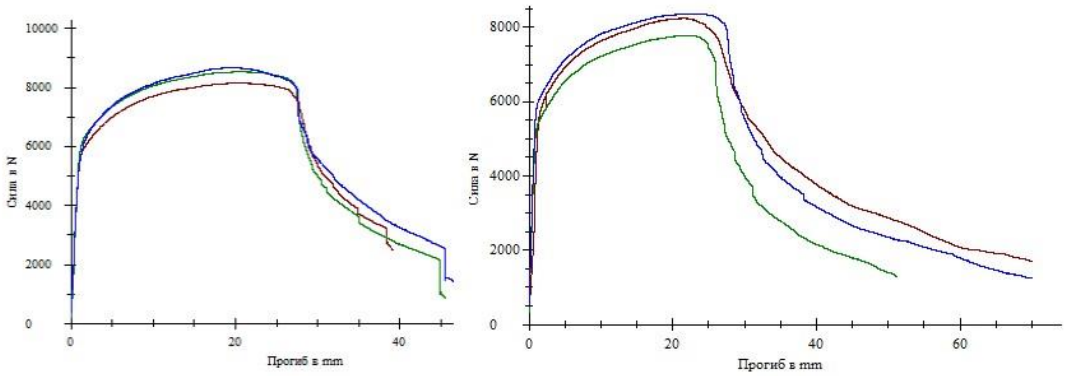
Таблица 2. Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов сварного соединения из стали 09Г2С

Номера образцов*	Толщина обр.	Ширина обр.	Высота обр.	Fmax	Прогиб max
Nr	mm	mm	mm	N	mm
1	7,73	19,62	17,98	8145,05	20,80
2	7,73	19,62	18,11	8533,88	20,51
3	7,73	19,62	17,93	8674,63	19,59
4	7,09	20,32	19,77	8240,55	21,54
5	7,21	19,25	19,24	7779,42	22,24
6	7,21	20,00	19,59	8371,55	23,23

*1, 2, 3 – образцы, испытанные после сварки; 4, 5, 6 – образцы после сварки и термообработки.

Таблица 3. Механические свойства при изгибе ЗТВ сварного соединения трубной стали 09Г2С

Номера образцов	1	2	3	Средние значения	4	5	6	Средние значения
σ_c МПа	11,12	11,56	11,87	11,54	11,15	10,64	11,24	11,01
I_cМПа	24,86	89,41	85,0	66,42	44,74	42,58	44,47	43,93



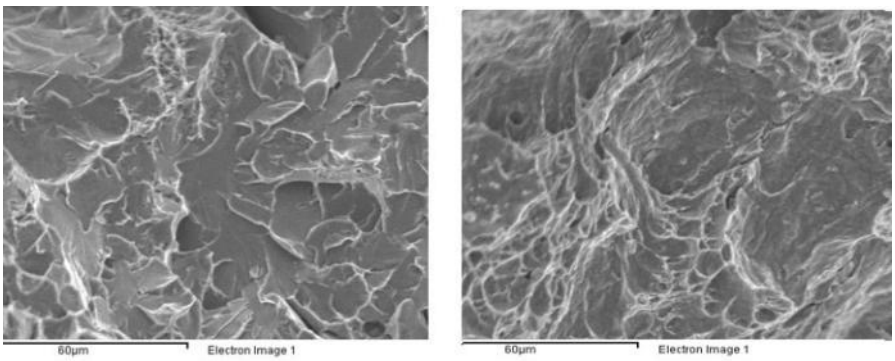
а) б)

Рис. 2. Диаграммы испытания образцов на трехточечный изгиб: *а*) – после сварки; *б)* – после сварки и термообработки.

Предел трещиностойкости – I_c образцов после сварки за счет прочностных свойств металла зоны перегрева выше, чем у образцов с термообработкой. Номинальные разрушающие напряжения σ_C для обоих типов образцов близки по показателям (табл. 2).

За критерий сопротивления образцов до и после термообработки принимали падение работы вязкости разрушения, которая показана на диаграммах испытаний (рис. 2).

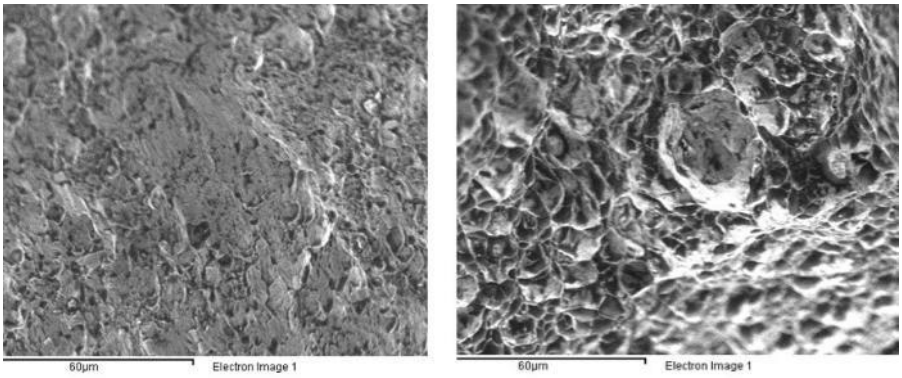
Фрактографическое исследование испытанных образцов показывает зависимость разрушения и деформации от структурного состояния металла ЗТВ. Металл зоны перегрева образцов после сварки разрушается транскристаллитными сколами. Наблюдается разориентировка фасеток, что указывает о ротационном скольжении в начальной стадии деформации образца. По границам фасеток появляются микротрещины (рис. 3, *а*). Вязкое разрушение начинается по зоне частичной перекристаллизации. Излом вязкого разрушения содержит фасетки квазискола. На поверхности квазисколов наблюдаются включения карбидов (рис. 3, *б*). Появление квазисколов, по всей вероятности, вызвано микронапряжениями крупных карбидных включений. Микротрещины, начинающиеся от зоны перегрева и квазисколы в вязком изломе, способствовали достаточно быстрому продвижению трещины до окончательного разрушения образца.



а) *б)*

Рис. 3. Поверхность разрушения образца после сварки: *а*) – излом по зоне перегрева; б) – вязкий излом в зоне частичной перекристаллизации.

В зоне перегрева термообработанных образцов не наблюдаются транскристаллитные фасетки. Излом по зоне перегрева состоит из удлиненных сдвиговых плоских ямок и рассредоточенных мелких плоских ямок. На дне ямок наблюдаются мелкие карбиды (рис. 4, *а*). В пластической зоне, где ранее наблюдались зоны частичной перекристаллизации, нормализации и старения, вязкий излом формируется чашечками, образованными вокруг мелких карбидных включений (рис. 4, *б*). Отмечается небольшое количество глубоких ямок-конусов. Разрушение образца происходит образованием зон вытяжки с мелкими чашечками, которые при увеличении прогиба выше 40 мм превращаются в высокие гребни, разделенные вторичными трещинами. Возле долома разрушение происходит слиянием мелких пор в крупные плоские чашки.

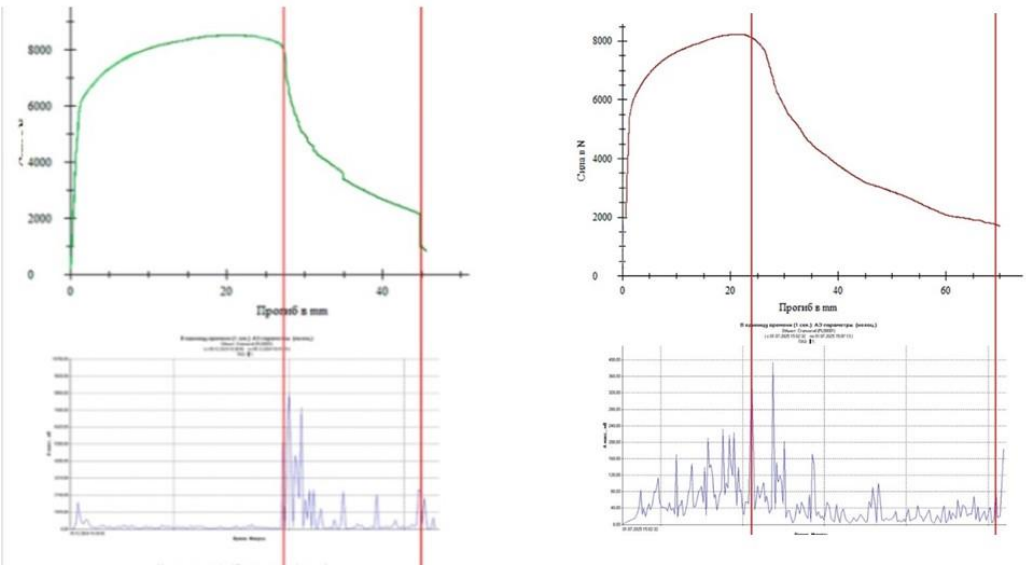


а) *б)*

Рис. 4. Поверхность разрушения образцов после сварки и термообработки: *а*) – излом по зоне перегрева; *б*) – вязкий излом по зоне частичной перекристаллизации.

Известно, что в процессе отпуска при 500°С в низкоуглеродистых низколегированных сталях активно протекают процессы полигонизации, первичной рекриссталлизации и дальнейшего распада твердого раствора с выделением карбидных частиц сферической формы преимущественно на границах и субграницах. После отпуска при 500°С формируется структура дисперсного сорбита [4]. В работе [5] показано, что появление структуры дисперсного сорбита отпуска приводит к полному исчезновению признаков квазихрупкого разрушения. При этом доминирующим механизмом является образование и слияние микропор и небольшого количества ямок-конусов.

При испытании образцов после сварки акустические пики появились в упруго-пластической ветви диаграммы. Можно предположить, что это фиксация появления зернограничных микротрещин в металле зоны перегрева. Следующие пики зафиксированы в ниспадающей ветви диаграммы, показывающей образование гребней отрыва с заложением крупных вторичных трещин (рис. 5, *а*).



а) *б)*

Рис. 5. Графики акустических сигналов образцов после сварки и термообработки:
а) – после сварки; *б*) – после сварки и термообработки.

Как видно, из сопоставленных графиков параметров АЭ и диаграммы испытания статического изгиба сварных образцов, диаграммы термообработанных сварных образцов показывают большую активность и значительное повышение значений максимальной амплитуды АЭ-сигналов, чем у не термобработанных образцов, что говорит о большой энергоемкости процесса деформации и разрушения образцов, соответственно о повышении прочности сварного соединения.

Выводы. Проведенные испытания на трехточечный изгиб имитирующие сезонные деформации в условиях криолитозоны показали, что металл зоны перегрева склонен к хрупким разрушениям, образованию микротрещин. Показано, что структура металла ЗТВ в пластичной зоне образует изломы с преобладанием квазисколов, способствующих быстрому развитию разрушения кольцевого сварного соединения.

Термообработка по РД 153-34.1-003-01 с образованием структуры дисперсного сорбита повышает энергоемкость вязкого разрушения, несколько увеличивается работа вязкости разрушения. С другой стороны, снижение твердости металла ЗТВ способствует интенсивному образованию гребней отрыва, что недостаточно повышает трещиностойкость сварного соединения. Для ответственных участков трубопровода необходимо применять ЛТМО, обеспечивающий высокую прочность и пластичность.

Акустический метод контроля трубопровода может фиксировать образование микротрещин и деформационные процессы подземного трубопровода в условиях криолитозоны.

Список литературы

1. Лебедев М.П., Пермяков П.П., Иванов Дж.С., Яковлев Ю.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Arctic and Subarctic Natural Resources. – Якутск, 2018, Т. 5, № 3. С. 114-120.
2. Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А. Исследование сложных деформаций подземного трубопровода в условиях вечной мерзлоты // XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 27-31 мая 2024 г.). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2024.– 230 с.–ISBN 978-5-6040873-4-3.– С. 150.
3. Чирков Ю.А. Изменение дефектности металла трубопроводов при длительной эксплуатации./ В.М. Кушнаренко, Ю.А. Чирков, А.В. Швец, Д.Н. Щепинов // Металловедение и термическая обработка металлов. – №9 (651). – 2009 – С. 7-10.
4. Большаков А.М., Сыромятникова А.С. Анализ разрушений и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера. // Газовая промышленность. 2010. № 5. С. 52-53.
5. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращение в железе и стали. 1977 – М: Наука, – 238 с.

УДК 621.791.011+621.791.042
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-70-74

АНИЗОТРОПИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ИЗ ХЛАДОСТОЙКИХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Николаев А.С.[1], Паршин С.Г. [1], Иванова И.В [1], Коротеев А.О.[2]
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[2]Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь
E-mail: parshin@spbstu.ru

Аннотация. *В работе выполнены исследования сварных соединений высокопрочных трубных сталей при двухдуговой автоматической сварке в среде защитных газов. Изучена микроструктура, поперечное и продольное распределение макро- и микротвердости в различных зона сварных соединений. Проведены механические испытания на статическое растяжение и ударный изгиб при низких температурах. Установлены причины неоднородности и степень разупрочнения в зоне термического влияния. Сформулированы принципы снижения микроструктурной и механической неоднородности.*

Ключевые слова: *дуговая сварка, газопроводы, высокопрочная трубная сталь, свариваемость, микроструктура, микротвердость, ударная вязкость.*

ANISOTROPY OF WELDED JOINTS OF MAIN GAS PIPELINES MADE OF COLD-RESISTANT HIGH-STRENGTH STEELS

Nikolaev A.S.[1], Parshin S.G.[1], Ivanova I.V.[1], Koroteev A.O.[2]
[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
[2]Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

Abstract.. *The paper studies welded joints of high-strength pipe steels in twin-arc automatic welding in a shielding gas. The microstructure, transverse and longitudinal macro- and microhardness distribution in various zones of welded joints are studied. Mechanical tests for static tension and impact toughness at low temperatures are carried out. The causes of heterogeneity and the degree of softening in the heat-affected zone are established. The principles of reducing microstructural and mechanical heterogeneity are formulated.*

Keywords: *arc welding, gas pipelines, high-strength pipe steel, weldability, microstructure, microhardness, impact toughness.*

Введение. Трубные высокопрочные стали магистральных газопроводов проявляют чувствительность к термическому циклу сварки, поэтому важно обеспечить оптимальные скорости охлаждения с целью регулирования микроструктурного состояния, достижения высокой ударной вязкости и хладостойкости сварных соединений. Способы сварки труб отличаются погонной энергией и скоростью охлаждения $W_{8/5}$, ºС/с: ручная сварка покрытыми электродами – 10–50; в среде защитных газов – 20–80; автоматическая сварка под флюсом – 1–12; лазерная сварка – 150–250 [1, 2].

При сварке труб из стали К60 диаметром 1420 мм и толщиной 25,8 мм, состава, %: 0,06С; 1,55Mn; 0,18Si; 0,18Ni; 0,22Mo; 0,017Nb; 0,17Cu с эквивалентом углерода 0,39% с проволокой Boehler Ti 60-FD диаметром 1,2 мм в смеси 82%Ar+18%CO_2 при погонной энергии 0,8 кДж/мм выявили анизотропию микроструктуры в ЗТВ [3]. При скорости охлаждения $W_{8/5}$=25–50 ºС/с достигли высокой ударной вязкости и снизили разупрочнение в ЗТВ при содержании менее 10% мартенсита, 15–20% перлита, 45% квазиполигонального феррита и более 25–30% гранулярного бейнита.

При моделировании термических циклов сварки под флюсом труб из стали К60 марки 06Г2БМ и 07Г2БФ толщиной 25,8 и 33,4 мм с C_{IIW}=0,39–0,42% при скорости охлаждения $W_{8/5}$=2–5 ºС/с ударная вязкость KCV_{-30} в ЗТВ снизилась до 9–22 Дж/см^2 и 6–35 Дж/см^2 из-за роста первичного аустенитного зерна до 100–150 мм, увеличения до 60–85% грубого феррита и 30–40% перлита [4]. В сталях 06Г2НМДБ, 07Г2НДФБ, 05ХГ2НДБ, 07ХГ2Б и 04ХНДБ толщиной 29,8 мм при $W_{8/5}$ менее 3–4 °С/с ударная вязкость KCV_{-20} снижалась из-за роста аустенитного зерна до 160–200 мкм, столбчатых кристаллитов зернограничного феррита размером до 80–140 мкм, наличия оксидных включений размером до 3–5 мкм [5].

Повышение ударной вязкости достигли при снижении погонной энергии и увеличении скорости охлаждения, что привело к росту объема реечного бейнита, уменьшению объема гранулярного бей-

нита, зернограничного и Видманшеттова феррита. Оптимальные скорости охлаждения $W_{8/5}$ для формирования вязкой бейнитной структуры составили: при сварке сталей К60 – от 3–5 до 50–100 ºС/с; К65 – от 1 до 20–80 ºС/с; К80 – от 1 до 15–20 ºС/с [5].

Таким образом, свариваемость трубных сталей осложняется из-за высокой чувствительности микроструктуры к термическому циклу сварки, анизотропии и снижения ударной вязкости, что является серьёзной материаловедческой проблемой, снижает надёжность и работоспособность магистральных газопроводов в условиях низких температур.

Целью работы являлось изучение механической и микроструктурной анизотропии кольцевых сварных соединений при двухдуговой автоматической сварке магистральных газопроводов из высокопрочных трубных сталей в среде защитных газов.

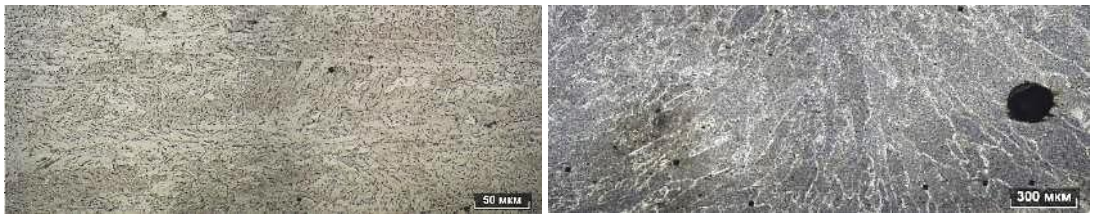
Материалы и методы исследований. При исследовании выполняли автоматическую сварку комплексом Dragoweld 700 вертикальных неповоротных стыков труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 21,6 мм из трубной бейнитной стали класса прочности К60 при эквиваленте углерода CE_{IIW}=0,34, а также труб К60, К65 с толщиной стенки 32 и 23 мм. При заполнении разделки сила тока составляла 160–230 А, напряжение дуги 21–24 В, скорость подачи проволоки 8–11,5 м/мин, скорость сварки 5,3–8,3 мм/с. Для корневого прохода в аргоне использовали проволоку TS-6 диаметром 0,9 мм по AWS A5.18-ER70S-G, для горячего прохода, заполняющих и облицовочных слоев использовали проволоку К600 диаметром 1 мм по AWS A5.18-ER70S-G в смеси газов 80% Ar+20%CO_2.

Прочность определяли на разрывной машине ZDM-100, ударную вязкость на маятниковом копре Instron 600MPX, согласно ГОСТ 6996-66, ГОСТ 9454-78, СТО Газпром 15-1.1-002-2023 на образцах Шарпи тип IX с надрезом по шву и линии сплавления (ЛС) внизу и сверху шва на расстоянии 2 мм от поверхности трубы. Твердость измеряли твердомером 8187.5 LKV (Indentec hardness testing machines limited, Великобритания), согласно ГОСТ 2999-75 внизу и сверху шва на расстоянии 2 мм от поверхности трубы. Микроструктуру исследовали после травления в 3% растворе HNO_3 с помощью оптического микроскопа «Reichert-Jung MeF3A» с программным комплексом «Thixomet». Микротвердость измеряли с шагом 50 мкм с помощью приставки «Micro-Duromat 4000E» с нагрузкой 180 гс ($HV_{0,18}$).

Результаты исследований. Анализ микроструктуры показал, что строение сварного соединения трубной стали К60 включает 5 основных участков, которые отличаются по морфологии и составу микроструктуры: сварной шов (наплавленный металл), границу шва (линию сплавления), участок перегрева крупного зерна, участок нормализации мелкого зерна, участок неполной нормализации (отпуска), рис. 1.

Рис. 1. Панорамное изображение шва и ЗТВ по центру шва

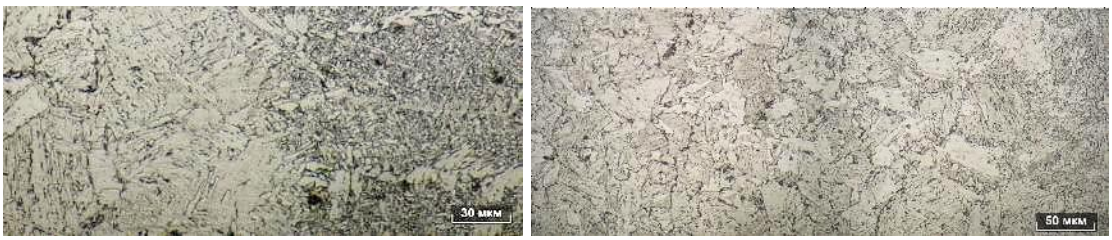
Основной металл имел тонкодисперсную микроструктуру из смеси реечного бейнита, полигонального и зернограничного феррита с равномерно распределенными дисперсными карбидами. Микроструктура наплавленного металле в центре шва состояла из кристаллитов длиной до 500–800 мкм с зернограничным и игольчатым ферритом, имелись оксидные включения и пористость, рис. 2.



а) *б)*

Рис. 2. Микроструктура основного *а)* и наплавленного металла *б)*

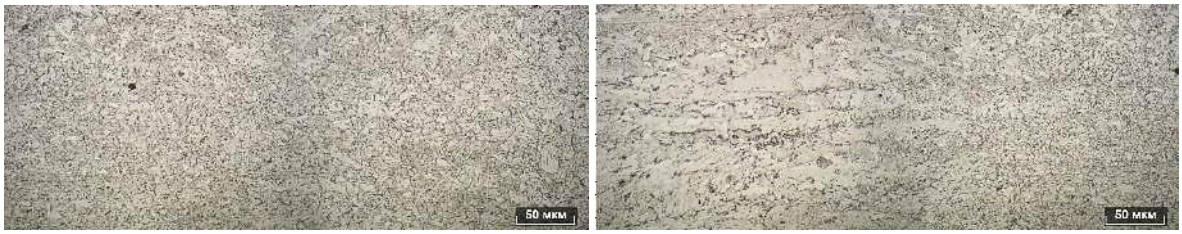
Наиболее грубая структура имелась на границе шва, в которой преобладали укрупнённые участки полигонального и Видманшеттова феррита, на границе которых располагались включения карбидов. Участок перегрева ЗТВ отличался наличием крупных зерен гранулярного бейнита и полигонального феррита с наличием граничных и внутризеренных крупных карбидов, рис. 3.



а) б)

Рис. 3. Микроструктура границы шва *а)* и участка перегрева ЗТВ *б)*

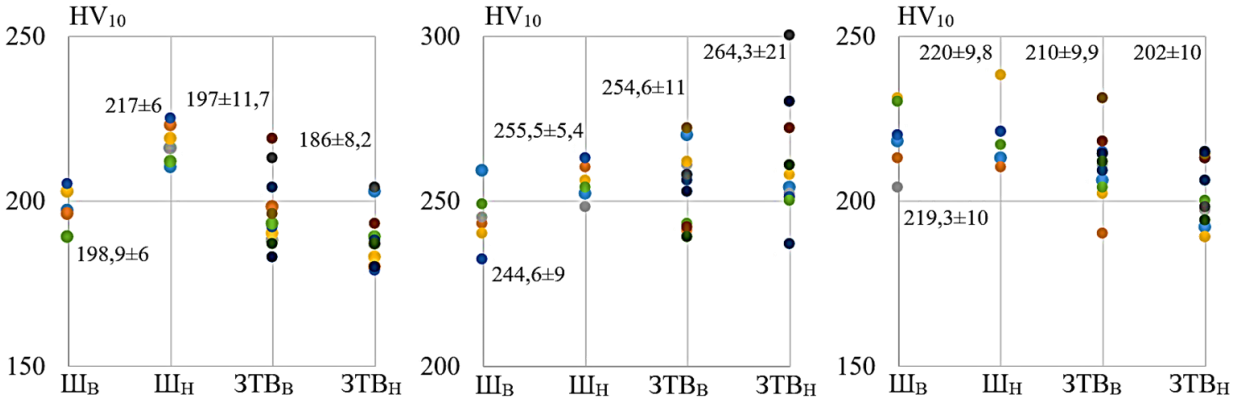
Участок нормализации состоял из смеси равноосного гранулярного бейнита и полигонального феррита с равномерной распределённой по объему карбидной фазой. На участке неполной нормализации имелась грубая структура из крупных участков полигонального феррита с купными включениями граничных карбидов, рис. 4.



а) *б)*

Рис. 4. Микроструктура участка нормализации *а)* и участка неполной нормализации ЗТВ *б)*

С увеличением толщины труб до 32 мм твердость шва и отклонения твердости в ЗТВ увеличились. Из-за большой площади и шага отпечатка макротвердость не позволила выявить анизотропию отдельных участков ЗТВ, но показала рост отклонений макротвердости по отношению со швом, рис. 5.



а) *б)* *в)*

Рис. 5. Макротвердость в сварных соединениях: *а)* – труба К60 1420×21,6 мм; *б)* – труба К60 1420×32 мм; *в)* – труба К65 1420×23 мм. $Ш_В$ – шов вверху; $Ш_Н$ – шов внизу; $ЗТВ_В$ – зона термического влияния вверху; $ЗТВ_Н$ – зона термического влияния внизу

Для уточнения степени механической неоднородности выполнили исследования микротвердости в пяти линиях сварного соединения с шагом 50 мкм.

На расстоянии 2 мм от верхней поверхности трубы ширина шва составляла 6,5 мм, ширина ЗТВ – 1,45–1,6 мм, микротвердость в ЗТВ снижалась в 1,06–1,15 раза до 217–230 HV при максимальной микротвердости основного металла 244–249 HV. По середине проката ширина шва составляла 6,75 мм, ширина ЗТВ – 1,75–1,85 мм, микротвердость в ЗТВ снижалась в 1,15–1,22 раза до 215–228 HV при максимальной микротвердости основного металла 259–262 HV. В горячем проходе ширина шва составляла 6,5 мм, ширина ЗТВ – 1,8–1,95 мм, микротвердость в ЗТВ снижалась в 1,15–1,17 раза до 218 HV при максимальной микротвердости основного металла 250–256 HV, рис. 6.

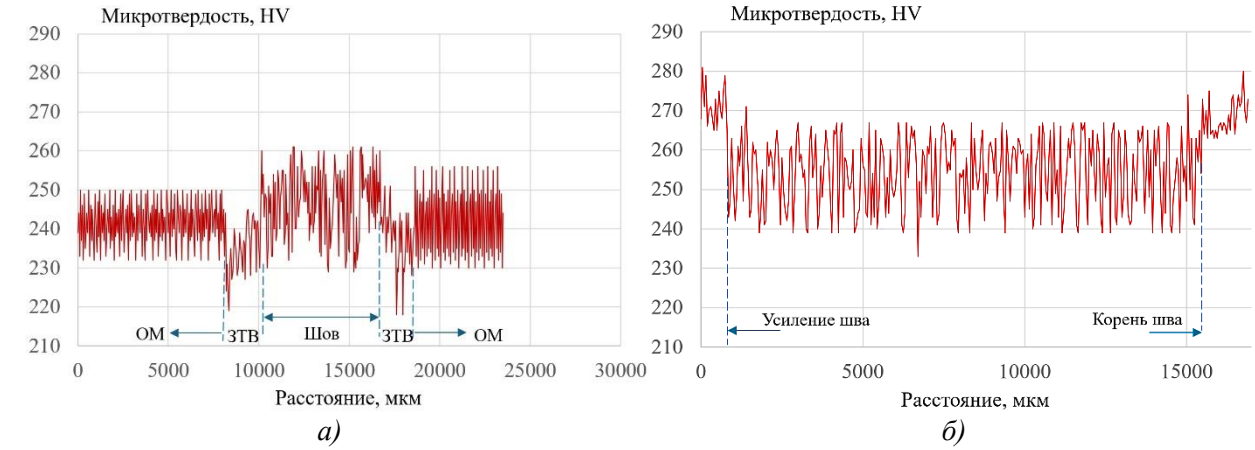


Рис. 6. Распределение микротвердости в сварном соединении: поперек горячего прохода *а)*, вдоль шва *б)*

Степень разупрочнения в ЗТВ по микротвердости увеличивалась в направлении от верхнего до корневого прохода от 1,06 до 1,26 раза, ширина ЗТВ увеличивалась от 1,45 до 2,3 мм. Максимальная микротвердость шва увеличивалась в направлении от верхнего до корневого прохода: 248→261→283 HV, в облицовочном проходе микротвердость достигала 281 HV.

Среднее временное сопротивление двенадцати поперечных образцов при сварке труб К60 1420×21,6 мм; К60 1420×32 мм; К65 1420×23 мм составило 623±9 МПа; 635±9 МПа; 700±5 МПа. Статистический анализ ударной вязкости в программе Exel показал значительный рост отклонений KCV_{-40} в образцах с надрезом по линии сплавления (ЛС), а также по шву, что свидетельствует об микроструктурной анизотропии сварных соединений, рис. 7.

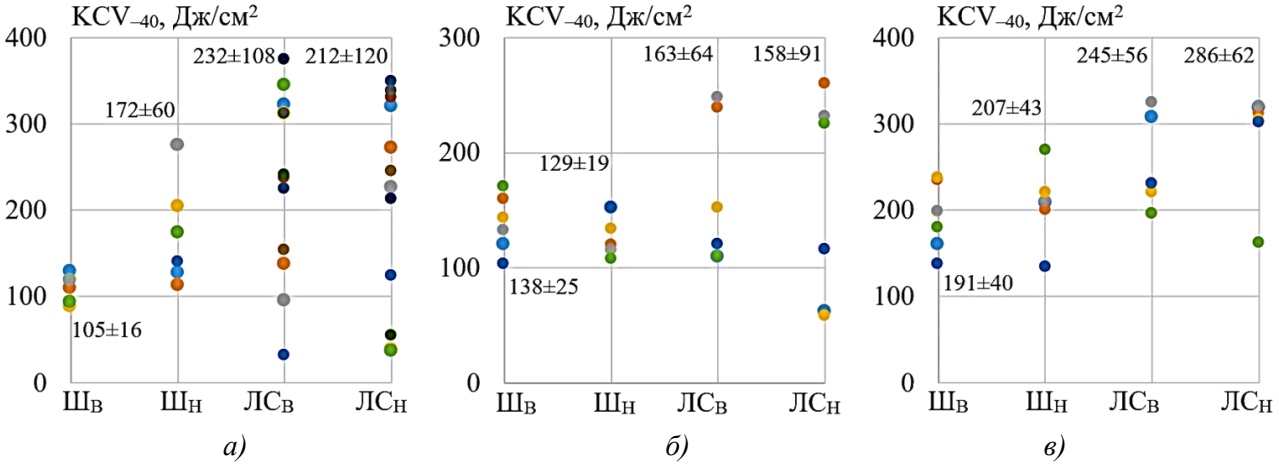


Рис. 7. Ударная вязкость в сварных соединениях: *а*) – труба К60 1420×21,6 мм; *б)* – труба К60 1420×32 мм; *в*) – труба К65 1420×23 мм. $Ш_В$ – шов вверху; $Ш_Н$ – шов внизу; $ЛС_В$ – линия сплавления вверху; $ЛС_Н$ – линия сплавления внизу

Выводы. Сварные соединения трубных сталей К60 и К65 при двухдуговой сварке отличаются выраженной механической и микроструктурной неоднородностью, которая проявляется в изменении микроструктуры, твердости и ударной вязкости в поперечном и продольном направлении сварных соединений под влиянием термического цикла сварки.

Средние значения и отклонения макро-, микротвердости возрастают в направлении от верхнего к корневому проходу. По сравнению со швом отклонения ударной вязкости на границе шва при сварке труб толщиной 21,6 мм увеличиваются в 2–6,7 раза, при сварке труб толщиной 32 мм в 2,5–4,8 раза. Степень разупрочнения ЗТВ по микротвердости увеличивается в направлении от верхнего к корневому проходу в 1,06–1,26 раза.

Основной причиной роста отклонений макро-, микротвердости и ударной вязкости в сварном шве является наличие грубой столбчатой структуры с оксидными включениями. Снижение микротвердости и ударной вязкости на границе шва, участке перегрева и неполной нормализации обусловлено увеличением объема зернограничного, полигонального и Видманштеттова феррита и крупных зернограничных карбидов.

Возможными решениями проблемы микроструктурной и механической неоднородности является измельчение первичного зерна аустенита, модификация, дезориентация микроструктуры из столбчатых кристаллитов, увеличение скорости охлаждения $W_{8/5}$, искусственная стимуляция дисперсных неметаллических включений для зарождения игольчатого феррита, рост объема дисперсного реечного бейнита, снижение объема зернограничного, полигонального и Видманштеттова феррита.

Список литературы

1. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М., Капустин О.Е., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов. Монография. М.: Логос, 2011. 306 с.
2. Столяров В.И., Пышминцев И.Ю,, Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Морозов Ю.Д., Назаров А.В., Вышемирский Е.М. Свариваемость высокопрочных сталей для газопроводных труб большого диаметра // Проблемы черной металлургии. 2008, № 3. С. 39–47.
3. Рамусь Р.О. Разработка технологии ремонта сварных соединений магистральных газопроводов из сталей с повышенной деформационной способностью на основе изучения их свариваемости. Диссертация к.т.н. Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 2022. 159 с.
4. Севостьянов С.П. Разработка технологических мероприятий повышения ударной вязкости сварных соединений при многодуговой автоматической сварке труб. Диссертация к.т.н. Москва: ГазпромВНИИГАЗ. 2021. 129 с.
5. Степанов П.П. Роль микроструктурных факторов в сопротивлении разрушению сварных соединений стальных труб. Диссертация д.т.н. Москва: ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина». 2023. 416 с.

УДК 621.79.01
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-75-78

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 10ХСНД ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Санников И.И.[1], Голиков Н.И.[1], Семёнов С.В.[1], Иванов М.А.[2]
[1] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2] Южно-Уральский государственный университет
E-mail: i.i.sannikov@mail.ru

Аннотация. *В статье представлены результаты исследования многопроходных сварных соединений, выполненных при отрицательных и комнатных температурах окружающего воздуха. Проведена экспериментальная многопроходная сварка низколегированной мостовой стали 10ХСНД 3 категории с использованием электродов WN 62U с регистрацией термических циклов сварки. Результаты исследования подтверждают возможность выполнения качественных сварных соединений стали 10ХСНД в условиях отрицательной температуры без значительного ухудшения эксплуатационных характеристик.*

Ключевые слова: *сварное соединение, термический цикл сварки, механические свойства, микроструктура, ударная вязкость.*

ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF 10HSND STEEL WELDED JOINTS UNDER SUBZERO TEMPERATURE WELDING CONDITIONS

Sannikov I.I.[1], Golikov N.I.[1], Semenov S.V.[1], Ivanov M.A.[2]
[1]Institute of Physical-Technical Problems of the North named after V.P. Larionov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk (Russia)
[2]South Ural State University (National Research University)

Abstract. *The article presents the results of a study on multi-pass welded joints made at subzero and ambient air temperatures. Experimental multi-pass welding of low-alloy bridge steel 10HSND (Grade 3) was performed using WN 62U electrodes with registration of the welding thermal cycles. The research results confirm the possibility of producing high-quality welded joints in 10HSND steel under subzero temperature conditions without significant degradation of its performance characteristics.*

Keywords: *welded joint, welding thermal cycle, mechanical properties, microstructure, impact toughness.*

На территории Республики Саха (Якутия) наблюдается активное развитие мостостроительной инфраструктуры. За последний шестилетний период было сдано в эксплуатацию 55 новых мостовых переходов. В конструкции мостов, адаптированных для северных регионов, применяется низколегированная конструкционная сталь марки 10ХСНД 3 категории. К этой марке стали выдвигаются строгие требования, включающие высокие показатели прочности, улучшенную коррозионную стойкость, регламентированную массу и возможность эксплуатации в широком температурном диапазоне от –70 до +450 °С [1, 2].

Поскольку строительство мостов не обходится без монтажной сварки, повышенные потребительские характеристики сталей (по уровню прочности и ударной вязкости) должны быть сохранены и в сварных соединениях. Однако формирование в свариваемом металле зоны термического влияния (ЗТВ) приводит к деградации механических свойств под воздействием термического цикла сварки (ТЦС) как в результате роста зерна, так и в связи с образованием закалочных структур [3]. Еще более интересно влияния ТЦС в условиях отрицательных температур на структуру и механические свойства сварных соединений [4]. Это особенно актуально в условиях Крайнего Севера, где строительство металлоконструкций связаны с необходимостью проведения сварочных работ при отрицательной температуре окружающей среды.

Исходя из вышесказанного, была поставлена цель работы в исследовании структуры и свойств сварных соединений стали 10ХСНД 3 категории, выполненных при отрицательных (–35 °С) и комнатных (+20 °С) температурах окружающего воздуха без предварительного подогрева.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели была проведена экспериментальная многопроходная сварка листовой низколегированной стали марки 10ХСНД 3 категории при отрицательной (-35 °С) и комнатной (+20 °С) температуре окружающего воздуха.

Экспериментальные исследования проводились на стальных пластинах с размерами 340×350 мм и толщиной 14 мм из стали марки 10ХСНД 3 категории. Односторонняя стыковая многопроходная сварка проводилась ручным дуговым методом обратной полярности в нижнем положении при отрицательной (-35 °С) и комнатной (+20 °С) температуре окружающего воздуха без предварительного подогрева. Для сварки использовались электроды с основным покрытием WN 62U (УОНИ 13/МОРОЗ) Группа компаний «ВЭЛДНОВА» диаметрами 2,5 мм и 4,0 мм. Данный электрод был рекомендован для сварки в условиях отрицательных температур [5]. Сварка выполнялась в 5 проходов с записью параметров режима с помощью регистратора AWR 224. В таблице 1 представлены параметры режима сварки образцов.

Таблица 1. Параметры режимов сварки образцов

№ образца и температура сварки (Т, °С)	Проходы сварки	Среднее значение		Скорость сварки $V_{св}$, м/ч	Погонная энергия Q, кДж/м
		Сила тока I, А	Напряжение U, В		
1 (-35)	1-корневой	95	27,1	6,79	1027
	2 -заполняющий	162	24,4	9,00	1185
	3 и 4 – заполняющие	163	23,9	13,21	794
	5-облицовочный	162	23,54	5,26	1959
2 (+20)	1-корневой	96	23,5	5,75	1063
	2 -заполняющий	164	24,2	7,76	1381
	3 и 4 – заполняющие	164	25,6	16,67	680
	5-облицовочный	164	25,0	6,37	1734

Регистрация термических циклов сварки выполнялась с использованием хромель-алюмелевыми и платина-родиевыми термопарами фирмы «ОВЕН» и регистрирующего устройства на базе микроконтроллера Arduino Nano 3.0. Измерение температуры термических циклов проводилось 4 термопарами для каждой сварочной пробы установленных с нижней стороны в корневом шве на расстоянии 70 мм друг от друга.

Измерение твердости зон сварных соединений по Виккерсу проведено с помощью твердомера AFFRI 206RTD по ГОСТ 2999-75 при нагрузке 588 Н (60 кгс). Измерение диагоналей отпечатков произведено с помощью металлографического микроскопа «НИМ». Твердость измерена в поперечном шлифе сварных соединений образцов № 1 и 2 по трем линиям, схема расположения которых представлена на рисунке 1.

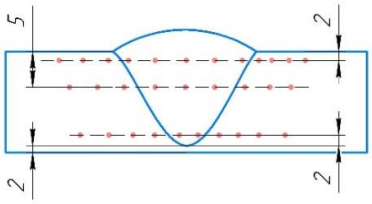


Рис. 1. Схема измерения твердости по Виккерсу зон сварных соединений

Статическое растяжение образцов проводили на универсальной электромеханической испытательной машине модели Z600 фирмы Zwick/Roell. Ударную вязкость металла шва (МШ) и ЗТВ определяли на образцах Шарпи с V-образным надрезом на маятниковом копре Amsler RKP 450 при температуре испытаний минус 40°С.

Структуры участка сварных соединений изучали на шлифах после травления в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте с использованием оптического микроскопа «НИМ». Микроструктуру МШ и участка перегрева ЗТВ сварного соединения оценивали на уровне корневого, заполняющего и облицовочного слоя.

Результаты исследований и их обсуждение. Сравнение тепловложений при сварке пластин показывает (таблица 1), что погонная энергия корневых проходов всех образцов практически одинакова, отличия между ними в пределах 2…6%. Более значительная разница погонных энергий между проходами получена при выполнении заполняющих и облицовочных слоев. Максимальная разница погонных энергий заполняющих проходов достигает 21%, а облицовочных до 11,5%. Но в целом суммарное тепловложение при сварке образцов различается между собой в относительно небольших пределах 2…5%.

По результатам измерений термопар построены термические циклы многопроходной сварки образцов при различных температурах окружающего воздуха –35 °С и +20 °С. По результатам измерений получено, что максимальные температуры термических циклов напрямую зависят от погонной энергии сварки и удаленности наплавляемого слоя от фиксированной точки измерения (Таблица 2).

Таблица 2. Средние значения скоростей и времени охлаждения ТЦС образцов

№ образца	Температура сварки (Т, °С)	№ термического цикла	$W_{8/5}$ (°С/с)	$W_{6/5}$ (°С/с)	$t_{8/5}$ (с)
1	-35	1	36,7	24,9	8,4
		2	17,9	13,5	16,7
		3	-	11,1	-
		4	-	-	-
		5	5,9	4,3	43,7
2	+20	1	24,6	18,4	12,4
		2	12	8,7	25,3
		3	-	-	-
		4	-	-	-
		5	-	4,9	-

Средние значения твердости по зонам сварных соединений с доверительным интервалом 95% представлены в таблице 3. Твердость основного металла (ОМ) составила 220 HV, МШ – 230 HV. Наиболее низкое значение твердости у обеих образцов выявлено в зонах термического влияния № 1 – 196 HV; № 2 – 192 HV. Термическое воздействие при сварке привело к снижению твердости в ЗТВ сварных соединений пластин, что характеризует изменение структуры стали.

Таблица 3. Твердость зон образцов сварных соединений

№ образца	Температура сварки, °С	Средние значения твердости, HV60		
		МШ	ЗТВ	ОМ
1	-35	231	196	221
2	+20	229	192	220

В таблице 4 представлены средние значения механических свойств на статическое растяжение.

Таблица 4. Механические свойства образцов

Материал	Средние значения механических свойств		
	Предел прочности $\sigma_в$, (*МПа*)	Предел текучести $\sigma_т$, (*МПа*)	Относительное удлинение δ, (%)
Образец 1 (-35 °С)	642	468	17,7
Образец 2 (+20 °С)	664	479	17,9
10ХСНД, толщина проката 4–50 мм, для всех категорий поставки (ГОСТ 6713-2021)	530–685	Не менее 390	Не менее 19

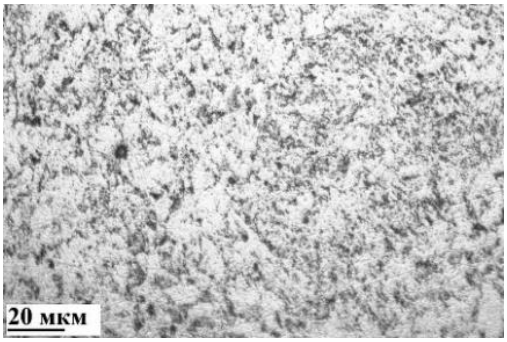
В таблице 5 представлены средние значения ударной вязкости металла шва и ЗТВ сварных соединений.

Таблица 5. Ударная вязкость зон сварных соединений образцов

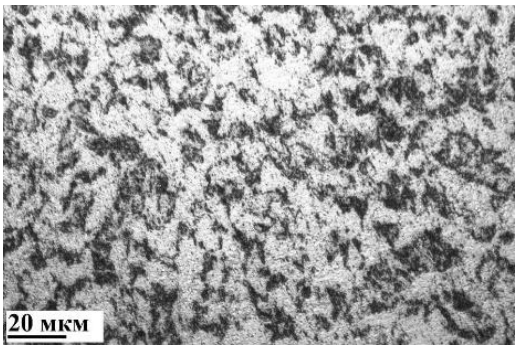
№ образца	Температура испытания, °С	Зона сварного соединения	Средние значения ударной вязкости, Дж/см^2
1 (–35 °С)	-40	ЗТВ	72
		МШ	78
2 (+20 °С)		ЗТВ	77
		МШ	80

Таким образом, по результатам механических испытаний получено, что существенных различий между образцами экспериментальной многопроходной сварки листовой низколегированной стали марки 10ХСНД 3 категории при отрицательной (–35 °С) и комнатной (+20 °С) температуре окружающего воздуха не наблюдается.

Полученные результаты подтверждаются микроструктурой сварных соединений. Полученные изображения микроструктуры свидетельствуют о примерно схожих структурах швов сварных соединений, полученных при разных температурах окружающего воздуха. Структура участков перегрева ЗТВ на уровне заполняющего и облицовочного проходов сварных соединений, выполненых при различных температурах практически схожи, в них наблюдаются виндмандштеттовы структуры. Некоторая разница структур обнаружена в участках перегрева ЗТВ сварных соединений на уровне корневого шва (Рис. 2). Данные участки при многопроходной сварке подвергаются многократному воздействию термических циклов сварки. Участки перегрева ЗТВ вблизи корневого шва различаются тем, что структура образца после сварки при комнатной температуре характеризуется более повышенным содержанием перлитных фаз. Более высокая скорость охлаждения при сварке в условиях отрицательных температур не позволила росту более мягких структурных составляющих (феррита и перлита).



а



б

Рис. 2. Микроструктуры участка перегрева ЗТВ на уровне корневого шва, выполненных при различных условиях сварки:
а – при –35 °С; *б* – при +20 °С

Выводы. Скорость охлаждения при сварке стали 10ХСНД в условиях отрицательных температур (–35 °С) в начальных проходах в 1,3–1,5 раза выше, чем при комнатной температуре (+20 °С). Однако в последующих проходах разница нивелируется из-за накопленного тепла.

Механические свойства (предел прочности, ударная вязкость) сварных соединений, выполненных при –35 °С и +20 °С, не имеют значительных различий, что подтверждает возможность качественной сварки в условиях отрицательных температур окружающего воздуха.

Микроструктура металла шва и зоны термического влияния сварных соединений, выполненных многопроходной сваркой при разных температурах окружающего воздуха, имеют практически схожую структуру. Некоторая разница структур обнаружена в участках перегрева ЗТВ сварных соединений на уровне корневого шва.

Проведенные исследования демонстрируют технологическую пригодность сварки стали 10ХСНД при –35 °С, что особенно актуально для строительства в регионах с суровым климатом, таких как Республика Саха (Якутия).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20214, https://rscf.ru/project/24-29-20214/. Данные исследования проводились на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Молева Д. А., Белозор М. Ю. Обоснование применения сталей для изготовления конструкций мостов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 4-2(43). – С. 28-31.
2. ГОСТ 6713-2021 Прокат из конструкционной стали для мостостроения. Технические условия.
3. Костин В. А., Григоренко Г. М., Позняков В. Д. [и др.]. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства микролегированных конструкционных сталей // Автоматическая сварка. – 2012. – № 12(716). – С. 10-16.
4. Голиков Н. И., Санников И. И., Семенов С. В., Иванов М. А. Термические циклы, структура и свойства неразъемных соединений конструкционных сталей при сварке в условиях экстремального холода // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2024. – Т. 29, № 3. – С. 479-492. – DOI 10.31242/2618-9712-2024-29-3-479-492.
5. Голиков Н. И., Сараев Ю. Н., Сидоров М. М. [и др.] Исследование возможности применения покрытых электродов УОНИ 13/мороз при сварке отрицательных температур окружающего воздуха / // Сварка и диагностика. – 2024. – № 3. – С. 30-35. – DOI 10.52177/2071-5234_2024_03_30.

УДК 621.791.75.019
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-79-81

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР СЕВЕРА*

Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М., Дмитриев П.С., Семенов С.В.
ИФТПС ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск
E-mail: saraev.73@yandex.ru.

***Аннотация**. Предложенный в статье материал, является частью исследований, направленных на поиск путей повышения эффективности монтажных и ремонтных технологий конструкций ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур Севера. Развиваемое направление, представлено в виде обсуждения результатов исследований, полученных при комплексном применении перспективных методов управления их прочностными и эксплуатационными характеристиками. Важной составляющей предложенной статьи, являются принципиально новые результаты, полученные на основе реализации возможностей методов адаптивного импульсного управления характеристиками тепломассопереноса, обеспечиваемого за счет полного контроля за системой источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие при действии различных возмущающих воздействий, а также изложены результаты исследований нового поколения сварочных и наплавочных электродов отечественного производства. Представленная в статье концепция, не охватывает всех многочисленных примеров, направленных на обеспечение эксплуатационной надежности конструкций Севера, но позволяет проиллюстрировать один из немногих эффективных вариантов комплексного подхода к достижению устанавливаемых целей.*

***Ключевые слова:** Сварка, наплавка, тепломассоперенос, плавление, кристаллизация, структура, свойства, низкие климатические температуры, адаптивные импульсные технологии.*

ON THE DEVELOPMENT OF PHYSICAL PRINCIPLES FOR ACHIEVING PERMANENT JOINTS IN SAFETY-CRITICAL STRUCTURES EXPOSED TO THE LOW AMBIENT TEMPERATURES OF THE NORTH*

Saraev Y. N., Golikov N.I., Sidorov M.M., Dmitriev P.S., Semenov S.V.
IPTPN, FRC YSC, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk

***Abstract.** The material presented in this article is part of research aimed at finding ways to improve the efficiency of assembly and repair technologies for critical structures operating in the low climatic temperatures of the North. The developed direction is presented as a discussion of research results obtained through the comprehensive application of advanced methods for controlling their strength and operational characteristics. An important component of the proposed article is the fundamentally new results obtained by leveraging the capabilities of adaptive pulse control methods for heat and mass transfer characteristics. This is achieved through full control over the system «power source – arc – weld pool – workpiece» under various disturbing influences. The article also presents research results on a new generation of domestically produced welding and surfacing electrodes. The concept presented in the article does not cover all the numerous examples aimed at ensuring the operational reliability of northern structures, but it illustrates one of the few effective options for a comprehensive approach to achieving the set goals.*

***Keywords:** Welding, surfacing, heat and mass transfer, melting, crystallization, structure, properties, low climatic temperatures, adaptive pulse technologies.*

Актуальность. В связи с интенсивным освоением территорий, расположенных в регионах Сибири, Крайнего Севера и Арктики возникает настоятельная необходимость совершенствования технологий сварки и наплавки, как основных технологических процессов, применяемых при производстве и ремонте крупно-габаритных металлоконструкций, которые можно представлять как технические системы ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур: нефте- и газопроводы, резервуары, судовая, автомобильная, строительно-дорожная и карьерная техника, оборудование объектов энергетики, связи, железно-дорожной инфраструктуры. Экстремальные условия Крайнего Севера и Арктики, накладывают дополнительные требования к обеспечению стабильности технологических процессов сварки и наплавки, как основных способов монтажа и ремонта металлический конструкций ответственного назначения, имеющих свои особенности. Эти особенности, в основ-

ном связаны со способностью технологического оборудования и, применяемых сварочных и наплавочных материалов, обеспечивать и сохранять, стабильность и технологическую устойчивость процесса, в условиях специфических возмущающих воздействий на систему: источник питания – дуга – сварочная ванная – изделие, при быстроизменяющихся колебаний среднесуточной температуры окружающего воздуха и изменениях ветровой нагрузки в процессе сварочно-монтажных и ремонтных работ.

Цель проводимых исследований: Изыскание наиболее эффективных направлений повышения ресурса, живучести и эксплуатационной надежности технических систем со сварными соединениями и наплавленными покрытиями, путем комплексного применения нового поколения сварочных и наплавочных материалов, усовершенствованных систем питания, способных сохранять свою работоспособность в условиях низких климатических температур, применения специальных физико-технических методов поверхностной обработки, обеспечивающих снижение уровня остаточных напряжений в зонах неразъемных соединений (сварные швы и наплавленные покрытия), а также применения специальных методов контроля за характером процессов тепломассопереноса, как на этапах непосредственно технологического процесса монтажа или ремонтно-восстановительно и упрочняющей обработки, выполняемых при низких климатических температурах.

Для достижения сформулированной цели необходимо решение трех взаимосвязанных задач:

– Разработка и практическое применение нового поколения сварочных и наплавочных материалов, имеющих в своей структуре субмикрокристаллические и нано размерные компоненты, оказывающие влияние на процессы горения дуги и модифицирующее влияние на структуру и свойства металла и наплавленного покрытия.

– Разработка и практическое применение новых методов диагностики быстропротекающих процессов тепломассопереноса, сопровождающих плавление, перенос и кристаллизацию металла шва из расплава, оказывающих доминирующее влияние на напряженно-деформируемое состояние конструкций ответственного назначения.

– Разработка и практическое применение нового поколения источников питания, обладающих высокими динамическими свойствами и реализующих современные алгоритмы управления, с учетом быстроменяющихся условий (температура окружающего воздуха, ветровая нагрузка, темп сварочно-технологических работ), влияющих на скорость обрабатываемого изделия и меняющих условия кристаллизации металла шва из расплава.

– Применение методов дополнительной физико-технической обработки зон структурной неоднородности, способных обеспечить в этих областях наиболее благоприятные усилия сжатия.

С учетом сказанного, изыскание путей повышения эффективности монтажных и ремонтных технологий конструкций ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур Севера, является фундаментальной, чрезвычайно важной задачей, решение которой может, в значительной мере, определить процесс развития машиностроения, энергетики, химической, добывающей и перерабатывающей промышленности, расположенных в регионах холодного климата.

Решение первой задачи основывается на применении нового поколения сварочных и наплавочных материалов, производимых нашими партнерами, одним из которых является ООО «Электродный завод ВЭЛДНОВА», г. Краснодар. Предприятие начало производство покрытых электродов, которые наиболее полно учитывают экстремальные климатические условия Северных и Арктических регионов России и способные обеспечивать стабильность сварочно-технологических характеристик для заданных условий применения. Прежде всего это, покрытые электроды WN-52U (Э50А) и WN-62U (Э60) для сварки трубопроводов и особо ответственных конструкций, а также электроды WN H-6/60 для восстановительной и упрочняющей наплавки вязко-твердых, ударно-вязких и стойких к истиранию слоев на нелегированные и низколегированные материалы повышенной прочности.

Решение второй задачи основывается на применении современных исследовательских ресурсов, таких как, тепловизионная и скоростная видеосъемка, с регистрацией быстропротекающих процессов тепло-массопереноса при формировании неразъемных соединений, компьютерной обработкой регистрируемых параметров режима и их представлении в виде диаграмм, графиков, видео- тепловизионных фильмов, коэффициентов вариации.

Решение третьей задачи связано с реализацией в современных системах питания адаптивных алгоритмов импульсного управления энергетическими параметрами технологических процессов сварки и наплавки.

Решение четвертой задачи основывается на специальной физико-механической обработке зоны неразъемного соединения, обеспечивающей в ней благоприятные усилия сжатия. При этом совместное всех перечисленных выше слагаемых обеспечивает снижение структурной неоднородности по всему сечению неразъемного соединения, в том числе за счет уменьшения размеров его структурных составляющих.

Заключение. Выполняемые комплексные исследования подтверждают, что для повышения эффективности формирования покрытий и их эксплуатационных показателей, целесообразно применение методов регулируемого тепловложения, достигаемых за счет импульсного изменения энергетических параметров режимов в наиболее эффективном частотном диапазоне. Такое управление энергетическими параметрами при наплавке позволяет обеспечить снижение структурной неоднородности по всему сечению покрытия, в том числе за счет уменьшения размеров его структурных составляющих.

Структура металла покрытия, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, не содержит значительного количества протяженных дендритов в отличие от шва, выполненного дуговой наплавкой на постоянном токе. Это подтверждается многочисленными результатами исследований покрытий, полученными с применением, как различных марок покрытых электродов, так перспективных порошковых проволок.

Таким образом, на основе выполняемых исследований можно констатировать, что повышение свойств наплавленных покрытий можно обеспечить за счет комплексного применения методов модифицирования материалов, варьирования энергетических параметров режима, использования нового перспективного сварочного оборудования, способного сохранять свою работоспособность в условиях низких климатических температур Севера.

Исследование выполнено в рамках государственного задания СО РАН, шифр проекта FWRS-2024-0034, регистрационный №НИОКТР 124032600078-1

Список литературы

1. Технологическая прочность сварных соединений при низких температурах / О. И. Слепцов [и др.]; отв. ред. В. П. Ларионов; АН СССР, Сиб. отд-ние, Якут. фил., Ин-т физ.-техн. проблем Севера. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1984. – 102 с.
2. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Ю. Н. Сараев, С. В. Гладковский, Н. И. Голиков [и др.] // Наукоемкие технологии в проектах РНФ. Сибирь. – Томск, 2017. – С. 134–202.
3. Разработка электродов для сварки магистральных трубопроводов и морской техники из высокопрочных низколегированных хладостойких сталей / Д. А. Кащенко, Ю. Д. Брусницын, А. В. Баранов [и др.] // Сварочное производство. – 2017. – № 2. – С. 21–29.
4. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing / Xingwang Bai, Paul Colegrove, Jialuo Ding [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 124. – P. 504–516.
5. Сараев, Ю. Н. Методология совершенствования технологий производства и ремонта судовых конструкций на основе комплексного применения современных технологий, источников питания и сварочных материалов / Ю. Н. Сараев, В. Д. Горбач, Н. И. Голиков // Вопросы материаловедения. – 2025. – № 1 (121). – С. 135–151. – ISSN 1994-6716.
6. Сараев, Ю. Н. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке / Ю. Н. Сараев, И. М. Полетика, А. В. Козлов, Е. Г. Хомченко // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № S. – С. 137–140.
7. Управление уровнем остаточных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой / М. М. Сидоров, Н. И. Голиков, Ю. Н. Сараев, Р. П. Тихонов // Тяжелое машиностроение. – 2023. – № 10. – С. 23–28.
8. Исследование влияния энергетических параметров режимов дуговой сварки покрытыми электродами и управляющих алгоритмов их изменения на характеристики ударной вязкости и трещиностойкости получаемых сварных соединений / Сараев Ю.Н., Гладковский С.В., Лепихин С.В., Каманцев И.С., Лунев А.Г., Перовская М.В. // Обработка металлов. – 2018. – Том 20, № 2. – с. 100 – 115.
9. Кинетические особенности тепломассопереноса в условиях сварки и наплавки / Ю. Н. Сараев, А. Г. Лунев, В. М. Семенчук, А. С. Непомнящий // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т. 62, № 9 (741). – С. 34–40.
10. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing / Xingwang Bai, Paul Colegrove, Jialuo Ding [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 124. – P. 504–516. – URL: https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-heat-and-mass-transfer
11. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects / Yan Li, Chen Su, Jianjun Zhu [et al.] // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 13. – P. 100330. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100330
12. Волков, С. С. Исследование возможности применения ультразвуковой обработки для снижения остаточных напряжений и деформаций в сварных соединениях / С. С. Волков, А. В. Коновалов, Л. А. Шестель // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020. – № 2 (719). – С. 3–10. – DOI: https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-2-3-10
13. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О. И. Слепцов, В. Е. Михайлов, В. Г. Петушков [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1989. – 223 с.

УДК 621.791.75.019
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-82-84

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ СВАРКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ*

Сараев Ю.Н., Дмитриев П.С.
ИФТПС СО РАН им. В.П. Ларионова, Якутск
E-mail: dmitriev.avtodorpetr@mail.ru

Аннотация. *Обеспечение надежности сварных конструкций в арктических условиях актуально, так как экстремально низкие температуры усиливают тепловой отвод при сварке, повышая скорость охлаждения и риск образования закалочных структур, что снижает сопротивляемость хрупким разрушениям. В статье представлена методика измерений термических циклов с помощью термопар при отрицательной температуре и представление его данных в виде графика. Показано, что при многопроходной сварке автоподогрев металла уменьшает скорость охлаждения последующих слоев.*

Ключевые слова: *многопроходная сварка, отрицательные температуры, термический цикл, скорость охлаждения*, низколегированная сталь.

METHOD FOR MEASURING WELDING THERMAL CYCLES USING THERMOELECTRIC THERMOMETERS*

Saraev Y.N., Dmitriev P.S.
V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Abstract. *Ensuring the reliability of welded structures in Arctic conditions is a critical issue, as extremely low temperatures intensify heat dissipation during welding. This increases the cooling rate and the risk of forming quenched structures, which reduces resistance to brittle fracture. The article describes a methodology for measuring thermal cycles using thermocouples at sub-zero temperatures and presents the data in the form of a graph. It is shown that in multi-pass welding, the self-heating of the metal reduces the cooling rate of subsequent layers.*

Keywords: *multi-pass welding, sub-zero temperatures, thermal cycle, cooling rate, low-alloy steel.*

Актуальность. Обеспечение надежности металлоконструкций (трубопроводов, резервуаров, мостов) в условиях холодного климата остается важной научно-технической задачей. В северных и арктических регионах, где среднегодовая температура опускается ниже –10 °C, сварочные работы часто проводятся при отрицательных температурах, что существенно влияет на процесс формирования сварного соединения [1, 2]. Термический цикл сварки, определяемый параметрами режима и температурой окружающей среды, играет ключевую роль в формировании структуры и механических свойств металла. Основными характеристиками цикла являются скорость и время охлаждения в критических температурных интервалах (800–500 °C и 600–500 °C), которые напрямую влияют на микроструктуру, твердость и склонность к образованию трещин [3]. Зона термического влияния (ЗТВ), в особенности участок перегрева, отличается крупнозернистой структурой и пониженной ударной вязкостью [4].

Цель проводимых исследований: разработка методики измерений термических циклов сварки с применением термоэлектрических преобразователей, исследование их параметров при многопроходной ручной дуговой сварке низколегированной стали в условиях отрицательных температур. Предлагаемая методика основана на синхронной регистрации температурных полей с использованием термопар и последующей математической обработке данных, что обеспечивает комплексный анализ тепловых процессов при сварке в условиях холодного климата.

Для составления методики измерения исследование термических циклов сварки проводились на низколегированной стали марки 10ХСНД. Размеры образцов: пластина 340×350 мм толщиной 14 мм. Выбранные размеры образцов должны позволить фиксировать разницу скоростей охлаждения при сварке в условиях отрицательных температур окружающего воздуха по сравнению с комнатными (+20 °C) [5]. Сварку образцов производили электродами марки УОНИ 13/Мороз, имеющими близкие прочностные характеристики с исследуемой сталью. Перед сваркой производили прокалку электродов при температуре 380°C в течении 1 часа. Односторонняя ручная дуговая сварка производилась встык

электродами диаметрами 2,5 и 4,0 мм на постоянной токе обратной полярности, при температурах окружающего воздуха: +20, -15 и -35 °С. Сварка образцов осуществлялась в 5 проходов (рис. 1), с остыванием между ними до температуры ~150 °С.

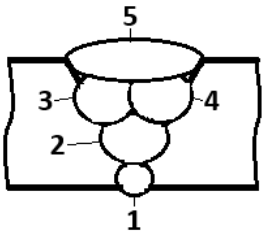


Рис. 1. Схема укладки слоев

На рисунке 2 представлена принципиальная схема устройства для регистрации термических циклов сварки. Блок-схема состоит из следующих основных компонентов: сглаживающие конденсаторы; микроконтроллер Arduino Nano 3.0; аналогово-цифровой преобразователь ADS1115; резистор; датчик температуры окружающей среды; измерительные термопары.

Для изучения распространения тепла на пластинах при сварке в условиях естественно низких и комнатной температур использовали термоэлектрические преобразователи (термопары) компании «ОВЕН» марки ДТПК031-1,2/0,5/1 и ДТПS021.1О-0,5/0,20, с открытым контактом. Применение данных термопар обусловлено их высоким диапазоном рабочих температур (хромель-алюмелевые до +1372 °С, платинородиево-платиновые до +1768 °С) [6]. Предварительно перед измерением каждую термопару и собранные устройства тестировали в лабораторной муфельной печи Nabertherm Model L9/11/S27 до 800°С. Значения температур и времени выводились на экран и сохранялись в текстовом файле. В каждой пластине устанавливали по 4 термопары с нижней поверхности пластин под корневым швом. Спаи термопар зачеканивались в подготовленные отверстия диаметрами 2 и 3 мм.

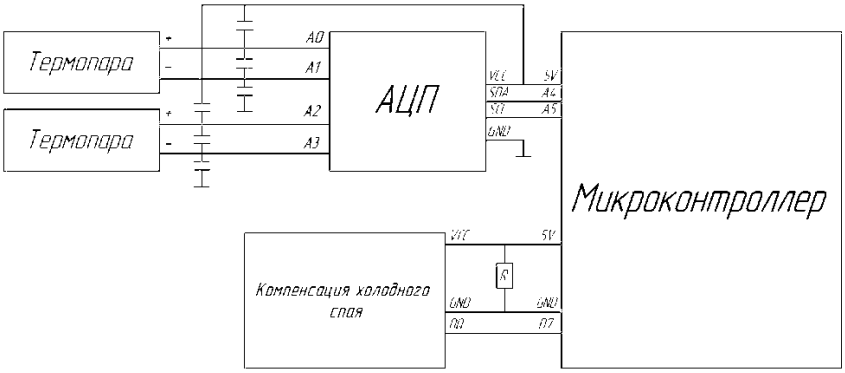


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для измерения термических циклов сварки

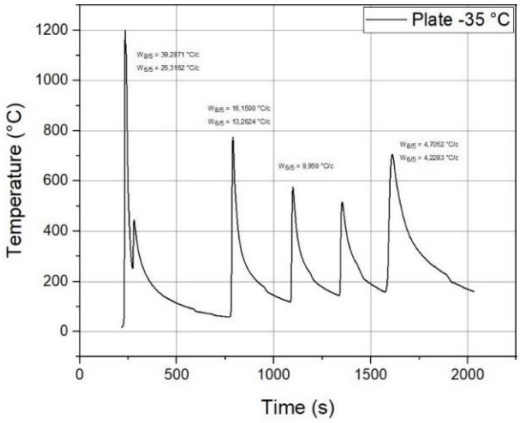


Рис. 3. Термические циклы с термопары, расположенной в образце.
Сварка произведена при температуре –35 °С

На рисунке 3 представлен термический цикл после сварки при температуре окружающего воздуха -35 °С. В табл. 1 представлены средние скорости охлаждения в интервале температур 600–500 °С ($W_{6/5}$) и 800–500 °С ($W_{8/5}$), а также среднее время охлаждения в диапазоне значений температуры 800–500 °С ($t_{8/5}$) и 300–200 °С ($t_{3/2}$). Данные с термопар с текстового файла загружались в программу Microsoft Excel. Для постройки графика были созданы два столбца: температуры по оси ординат и времени по оси абсцисс. С целью лучшего отображения и редактирования данные с Excel были загружены в программу Origin. Скорости охлаждения и их время были подсчитаны с данных термопар и представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1. Средние значения скоростей и времени охлаждения термических циклов сварки образцов

Температура сварки (Т, ºС)	№ термического цикла	$W_{6/5}$ (°С/с)	$W_{8/5}$ (°С/с)	$t_{8/5}$ (с)	$t_{3/2}$ (с)
-35	1	24,9	36,7	8,4	18,5
	2	13,5	17,9	16,7	70,1
	3	11,1	-	-	68,1
	4	-	-	-	72,6
	5	4,3	5,9	43,7	138,5

Заключение. Таким образом, в рамках данного исследования была разработана комплексная методика измерения термических циклов для условий многопроходной сварки низколегированной листовой стали при отрицательных температурах окружающего воздуха.

Установлено, что при многопроходной сварке последующие проходы характеризуются снижением скорости охлаждения благодаря эффекту автоподогрева. Однако даже в этом случае при температуре –35 °С скорость охлаждения второго прохода до 50% выше, чем при комнатной температуре, что подчеркивает необходимость учета внешних условий при проектировании сварочных технологий.

Полученные данные подтверждают, что при сварке корневого шва в условиях отрицательных температур (до –35 °С) время охлаждения в интервале 300–200 °С сокращается до 2 раз по сравнению с комнатной температурой (+20 °С).

Исследование выполнено в рамках государственного задания СО РАН, шифр проекта FWRS-2024-0034, регистрационный №НИОКТР 124032600078-1

Список литературы

1. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов земли. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. 206 с.
2. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Сараев Ю.Н. Исследования перспективных сварочных технологий, материалов и оборудования на основе натурных климатических испытаний в условиях естественного холода // Вопросы материаловедения. – 2024. – №4(120). – С. 113-123. – DOI 10.22349/1994-6716-2024-120-4-113-123.
3. Ольшанская Т.В., Федосеева Е.М. Выбор основных критериев термического цикла для методов прогнозирования структуры сварных швов при электронно-лучевой сварке // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 73–81. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.09
4. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М. и др. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных газонефтепроводов. М.: Логос; 2011.
5. Голиков Н.И., Санников И.И., Семенов С.В., Иванов М.А. Термические циклы, структура и свойства неразъемных соединений конструкционных сталей при сварке в условиях экстремального холода. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024;29(3):479–492. DOI:10.31242/2618-9712-2024-29 3-479-492
6. Гарсия В. Измерение температуры: теория и практика. Современные технологии автоматизации. 1999;(1):82–87.

УДК 621.791.927.5
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-85-87

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ НА СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Семенов С.В., Голиков Н.И.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН,
E-mail: s1789@mail.ru

Аннотация. *Исследование посвящено решению проблем с абразивным износом деталей горной техники, эксплуатирующейся в суровых арктических условиях. Сравнивалась эффективность наплавки на постоянном и модулированном токе. Установлено, что использование импульсно-дуговой технологии позволяет снизить выгорание легирующих элементов в расплаве. Это обеспечивает лучший перенос химического состава электрода в наплавленный слой и целенаправленную коррекцию его свойств. Результаты показали, что влияние технологии на твердость покрытия варьируется в зависимости от состава наплавочного материала, что подтверждает ее потенциал для управления качеством восстановления ответственных узлов.*

Ключевые слова: *наплавка, износ, горнодобывающая техника, импульсная сварка, химический состав, твердость.*

INFLUENCE OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE SURFACING PROCESS ON THE PROPERTIES OF THE FORMED COATINGS

Semenov S.V., Golikov I.I.
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *The study is devoted to solving the problems of abrasive wear of mining equipment parts operating in harsh Arctic conditions. The effectiveness of surfacing with direct current and modulated current was compared. It was found that the use of pulsed-arc technology reduces the burn-off of alloying elements in the melt. This ensures better transfer of the electrode's chemical composition to the surfacing layer and targeted adjustment of its properties. The results showed that the influence of the technology on the coating hardness varies depending on the composition of the surfacing material, confirming its potential for managing the quality of restoration of critical components.*

Keywords: *surfacing, wear, mining equipment, pulsed welding, chemical composition, hardness.*

На открытых горных работах в условиях Арктики, эксплуатируются большое количество техники высокой производительности, несущие конструкции и рабочие узлы которых изготовлены из высокопрочных сталей с различной степенью легирования. В результате интенсивной эксплуатации в условиях взаимодействия с мерзлыми грунтами при низких климатических температурах, поверхность детали горнодобывающей техники подвергается сильному износу, которая в последствии приводит к его разрушению [1].

Повышение надежности техники в целом можно достичь путём восстановления или упрочнения отдельных составляющих ее узлов и деталей, применяя метод наплавки покрытий с введением присадочного материала и формированием защитных многофункциональных слоев. Наибольший результат достигается при восстановлении геометрических размеров изношенных или упрочнении быстроизнашивающихся деталей машины технологическим способом, обеспечивающей повышенную эксплуатационную прочность и хладостойкость [2]. Электродуговая наплавка занимает прочные позиции в реновации деталей техники и механизмов в различных отраслях промышленности.

Одним из перспективных технологических способов в этом направлении является импульсно-дуговая наплавка, реализуемая специализированным оборудованием, имеющим блочно-модульный принцип построения, обеспечивающим возможность дозирования энергии, стабилизации мгновенных значений основных энергетических параметров процесса наплавки и контроля качества (стабильности) технологического процесса [3]. Однако для обоснования эффективности и внедрения в производство новой перспективной технологии наплавки необходимо исследовать влияние физико-механических свойств материалов на изнашивание, влияние на изнашивание качества рабочей поверхности детали и условий эксплуатации, в том числе наплавленных слоев, полученных разными способами наплавки.

В рамках, выполненного исследования применялись метод ручной дуговой наплавки на постоянном токе и метод импульсно-дуговой наплавки с частой модуляции тока 1.67 Гц, реализуемых от инверторного источника питания ФЕБ-315 «МАГМА». В качестве наплавочного материала были использованы электроды марки «WN 6/60» диаметром 4 мм (производства Weld Nova) и электроды марки ОЗН-400М диаметром 4 мм (производства Spetselecrode). В процессе работы осуществлялся сбор данных об энергетических характеристиках сварочных процессов с использованием регистратора AWR 224-МД, исследование химического состава наплавочного слоя с помощью эмиссионного оптического спектрометра «Foundry-Master, измерение твердости по шкале Виккерс наплавленных слоев проведено на стационарном твердомере AFFRI 206RTD, при нагрузке 150 кгс.

Проведена ручная дуговая наплавка в двух режимах: на постоянном (НП) и модулированном токах (НМ). В качестве наплавочного материала были использованы электроды марок «WN 6/60» и «ОЗН-400М».

Электроды WN 6/60 предназначены для упрочняющей наплавки и восстановления вязко-твердых, ударно-вязких и стойких к истиранию слоев на нелегированные и низколегированные материалы повышенной прочности, работающие в условиях интенсивного абразивного износа в сочетании с умеренными ударными нагрузками. Для наплавки и восстановления рабочих поверхностей: зубьев, адаптеров, режущих кромок ковшей экскаваторов и бульдозеров и т. д. Обеспечивают получение наплавленного металла с повышенной стойкостью к образованию трещин и сколов при многослойной наплавке и в условиях эксплуатации.

Электроды ОЗН-400М предназначены для наплавки деталей из углеродистых и низколегированных сталей, работающих в условиях трения и ударных нагрузок.

В таблице приведено сравнение полученного химического состава наплавленных слоев образцов, выполненные двумя разными способами наплавки: НП WN6/60 с НМ WN6/60; НП ОЗН-400М с НМ ОЗН-400М, также добавлен типичный состав электродов ОЗН-400М.

Таблица 1. Наплавочный слой электродов WN 6/60

Материал	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo
НП WN6/60	0,25	0,79	0,52	6,92	0,10	0,65	0,78
НМ WN6/60	0,29	0,80	0,53	7,2	0,10	0,69	0,73

Для электродов **WN 6/60** наплавка постоянным током (НП) по сравнению с модулированным (НМ) приводит к уменьшению содержания углерода на 13,79%, хрома на 3,89% и ванадия на 5,80%, в то время как содержание молибдена увеличилось на 6,85%.

Таблица 2. Наплавочный слой электродов ОЗН-400М

Материал	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
НП ОЗН-400М	0,10	1,72	3,26	0,10	0,12	0,18
НМ ОЗН-400М	0,12	1,9	3,6	0,10	0,12	0,17
Типичный состав (произв.)	0,13	1,7	3,5	-	-	-

Для электродов **ОЗН-400М** наплавка постоянным током (НП) по сравнению с модулированным (НМ) приводит к уменьшению содержания углерода на 16,7%, кремния на 9,5%, марганца на 9,4%.

Результаты определения твёрдости:

Измерение твёрдости по Виккерсу показало, что использование модулированного тока (НМ) поразному влияет на механические свойства покрытий в зависимости от типа электрода. Наплавка электродами WN 6/60 в режиме НМТ обеспечила повышение средней твёрдости поверхности на 11% по сравнению с режимом постоянного тока (НП). Несмотря на кажущуюся незначительность, это повышение является статистически значимым и указывает на различное влияние технологии на свойства наплавленных покрытий. В то же время, для электродов ОЗН-400М твёрдость покрытия, наплавленного модулированным и постоянным токами существенно не различаются.

Наплавка модулированным током снижает выгорание легирующих элементов (углерода, хрома, ванадия) по сравнению с постоянным током, что может привести к повышению твёрдости и износостойкости наплавленного слоя. Таким образом, импульсно-дуговая технология является эффективным инструментом не только для управления тепловложением, но и для целенаправленной коррекции химического состава и, как следствие, эксплуатационных свойств получаемого покрытия.

Выводы. Выполненные исследования показывают перспективность применения нового поколения наплавочных материалов и могут быть рекомендованы для практического применения.

Работа выполнена за счет средств Федерального бюджета, проект FWRS-2024-0034.

Список литературы

1. Винокуров Г.Г., Яковлева С.П., Кычкин А.К. и др. Изменение структуры и изнашивание породоразрушающего элемента бульдозера при эксплуатации в условиях Севера // Металлы. – 2009. – № 5. – С. 74-80.
2. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П., Семенов С.В. Повышение надежности сварных конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур с применением технологий импульсной сварки / Труды II Всероссийской научно-практической конференции «Сварка и безопасность», посвященной 80-летию д.т.н., профессора А.П. Аммосова. ИФТПС СО РАН. 2017. С. 186-194.
3. Сараев Ю.Н. Особенности разработки электро-технологических процессов сварки и наплавки на основе алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.3. № 3. С. 3-11.

УДК 621.79.053:006.354
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-88-93

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Слепцов Г.Н., Слепцов О.И.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: slepzovgn@mail.ru

Аннотация. *В данной работе показана возможность и необходимость применения метода акустической эмиссии для методик оценки технологической прочности сварных соединений. Представленное усовершенствование позволяет в реальном времени следит за кинетикой возникновения и развития холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей при замедленном разрушении, что несомненно повышает уровень оценки технологической прочности сварных соединений. На базе применения метода акустической эмиссии предложены, новые критериальные подходы при оценке технологической прочности сварных соединений основанные соответствующей обработке данных информативных параметров акустической эмиссии.*

Ключевые слова: *технологическая прочность, холодные трещины, акустическая эмиссия*

IMPROVEMENT OF METHODS FOR ASSESSING THE PROCESS STRENGTH OF WELDED JOINTS BASED ON THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

Sleptsov G.N.[1], *Sleptsov O.I.*[1]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This paper demonstrates the feasibility and necessity of using the acoustic emission method for assessing the process strength of welded joints. The presented improvement of the methods allows real-time monitoring of the kinetics of the occurrence and development of cold cracks in welded joints of high-strength steels during delayed fracture, which undoubtedly improves the level of assessment of the technological strength of welded joints. Using the acoustic emission method, new criteria-based approaches to assessing the process strength of welded joints are proposed, based on appropriate processing of acoustic emission data.*

Keywords*: technological strength, cold cracks, acoustic emission*

Инженерный подход к оценке склонности к замедленному разрушению, в рамках предложенных условий линейной механики разрушения, должен учитывать сопротивляемость как до образования трещины, так и сопротивляемость распространению трещины [1, 2], с учетом термодеформационных процессов, происходящих после сварки в сварном соединении. Однако существующие способы оценки технологической прочности сварных соединений позволяют лишь оценить влияние отдельных факторов на склонность к замедленному разрушению (ЗР) или имитируют только сварочный термодеформационный цикл. Поэтому внедрение дополнительных экспериментальных параметров, отражающих кинетику процесса возникновения и развития холодных трещин, является весьма актуальной задачей в области эксплуатационной надежности сварных соединений.

В настоящее время, задачи по повышению надёжности сварных соединений решаются путём усовершенствования сварочных технологий, применения неразрушающих методов диагностики и оптимизации систем контроля сварных соединений, а также разработкой научно-обоснованных подходов к выбору технологии сварки. Большинство существующих методов неразрушающего контроля требуют сканирования объекта, и как следствие имеют ограничения при проведении диагностики в режиме реального времени. Одним из решений поставленной задачи является применение метода акустической эмиссии (АЭ), с помощью которого возможно не только выявление активно развивающихся дефектов, но и произвести классификацию по степени опасности разрушения контролируемого объекта. Исходя из вышеуказанного, применение метода АЭ при оценке технологической прочности сварных соединений (ТПСС) является необходимым инструментом для анализа процессов деформации и

разрушения сварных соединений, позволяющим в режиме реального времени регистрировать параметры при возникновении и развитии холодных трещин.

Основными нормативными документами по оценке склонности сварных соединений к образованию холодных трещин в Российской Федерации, являются ГОСТ 26388-84, ГОСТ Р 56143-2014, ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012, в которых вошли методы испытаний на сопротивляемость углеродистых и легированных сталей в зоне термического влияния и металла шва образованию холодных трещин. В основу предлагаемых в данном стандарте машинных методов испытаний, приняты комплекс методов количественной оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин, разработанных в МВТУ им. Н. Э. Баумана технологические пробы ВМЭИ-МВТУ и Теккен, Лихай, а также методика Имплант (метод образцов-вставок), предложенная А. Гранжоном [3, 4, 5, 6].

Путем многолетних исследований и многочисленных экспериментальных работ в ИТПФ СО РАН было установлено, что обязательным условием разработки технологий сварки для высокопрочных сталей является проведение следующих мероприятий, отраженных на блок-схеме (рис. 1), где отражены все основные показатели оценки ТПСС.

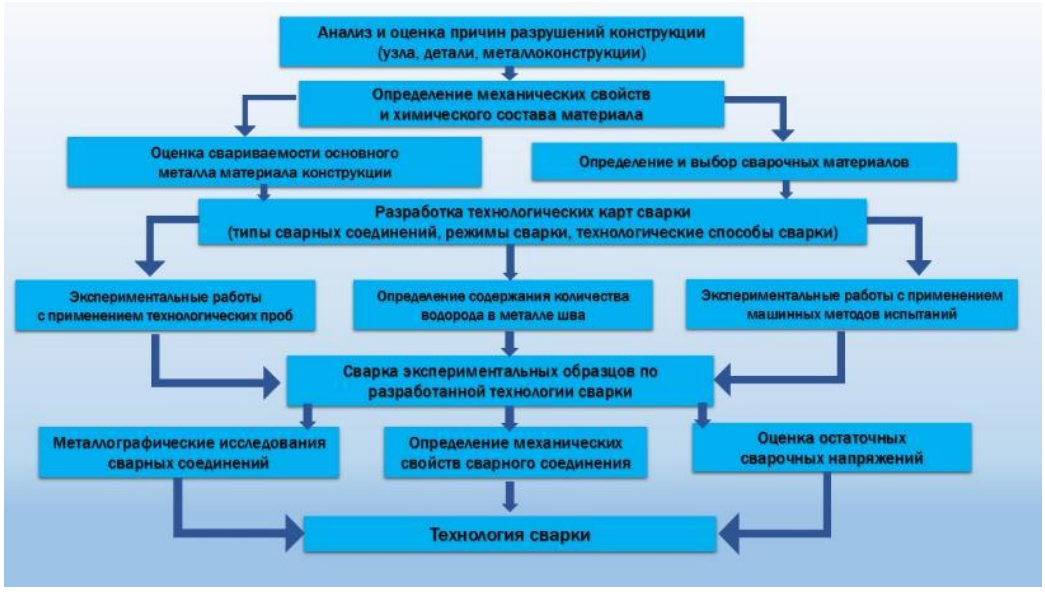


Рис. 1. Блок схема мероприятий при разработке технологии сварки

Анализ основ оценки технологической прочности сварных соединений из высокопрочных сталей, и отраженные мероприятия на рисунке 1, позволяют нам раскрыть суть направлений работ и сформулировать блок схему для проведения исследовательских работ, которые отражены на блок-схеме рисунка 2.

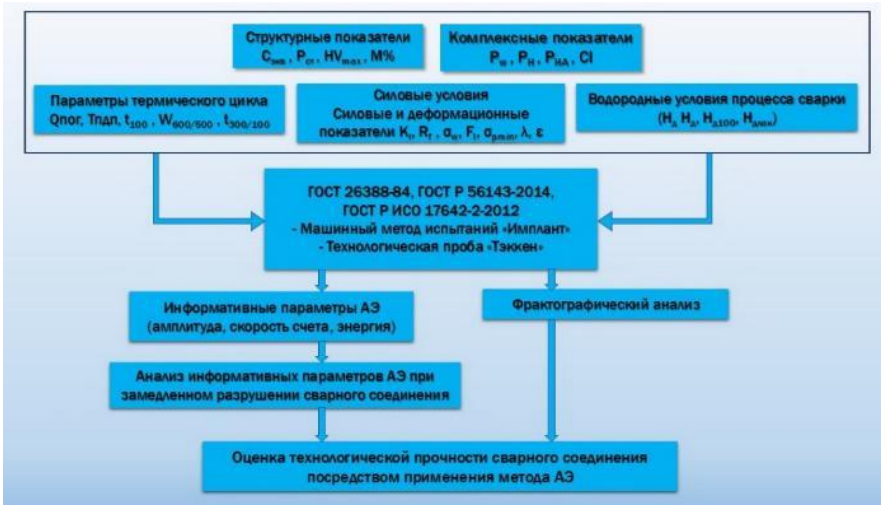


Рис. 2. Блок-схема проведения исследований при оценке технологической прочности сварного соединения высокопрочных сталей при замедленном разрушении

Как видно из вышеуказанного, оценка технологической прочности сварного соединения является многофакторной задачей, которая связана с проведением больших объемов экспериментальных работ и применения совокупности различных параметров, основанных на многолетних теоретических исследованиях в области обеспечения низкотемпературной прочности сварных соединений, и требует разработки комплексной оценки технологической прочности сварных соединений на основе предложенного подхода.

На основе предложенного подхода и с применением результатов предыдущих работ отдела «Сварки» [7], усовершенствована экспериментальная установка исследования склонности сварных соединений к замедленному разрушению на основе машинного метода «Имплант» по ГОСТ 26388-84, ГОСТ Р 56143-2014 [3,4] (рис. 3), которая позволяет изучить динамику развития микропластической деформации и регистрировать параметры сигналов акустической эмиссии.

Рис. 3. Установка ЗР сварных соединений методом «Имплант» после усовершенствования

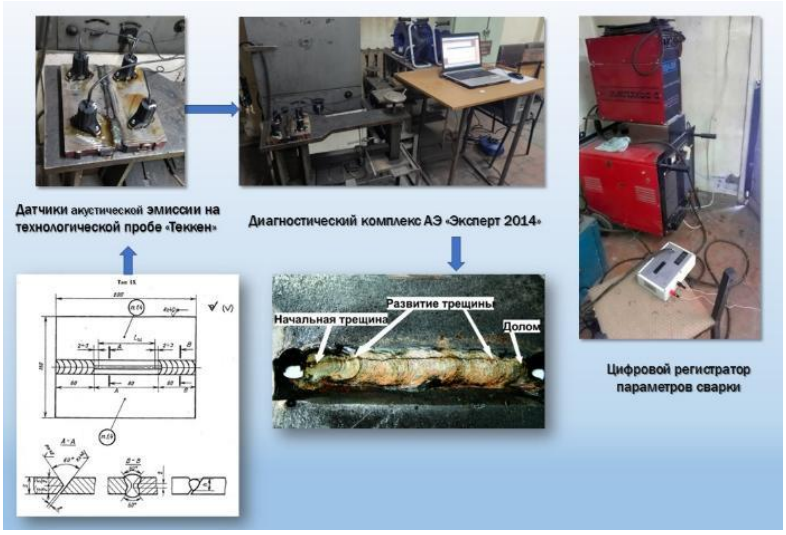


Рис. 4. Регистрация информативных параметров АЭ на технологической пробе «Теккен»

Также метод акустической эмиссии был применен при испытаниях на сопротивление развитию и возникновению холодных трещин на технологических пробах типа Тэккен по ГОСТ 26388-84, ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 [3, 5] (рис. 4), которая тоже позволяет следить за кинетикой развития или возникновения холодных трещин, в зависимости от технологических параметров сварки, вида типа применяемых материалов и условий окружающего воздуха.

При усовершенствовании экспериментальной установки ЗР методом «Имплант» и технологической пробы «Теккен» для получения дополнительных сведений о процессе разрушения были применены следующие современные цифровые средства измерений:

1. Метод акустической эмиссии при проведении исследований на ЗР позволяет производить регистрацию сигналов АЭ, а корректная интерпретация полученных данных, дает полное представление о кинетике развития процессов разрушения и деформации, с разрешающей способностью до 1 мкм [8]. Для регистрации сигналов АЭ применен диагностический комплекс «Эксперт-2014», позволяющий получать как амплитудные, так и энергетические характеристики сигналов акустической эмиссии.

2. Цифровой регистратор параметров сварки AWR-224МД дает возможность произвести измерения, отображения и записи значений напряжения дуги и силы тока при любых типах дуговой сварки. Измеренные параметры хранятся в энергонезависимой памяти и могут быть переданы в компьютер для просмотра и дальнейшей обработки.

3. Цифровой индикатор Vogel 0-50,8x0,01/0,001 мм измеряет перемещения образца-вставки «Имплант» в 1 мкм. Измерение перемещения образца-вставки позволяет оценить микропластическую деформацию в течении всего процессе разрушения. Для данного прибора была разработана специализированная программа на языке программирования Delphi, с возможностью получения кривых изменения перемещения в реальном времени и дальнейшем постобработки

На основе проведенного усовершенствования методик ТПСС был предложен следующий критериальный подход для оценки возникновения и развития холодных трещин для высокопрочных сталей при замедленном разрушении (ЗР).

1. По результатам анализа информативных параметров АЭ установлена, идентичность стадийности ЗР, как на технологических пробах «Тэккен» с внутренним приложением нагрузки, также на образцах «Имплант» с внешним приложением нагрузки. На основе установленной стадийности при ЗР получено отношение времен 1-й стадии ЗР к 2-й стадии ЗР и получили следующий коэффициент стадийности:

$$w = \frac{T_1}{T_2} \ (1),$$

где T1 – период времени 1-й стадии разрушения в сек., инкубационный период; T2 – период времени 2-й стадии разрушения в сек., время роста трещины;

Оценка результатов экспериментальных показала, что при значениях:

– W = от 0,2 до 0,4 разрушение происходит по замедленному типу разрушения сварного соединения;

– W = до 0,2 и от 0,4 разрушения происходят в основном при наличии недопустимых нагрузок на образец, внутренних сварочных дефектов, снижающих прочность сварного соединения (непровар, поры, закалочные структуры и т. д.), и являются менее продолжительными по сравнению с разрушением образцов при замедленном разрушении.

Данный подход позволит нам идентифицировать процесс замедленного разрушения сварных соединения.

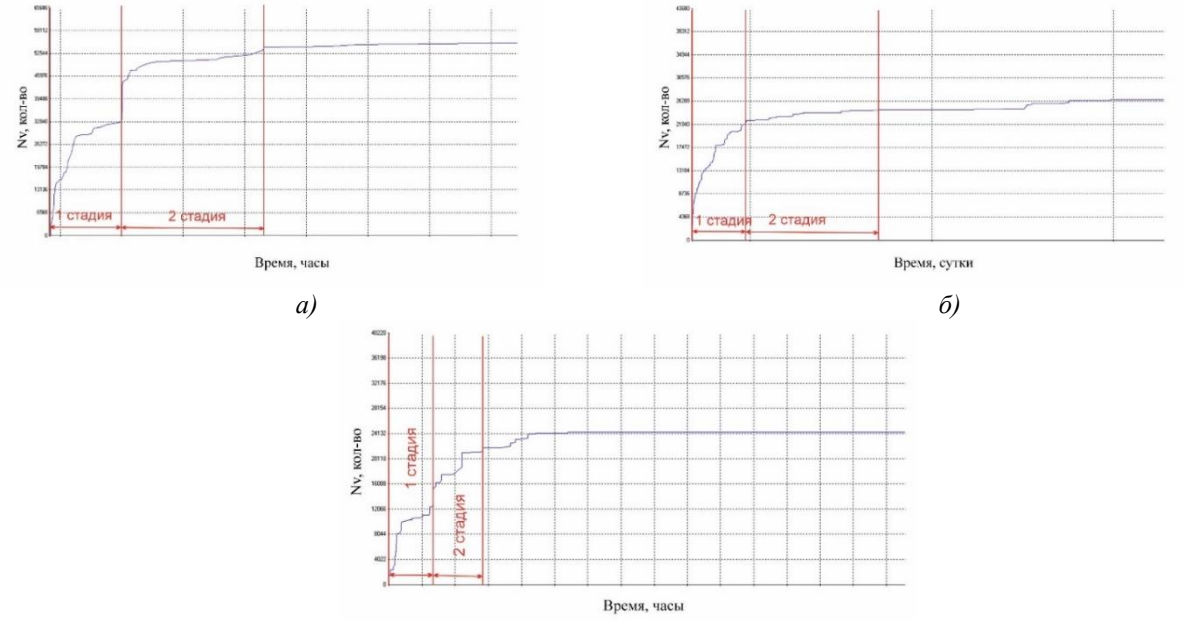


Рис. 4. Оценка коэффициента стадийности разрушения сварного соединения при замедленном разрушении на основе параметров АЭ: а) Стадийность разрушения сварного соединения при испытании методом «Имплант» W = 0, 32 – замедленное разрушение; б) Стадийность разрушения сварного соединения технологической пробы «Тэккен» W = 0,37 – замедленное разрушение; в) Стадийность разрушения сварного соединения технологической пробы «Тэккен» W = 0,97 – обнаружены сварочные дефекты в виде пор

2. Применив основной подход локально-динамического критерия (критерий Иванова-Быкова), применяемый сейчас в Руководстве по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения акустико-эмиссионного контроля» [9] для оценки состояния технического объекта, для ЗР сварного соединения получены следующие выражения:

$V_i = \left(1 + \frac{T_{i+1} - T_i}{T_{i+1}}\right)^4 - 1$ (2), где T_{i+1} – время от начала измерений до страгивания микротрещины, T_i – время от начала измерений до момента регистрации максимальных значений суммарного счета АЭ и энергии сигнала АЭ.

Для суммарного счета АЭ- сигналов получим

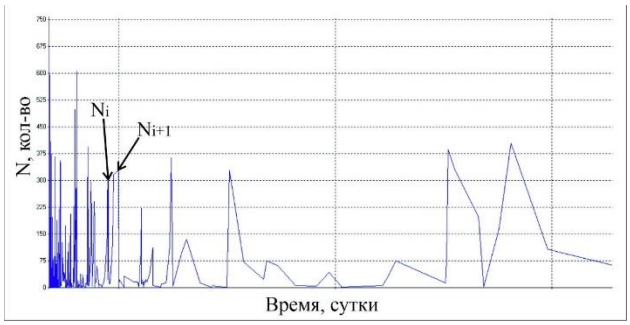
$R_{i+1}^N = \frac{N_{i+1}}{N_i}$ (3), где N_{i+1} число суммарного счета АЭ во время страгивания микротрещины, N_i – максимальное число суммарного счета АЭ до страгивания микротрещины.

Для энергии АЭ-сигналов получим

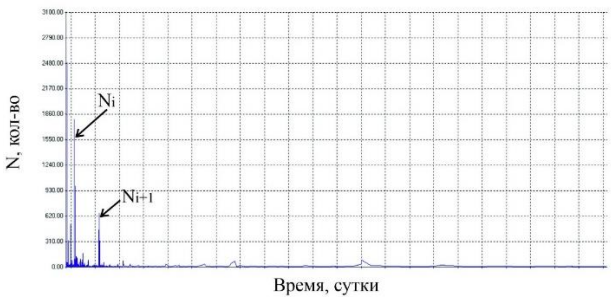
$R_{i+1}^E = \frac{E_{i+1}}{E_i}$ (4), где E_{i+1} – энергия сигнала АЭ во время страгивания микротрещины, E_i – максимальная энергия сигнала АЭ до страгивания микротрещины.

Используя классификацию источников АЭ по Руководству по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения акустико-эмиссионного контроля», их можно разделить их на следующие четыре класса (критериальных параметра):

1. Пассивный источник АЭ: R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) <<V_i – высокая прочность сварного соединения;
2. Активный источник АЭ: R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) ≈ V_i – средняя прочность сварного соединения;
3. Критически активный источник АЭ: R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) > V_i – низкая прочность сварного соединения;
4. Катастрофически активный источник АЭ: R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) >> V_i – возникновение или развитие трещины.



а) Замедленное разрушение на технологической пробе «Тэккен»: *Vi*=0,143; R_{i+1}^E =2,25 ; R_{i+1}^N =1,99 – R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) >> Vi – катастрофически активный источник АЭ



б) Регистрация сигналов АЭ на технологической пробе «Тэккен»: *Vi*=8,33; R_{i+1}^E =5,51; R_{i+1}^N =1,46 – R_{i+1}^N(или R_{i+1}^E) <<V_i – пассивный источник АЭ

Рис. 5. Оценка ТПСС по локально-динамическому критерию

Выводы. Усовершенствование методики оценки технологической прочности сварных соединений методом «Имплант» и с применением технологических проб «Тэккен» с помощью метода АЭ, позволяет следить за кинетикой развития замедленного разрушения в реальном времени и более точно определить предельные состояния сварного соединения.

Предложены новые критериальные подходы с использованием информативных параметров АЭ, для оценки технологической прочности сварных соединений, которые позволяют определить процесс разрушения и при соответствующей обработке данных оценить уровень технологической прочности сварного соединения.

Представленная методика позволит произвести оценку технологической прочности сварных соединений с учетом параметров, характеризующих свариваемость, водородные, силовые и деформационные условия при проведении сварки и позволит выйти на новый качественный уровень оценки технологической прочности сварного соединения при помощи современных средств измерения.

Список литературы

1. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей. – Ленинград: Машиностроение, 1986. 120 с.
2. Земзин В.Н., Ланин А.А., Медведев А.В. Влияние технологических факторов на сопротивляемость сталей повышенной прочности холодным трещинам // Сварочное производство. 1988. №12. С.26-28.
3. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образования холодных трещин при сварке плавлением. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 22 с.
4. ГОСТ Р 56143-2014. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 3. Испытания с приложением внешней нагрузки.
5. ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012. Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью.
6. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М: Машиностроение, 1981. 127 с.
7. Слепцов О.И., Михайлов В.Е., Петушков В.Г. и др. Повышение прочности сварных конструкций для Севера. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. 223 с.
8. Семашко Н.А., Шпорт В.И., и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. – М: Машиностроение, 2002. – 240 с.
9. Руководство по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения акустико-эмиссионного контроля».

УДК 621.791.461:678.029.43
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-94-98

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ПРИВАРКЕ СЕДЛОВОГО ОТВОДА К ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Старостин Н.П., Тихонов Р.С., Петров Д.Д.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: roman_tikhon@mail.ru

Аннотация. *Рассматривается приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе на открытом воздухе при низких температурах. В отличие от ранее исследованных видов сварки деталями с закладными нагревателями седловой отвод имеет сложную конфигурацию, что исключает использование разработанных методик определения параметров сварки, основанных на 2D моделировании теплового процесса. С помощью 3D математического моделирования теплового процесса предложены методики определения параметров при сварке в условиях низких температур на стадии предварительного подогрева и выравнивания температур. Показано, что распределение температур в конце выравнивания неоднородно. Тем не менее, границы зон термического влияния в конце нагрева по стандартному режиму при допустимой и низкой температуре практически идентичны.*

Ключевые слова: *Седловой отвод, приварка, предварительный подогрев, математическое моделирование, метод конечных элементов.*

STUDYING THE HEAT-AFFECTED ZONE BOUNDARIES WHEN WELDING A BRANCH SADDLE TO A POLYETHYLENE PIPE AT LOW TEMPERATURES

Starostin N.P., Tikhonov R.S., Petrov D.D.
Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

Abstract. *The welding of a branch saddle to a polyethylene pipe in open air at low temperatures is investigated. In contrast to previously studied electrofusion welding methods, the branch saddle's complex configuration prevents the application of established methods for determining welding parameters based on two-dimensional thermal process modeling. Three-dimensional mathematical modeling of the thermal process is employed to propose methods for determining welding parameters at low temperatures during the preheating and temperature equalization stages. The results indicate that the temperature distribution at the end of the equalization stage is non-uniform. Nevertheless, the boundaries of the heat-affected zones at the end of heating under standard conditions are nearly identical at both permissible and low temperatures.*

Keyword: *tapping saddle, welding, preheating, mathematical modeling, finite element method.*

Введение. Для сварки с закладными нагревателями используются различные фитинги: муфты, тройники, седловые и угловые отводы, редукционные переходы и т. д. Способ сварки полимерных труб при температурах воздуха ниже допустимых соединительными деталями с закладными нагревателями на примере сварки с помощью муфт предложен в работе [1]. Согласно этому способу сварка выполняется на открытом воздухе без использования для снижения скорости охлаждения слоя теплоизоляционного материала. Для сокращения времени кондиционирования до допустимой для сварки температуры производится предварительный подогрев до температуры немного ниже температуры размягчения материала трубы и фитинга, а затем выполняется выравнивание температур до достижения в зоне структурных изменений соединения температуры из допустимого для сварки интервала. Такой прием позволяет не только сократить время кондиционирования, но и выполнить нагрев (оплавление) по режиму сварки в нормальных условиях. На стадии охлаждения путем управления мощностью закладного нагревателя в зоне структурных изменений достигается динамика температурного поля, характерная для сварки при допустимой температуре.

Сварка с закладными нагревателями выполняется в автоматическом режиме. Параметры сварки при допустимых температурах считываются со штрих кода, имеющегося на каждом фитинге. Для сварки труб при низких температурах по предлагаемому способу необходимо разработать сварочный

аппарат, который реализует автоматически режимы сварки для всех существующих деталей с закладными нагревателями, распознавая тип сварной детали, геометрические размеры, сопротивление нагревателя и т. д. по штрих-коду. Для определения формул для вычисления параметров и функций сварки, вводимых в алгоритм сварочного аппарата, необходимо моделировать тепловой процесс сварки для всех типов деталей. При этом для более точного определения параметров сварки математические модели должны адекватно описывать тепловой процесс, учитывая наряду со свойствами материала и геометрические формы. По возможности упрощения математического описания сварные детали разделим условно на цилиндрические и бицилиндрические. Тепловой процесс сварки с помощью цилиндрических деталей можно описать двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах. К цилиндрическим отнесем муфты, редукционные переходы, заглушки, угловые отводы (пренебрегая изогнутость). К бицилиндрическим отнесем седловые отводы, ремонтные накладки, тройники. Тепловой процесс в них описывается трехмерным уравнением теплопроводности.

В настоящее время методики определения параметров и функций управления при сварке в условиях низких температур на основе математического моделирования тепловых процессов частично разработаны для сварки цилиндрическими деталями, в частности для электромуфтовой сварки. Для сварки билицилиндрическими деталями подобные методики не разработаны. Такое положение связано с тем, что для определения параметров и функций сварки бицилиндрическими деталями необходимо численное решение прямых и обратных задач теплопроводности в трехмерной постановке для тел сложной формы и большие затраты времени расчета. В случае сварки цилиндрическими деталями тепловой процесс описывается двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах. Прямые и обратные задачи для таких уравнений можно решить методом конечных разностей, эффективным для тел простой конфигурации [2]. Для бициндрических тел, имеющих сложную конфигурацию, использование метода конечных разностей не эффективно. Для определения динамики температурного поля при сварке бицилиндрическими деталями необходимо использование метода конечных элементов [3].

Целью данной работы является разработка методики определения параметров предварительного подогрева и выравнивания температур для приварки седловых отводов к полиэтиленовым трубам в условиях низких температурах на основе исследования границ зон термического влияния.

Моделирование теплового процесса приварки седлового отвода. Успех в определении параметров сварки при низких температурах во многом зависит от адекватности математической модели теплового процесса реальной динамике температурного поля. Для определения параметров сварки исследуемый объект замещается математической моделью, на котором исследуются различные варианты поведения температурного поля при варьировании параметрами сварки. Временное изменение температурного поля в седловом отводе на стадиях предварительного подогрева, выравнивания температур, нагрева и охлаждения описывается трехмерным уравнением теплопроводности в декартовых координатах:

$$\left(C(T) + \rho^{-} L^{100\%} \frac{\partial X_C}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = div\left(\lambda(T) gradT \right) + Q(t)\gamma, \quad (1)$$

$$x \in D, 0 < t \le t_m, \gamma = 1, (r,z) \in S; \gamma = 0, (r,z) \notin S,$$

с начальным условием:

$$T(r,\varphi,z,0) = T_0, \quad (2)$$

граничными условиями конвективного теплообмена с окружающей средой на свободных поверхностях Г трубы и седелки:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma} = \alpha_0 \left(T\big|_{\Gamma} - T_0 \right), \quad (3)$$

и условием, соответствующим симметрии температурного поля на Γ_T:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_T} = 0. \quad (4)$$

На стадиях нагрева и охлаждения в силу большой скорости движения границы плавления и кристаллизации фазовый переход происходит в двухфазной зоне, в которой присутствует как твердая, так и жидкая фаза. В интервале температур от T_{c1} до T_{c2} доля твердой фазы (степень кристалличности) меняется от некоторого предельного значения X_C^{∞} до нуля. Для учета поглощения и выделения скрытой теплоты плавления и кристаллизации полиэтилена вводится эффективная теплоемкость, зависящая от температуры и степени кристалличности X_C [4–5]:

$$C(T) = c(T) + \rho^{-} L^{100\%} \frac{\mathrm{d}X_C(T)}{\mathrm{d}T}, \; c(T) = c^{+} + X_C(T)\left(c^{-} - c^{+}\right). \tag{5}$$

Здесь *c(T)* – зависимость объемной теплоемкости от температуры; X_C – степень кристалличности; c^{-}, λ^{-} и c^{+}, λ^{+} – объемная теплоемкость и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала свариваемых тел соответственно, ρ^{-} – плотность твердой фазы. X_C^{∞} – предельная степень кристалличности трубного полиэтилена в нормальных условиях.

Зависимость степени кристалличности от температуры определяется по кривым теплового потока $q(T)$, регистрируемым дифференциальным сканирующим калориметром:

$$X_C(T) = \begin{cases} X_C^{\infty}, & T \le T_{c1}, \\ X_C^{\infty} - \dfrac{\int_{T_{c1}}^{T} q(u)du}{L^{100\%} v_T}, & T_{c1} < T < T_{c2}, \\ 0, & T \ge T_{c2}, \end{cases} \tag{6}$$

На стадии выравнивания температур закладной нагреватель выключен, т. е. мощность $Q(t)=0$.

Подобные задачи для тел сложной конфигурации, каковым является соединение седелки к трубе, эффективно решаются методом конечных элементов. Уравнение (1) с начальным и граничными условиями решалось методом конечных элементов (объемов). Построение вычислительной области D и ее триангуляция выполнялась с использованием программы Gmsh [6]. Для численной реализации вычислительного алгоритма использовалась программа свободного доступа Dolfin/FEniCS [7].

Исследование границ ЗТВ. Ранее расчет температурного поля предварительного подогрева седелки и трубы в условиях низких температур был выполнен в случая теплоизоляции внешних поверхностей [8]. Подогрев без использования теплоизоляции выполняется в условиях интенсивной теплоотдачи в окружающую среду с низкой температурой. В таких условиях достаточно трудно получить однородное распределение температуры в зонах сварного шва и термического влияния. Тем не менее, будем определять параметры подогрева и выравнивания температур из условия обеспечения при нагреве в режиме, регламентированном для выполнения соединения в нормальных условиях, границ, зоны термического влияния, свойственных при приварке в условиях допустимых температур.

Рассмотрим приварку седлового отвода 110/63 к полиэтиленовой трубе ПЭ 100 диаметром 110 мм SDR 11. Схема сборки седелки и трубы представлена на рис. 1. Расчеты проводились при следующих исходных данных: $\lambda^{-} = 0{,}34$; $\lambda^{+} = 0{,}24$ Вт/(м·°С); объемные теплоемкости $c^{-} = 1{,}75 \cdot 10^6$; $c^{+} = 1{,}85 \cdot 10^6$ Дж/(м^3·°С), $L^{100\%}$=293 Дж/г.

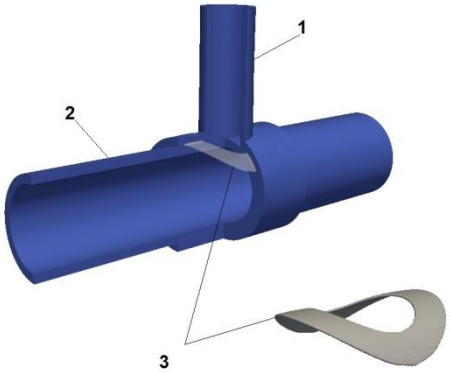


Рис. 1. Схема седелки и участка трубы:
1 – седелка; 2 – труба; 3 – нагревательный элемент

Подогрев осуществляется закладным нагревателем до достижения максимальной температуры 60 °С, чтобы не допустить размягчения материала. Методом локальных вариаций определены следующие параметры: мощность закладного нагревателя Q= 24 Вт, время подогрева $t_п$= 20 минут и время

выравнивания температур $t_в$= 1 мин. В результате выполненных операций получены распределения температур по сечению стенок седлового отвода и трубы, представленное на рис. 2. Кривыми белого цвета представлены изотермы 20 °С. После выравнивания рассматриваемая изотерма сдвигается, расширяя область подогрева. Максимальная температура в сборке снижается с 60 °С до 35 °С (рис. 2*б*).

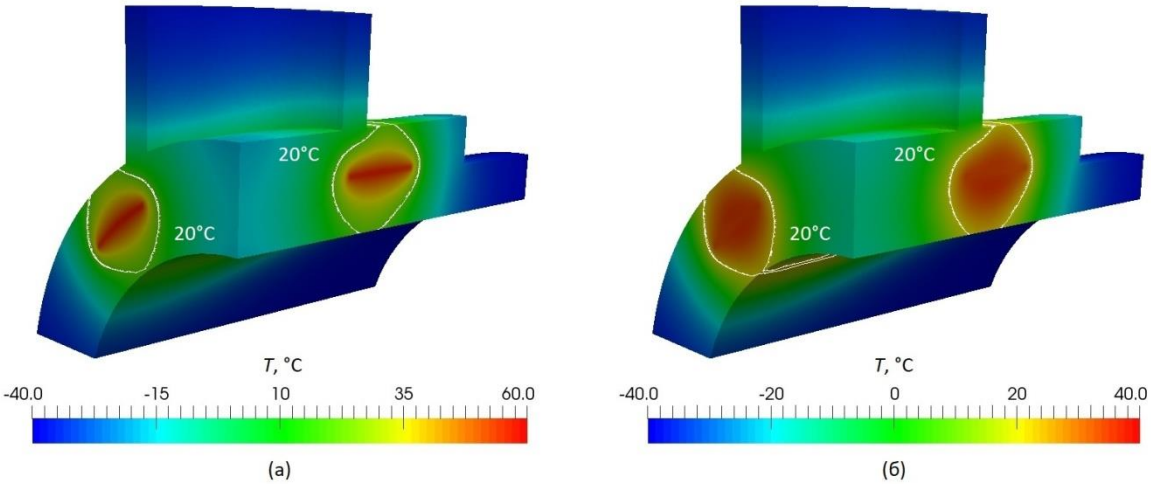


Рис. 2. Распределение температуры в сечении стенок седлового отвода и трубы в конце подогрева *а)* и выравнивания температуры *б)*

Естественно, при подогреве с помощью закладного нагревателя распределение температуры в стенках сварной детали и трубы получается сильно неоднородной в силу низкой теплопроводности полиэтилена. Тем не менее, температуры в пределах зоны термического влияния сварки в нормальных условиях изменяются в интервале допустимых для сварки.

На рис. 3 представлены границы зон термического влияния (изотермы 120 и 140 °С в конце нагрева) при сварке в нормальных условиях и низкой температуре по предлагаемой технологии в конце стадии нагрева по режиму стандартной сварки.

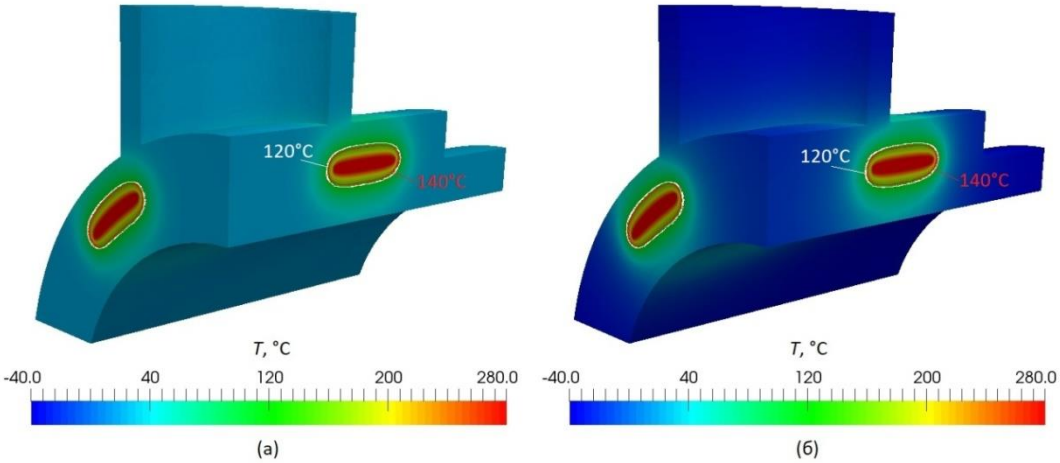


Рис. 3. Распределение температурного поля в сечении стенок седлового отвода и трубы в конце нагрева по стандартному режиму при температуре окружающего воздуха +20 °С *а)* и при низкой температуре –40 °С *б)* с предварительным подогревом и выравниванием температур

Идентичность границ зон термического влияния свидетельствует о получении одинаковых объемов расплава. Для обеспечения формирования близких по размерам надмолекулярных образований необходимо обеспечить при низкой температуре воздуха движение фронта кристаллизации, свойственной при сварке в нормальных условиях. Это достигается путем управления кристаллизацией путем изменения во времени мощности нагревателя, определяемой решением достаточно сложной нелинейной обратной задачи теплопроводности.

Благодарность. *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 122011100162-9.*

Список литературы

1. Способ сварки полимерных труб соединительными деталями с закладными нагревателями: пат. 2849117 Рос. Федерация: МПК F16L 47/03 B29C 65/34 / Старостин Н.П., Аммосова О.А., Петров Д.Д., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Тихонов Р.С., Николаева В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». – № 2025109018; заявл. 11.04.2025; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 30.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. 318 с.
4. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980. 180 с.
5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. Москва: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
6. Программа GMSH. http://geuz.org/gmsh/ (дата обращения: 27.10.2025)
7. Библиотека FEniCS. http://fenicsproject.org/ (дата обращения: 27.10.2025)
8. Старостин Н.П., Васильева М.А., Ботвин Г.В. Приварка седловых отводов к полиэтиленовым трубам при низких температурах // Сварка и диагностика. 2019. №1. С. 47-53.

УДК 621.791.053.6
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-99-102

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛИ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Степанова К.В.[1], Слепцов О.И.[1], Слепцов Г.Н.[1], Солдатов К.В.[1], Степанов В.Е.[2], Сивцева А.В.[1]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
обособленное подразделение «Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН»
[2]ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет»
E-mail: ksenia81@mail.ru

Аннотация. *В статье приведены результаты исследований микроструктуры и механических свойств металла шва, модифицированного природным концентратом редкоземельных элементов из Томторского редкометального месторождения. Показано, что структурные изменения, происходящие при введении комплексного модификатора в шихту покрытых высокопрочных электродов АНП-2 типа Э70, приводят к повышению ударной вязкости металла шва на 15% при положительной температуре испытаний, и на 50% в диапазоне испытаний от -40 до -60°С.*

Ключевые слова: *микроструктура, механические свойства, редкоземельные элементы, сварные соединения, хладостойкость.*

EFFECT OF MICROALLOYING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WELD METAL OF HIGH-STRENGTH STEEL AT MANUAL ARC WELDING

Stepanova K.V.[1], Sleptsov O.I.[1] Sleptsov G.N.[1], Soldatov K.V.[1], Stepanov V.E.[2], Sivtseva A.V.[1],
[1]Federal research center «Yakut scientific centre of the Siberian Branch of the RAS» separate division
V.P. Larionov institute of the physical-technical problems of the North of the Siberian branch of the RAS
[2]Federal state budgetary educational institution of higher education «Arctic state agrotechnological university»

Abstract. *The article presents the results of studies on the microstructure and mechanical properties of weld metal modified with a natural concentrate of rare-earth elements from the Tomtor rare-metal deposit. It is shown that the structural changes that occur when a complex modifier is added into the charge of coated high-strength ANP-2 type E70 electrodes lead to a 15% increase in the impact toughness of the weld metal at positive test temperatures, and a 50% increase in the test range from –40 to –60 °C.*

Keywords: *microstructure, mechanical properties, rare earth elements, welded joints, cold resistance.*

Введение. Хладостойкость сварного шва (т. е. его способность сохранять пластичность и вязкость при низких температурах) – важнейшая характеристика при эксплуатации конструкций в условиях Севера и Арктики. Повышение хладостойкости металла сварного шва достигается за счет совокупности металлургических, технологических и термических приемов [1]. В данной работе выбран металлургический путь повышения.

Как известно, введение соединений редкоземельных элементов, таких как церий, лантан, неодим, празеодим, иттрий и др., положительно влияет на ударную вязкость сварных соединений из низколегированных сталей при испытаниях на холоде [2–4].

В работе показано, что повысить качество сварных соединений при низких климатических температурах до –60°С можно путем модифицирования металла шва природным концентратом одного из крупнейших в мире по запасам редких и редкоземельных металлов Томторского редкометального месторождения.

Модифицирование металла шва осуществлено посредством применения опытных сварочных электродов типа Э-70, изготовленных методом нанесения легирующей добавки вторым слоем на промышленные электроды.

Целью работы является оценка влияния природного концентрата с редкоземельными элементами на структуру и свойства металла сварного шва при ручной дуговой сварке стали 10ХСНД.

Методика экспериментов. В качестве основного металла для сварных соединений была выбрана сталь 10ХСНД повышенной прочности, с высокими показателями ударной вязкости и повышенными характеристиками сопротивления хрупкому разрушению, при низких температурах. Сталь

10ХСНД является широко применяемой в Якутии для строительства несущих элементов конструкций ответственного назначения до –70 °С, к которым предъявляются требования повышенной прочности, коррозионной стойкости, низкой чувствительности к концентраторам напряжений, требование низкой температуры перехода в хрупкое состояние [5].

В качестве сварочных электродов были выбраны электроды типа Э70 марки АНП-2 фирмы ООО «Судиславский завод сварочных материалов» диаметрами 3 мм и 4 мм, предназначенные для сварки конструкций из легированных сталей с пределом текучести 590–790 МПа. Электроды АНП-2 являются низководородистыми электродами, с минимальным разрушающим напряжением равным 450–500 МПа.

Доля комплексной модифицирующей добавки в шихте составляет 5% от общей массы обмазки. Добавка содержит лантан, церий, неодим, празеодим, ниобий, кремний, титан, алюминий, железо, кальций и т. д.

Опытные электроды были получены по разработанному способу модифицирования редкоземельными металлами сварочных электродов. Сварочный электрод погружается в сосуд с готовой модифицирующей смесью, приводится во вращение электродвигателем с постоянной скоростью, после нанесения покрытия вынимается из сосуда и помещается в сушильную конструкцию при комнатной температуре.

Несомненным преимуществом предлагаемого способа является сокращение количества оборудования, которое исключает использование крупногабаритных гидравлических устройств, а именно брикетировочного и обмазочного прессов.

Рис. 1. Покрытые опытные электроды АНП-2 типа Э70

Модифицированными электродами получены сварные соединения из пластин стали марки 10ХСНД толщиной 10 мм. Режимы ручной дуговой сварки следующие: корневой шов выполнен опытными электродами Ø3 мм, при I=80А, U=24В; заполняющий и облицовочный швы выполнены опытными электродами Ø4 мм, при I= 140-160А, U=28В. Многопроходную сварку образцов производили при комнатной температуре, в нижнем пространственном положении, на постоянном токе обратной полярности на сварочном аппарате Tigtronic 305. Погонная энергия представлена в интервале от 1,64 до 2,09 кДж/мм при сварке электродами диаметром 4 мм и в интервале от 0,63 до 0,79 кДж/мм при сварке электродами диаметром 3 мм.

Ударная вязкость определена в интервале температур от −60°С до +20°С на маятниковом копре «Amsler RKP 450». Образцы имели V-образные надрезы в зоне металла шва. Статическое растяжение образцов проведено на универсальной электромеханической испытательной машине «Zwick/Roell Z600E».

Металлографические исследования проведены с помощью оптического микроскопа Nim 8 с мультимедийной насадкой в соответствии с ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» на микрошлифах в плоскости поперечного сечения после травления в спиртовом растворе азотной кислоты.

Микротвердость структурных составляющих металла сварного шва определена согласно ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников» на твердомере Leco LM 700 при нагрузке на индентор 100 г со временем выдержки 20 с.

Результаты и обсуждение. В результате испытаний на ударный изгиб выявлено, что введение комплексной модифицирующей добавки в покрытие сварочного электрода АНП-2 типа Э70 способствует повышению значений ударной вязкости металла шва: при положительных температурах испытаний на 15%, при отрицательных – на 50% (рис. 2).

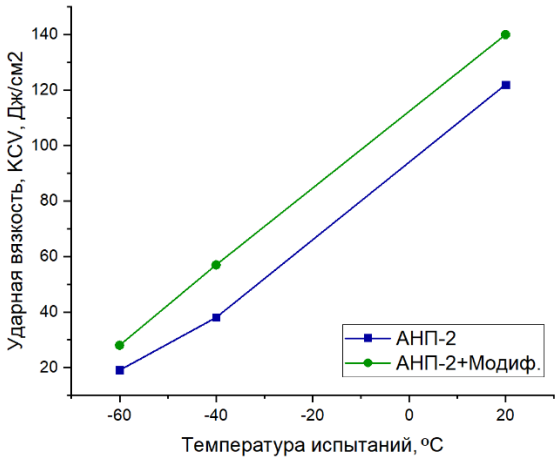
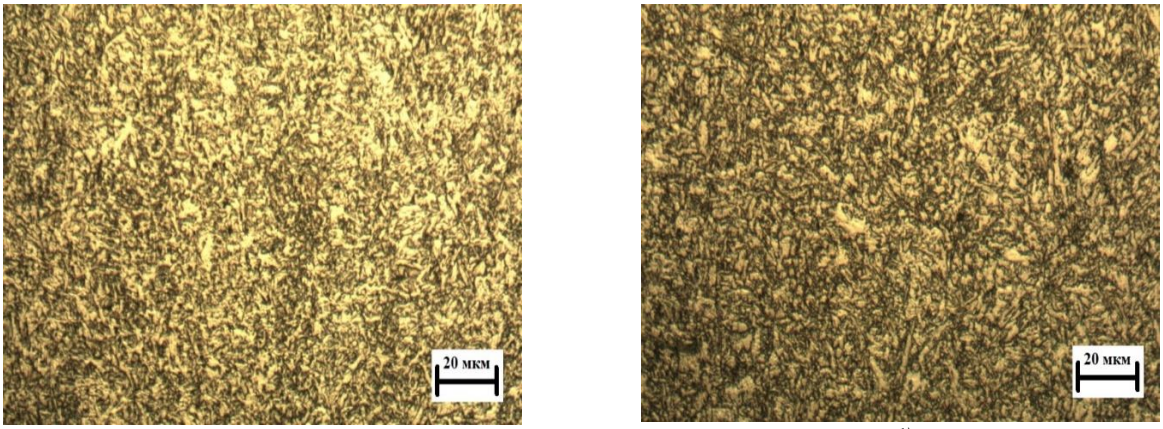


Рис. 2. Изменение ударной вязкости металла шва АНП-2 и опытных электродов в зависимости от температуры испытаний

Структура металла шва в зоне облицовочного верхнего шва, полученного электродами АНП-2 и опытными электродами представлена на рис. 3. Сварной шов без модификаторов имеет столбчатое строение, по границам дендритов расположены участки полигонального феррита. В матрице дендритов (рис. 3 а) можно наблюдать игольчатые фазы с размерами в диапазоне от 0,4 до 3.57 мкм (в среднем ≈1,73). Значение микротвердости в зоне шва равно 221 HV. Мелкозернистое строение шва АНП-2 обусловлено химическим составом шихты электрода, в рецептуру которого вводят легирующие элементы никель, марганец, хром, кремний и т. д. Строение модифицированного сварного шва мелкозернистое и равномерное (рис. 3 б). Ярко выраженных дендритов не зафиксировано, игольчатые образования (рис. 3 б) имеют толщину в пределах от 0,5 до 3,55 мкм (среднее значение ≈ 1,63). Микротвердость в зоне мелкодисперсных игл равна 193 HV. Измельчение зерна в модифицированном сварном шве способствовало повышению значений ударной вязкости как при положительных, так и при отрицательных температурах испытаний. Повышение пластичности металла шва, полученного модифицированными электродами на базе АНП-2, связано с формированием в металле шва равномерной структуры без выраженной столбчатости с малой долей полигонального феррита.



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура сварного шва, выполненного электродами АНП-2 *а)* и электродами, содержащими модификатор *б)*. х500

Опираясь на результаты проведенных металлографических исследований, можно заключить, что введение модификатора в покрытие сварочных электродов АНП-2 типа Э70 повлияло на образование в металле шва мелкодисперсной однородной структуры с уменьшенной долей дендритных кристаллитов, что говорит о повышении механических свойств полученных сварных соединений.

Выводы. Повышение пластичности металла шва, полученного модифицированными электродами типа Э70 АНП-2 связано с формированием в металле шва равномерной структуры без выраженной столбчатости с малой долей полигонального феррита.

Структурные изменения, происходящие при введении модификатора в шихту покрытых высокопрочных электродов АНП-2 типа Э70, приводят к повышению ударной вязкости металла шва на 15% при положительной температуре испытаний, и повышению ударной вязкости металла шва на 50% в диапазоне испытаний от –40 до –60°С.

Список литературы

1. Соколов Г.Н., Литвинова Т.Р., Зорин И.В. и др. Формирование дисперсного игольчатого феррита в структуре хладостойких сварных швов в условиях температур до -70°С при ручной дуговой сварке на монтаже металлоконструкций из стали 10ХСНД. Часть 1 // Вопросы материаловедения. 2020. № 2(102). С. 17–29. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-102-2-17-29.
2. Ефименко Н. Г. Редкоземельные металлы в сварочных материалах. – Харьков: Коллегиум, 2017. – 188 с.
3. Ефименко Н.Г. Комплексная оценка влияния иттрия на свойства сварных швов сталей // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 24–27.
4. RU 2387525 МПК B23K 35/365 (2006.01), 2010.
5. Молева Д.А., Белозор М.Ю. Обоснование применения сталей для изготовления конструкций мостов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 4. Т. 2. – С.28-31.

СЕКЦИЯ 2. ФИЗИКА И МЕХАНИКА ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, НАДЕЖНОСТЬ, ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС, БЕЗОПАСНОСТЬ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА. КИНЕТИКА ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ВЯЗКО-ХРУПКИЙ ПЕРЕХОД В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ

УДК 539.42
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-103-105

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРАХ, СТАЛЯХ

Алексеев А.А., Сыромятникова А.С., Большев К.Н.
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: spinor03@gmail.com

Аннотация. *Выполнен анализ закономерностей, критериев и механизмов ветвления трещины. Проведены экспериментальные работы по исследованию ветвления трещины в хрупком полимере и стали, измерению скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос. Предложен гипотеза физического механизма ветвления трещины.*

Ключевые слова: *ветвление трещины, закономерности, механизмы разрушения, полимер, сталь*

EXPERIMENTAL STUDY OF CRACK BRANCHING REGULARITIES IN POLYMERS, STEELS

Alekseev A.A., Syromyatnikova A.S., Bolshev K.N.
Yakut Scientific Center SB RAS

Abstract*. The regularities, criteria, and mechanisms of crack branching are analyzed. Experimental work has been carried out to study the branching of cracks in brittle polymer and steel, and to measure the crack velocity by breaking conductive strips. A hypothesis of the physical mechanism of crack branching is proposed.*

Keywords: *crack branching, regularities, fracture mechanisms, polymer, steel*

Одной из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения твердого тела является ветвление трещины, которое наблюдается в таких кристаллических и аморфных материалах, как стекло, сталь, алюминий, полимеры и скальные породы [1–4].

Для экспериментального исследования закономерностей перехода от прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления в полимерах были проведены серии испытаний на растяжение плоских образцов из полиметилметакрилата (ПММА) размерами 120×120 мм, шириной 4 мм с одним боковым надрезом глубиной 3 мм на универсальной разрывной машине «Instron» при температуре 20 ˚С и –40 ˚С [5]. В металлах были проведены серии испытаний на разрушение внутренним давлением цилиндрических сосудов из стали 45 с искусственно нанесенными поверхностными концентраторами напряжений. С помощью тензодатчиков, датчиков перемещения регистрировали деформацию в трех направлениях, а с помощью термопар, барорезисторов – температуру внутри и снаружи сосуда, давление внутри сосуда [6–7]. После разрушения образцов ПММА, стальных сосудов было проведено исследование поверхности разрушения с использованием растрового электронного микроскопа XL-20 Philips в режиме вторичных электронов [5–7].

По результатам экспериментальных работ, установлены следующие общие закономерности распространения трещины, перехода к ветвлению трещины в полимерах – ПММА, металлах – сталь 45:

– режим распространения трещин в ПММА зависит от уровня разрушающего напряжения σ_p: при значениях σ_p=12-13 МПа трещина распространяется с искривлением траектории без образования

микроветвей; при повышении уровня σ_p формируются микроветви с углом α=15–35°к основной трещине; при σ_p>17 МПа наблюдается разделение трещины на две ветви с углом β =23–52°, при этом процесс разрушения сопровождается формированием микроветвей;

– режим распространения трещин в стальных сосудах зависит от уровня номинального разрушающего напряжения σ_p: при σ_p<422 МПа трещина распространяется прямолинейно, без ветвления; при σ_p>444 МПа наблюдается разделение трещины на две ветви;

– расстояния от надреза до начала формирования первой микроветви v, до точки ветвления трещины L зависят от σ_p: чем выше σ_p, тем ближе к надрезу формируются микроветви и уменьшается L (рис. 1);

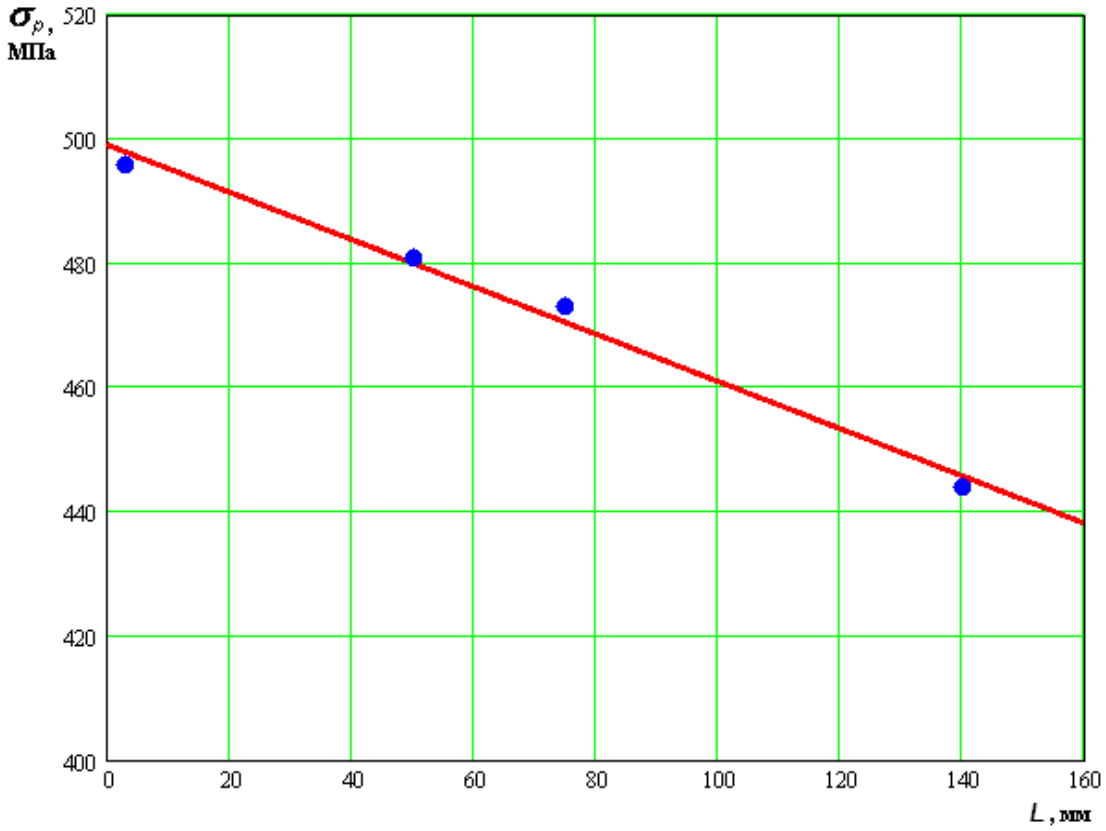


Рис. 1. Зависимости σ_p от расстояния от надреза до точки ветвления трещины L в стали

– процесс разрушения пластин из ПММА и сосудов из стали 45 с ветвлением трещин сопровождается формированием микроветвей (боковых ветвей) как до, так и после ветвления основной трещины. Микроветви занимают часть толщины образца и имеют клиновидную форму, острие клина выходит на боковую поверхность образца. Клиновидная форма микроветви формируется из-за реализации плоского напряженного состояния при выходе микроветви на свободную поверхность. С началом формирования микроветвей траектория трещины отклоняется от прямолинейной, микроветви длиной λ составляют с основной трещиной углы α. Значения α и λ для ПММА равны α = 15 – 35° и λ = 2 – 30 мм, а для стали 45 – α = 8 – 10°, λ = 2 – 130 мм (рис. 2).

- когда микроветвь занимает всю ширину пластины, происходит разделение трещины на две равноправные ветви (ветвление трещины) с углом β = 23 – 52° и β = 40 – 60° для ПММА и стали (рис. 2).

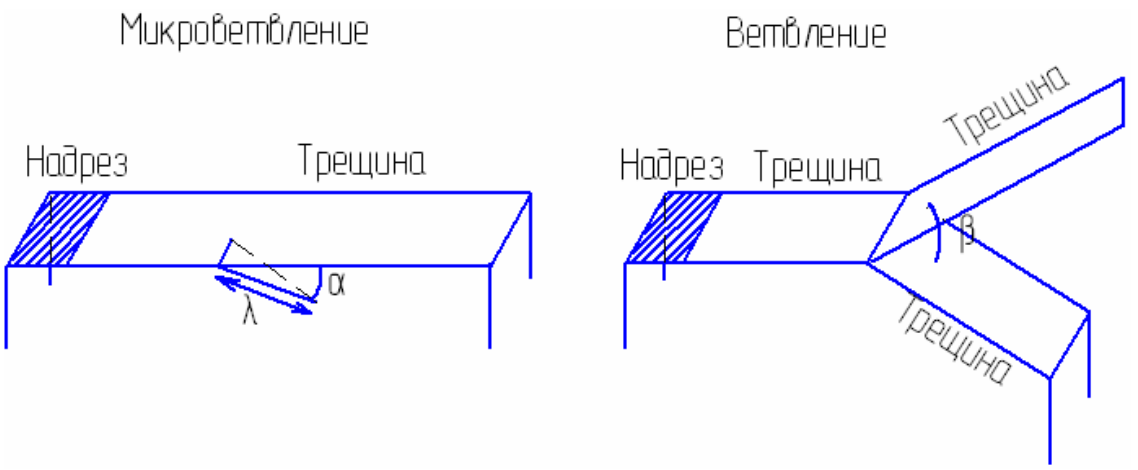


Рис. 2. Микроветвление, ветвление трещины

Таким образом, показано, что при ветвлении трещины в аморфных (ПММА), кристаллических (сталь) материалах, имеются общие макроскопические закономерности:

– ветвление происходит при достижении критического уровня разрушающего напряжения σ^*, причем с повышением σ^* уменьшается расстояние от надреза до точки ветвления трещины;

– процесс разрушения сопровождается формированием микроветвей, занимающих часть толщины образца, как до, так и после ветвления основной трещины, при этом траектория трещины отклоняется от прямолинейной;

– разделение одиночной трещины на две расходящиеся под углом 30-60^0 ветви происходит, когда ширина ветви (микроветви) становится равной толщине пластины или оболочки;

Список литературы

1. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
2. Ravi-Chandar K., Knauss W.G. An experimental investigation into dynamic fracture. III. On steady-state crack propagation and crack branching. International Journal of Fracture. 1984. №26. P. 141-154.
3. Sharon E., Fineberg J. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials. Physical Review B. 1996. V.54, №10. P. 7128-7139.
4. Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
5. Сыромятникова А.С., Алексеев А.А., Левин А.И. и др. Механизмы разрушения полимерного материала при распространении и ветвлении трещины // Деформация и разрушение материалов. 2008. №2. С.33-39.
6. Алексеев А.А., Левин А.И., Сыромятникова А.С. и др. Ветвление трещины при разрушении цилиндрических оболочек из углеродистой стали внутренним давлением // Деформация и разрушение материалов. 2008. №12. С. 33-39.
7. Сыромятникова А.С., Алексеев А.А., Левин А.И., Лыглаев А.В. Ветвление трещины в углеродистой стали. Механизмы разрушения // Деформация и разрушение материалов. 2009. №2. С. 25-30.

УДК 539.42
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-106-108

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПОЛИМЕРАХ, СТАЛЯХ

Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С., Иванов А.Р.
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: spinor03@gmail.com

Аннотация. *Для экспериментального определения скорости ветвления трещины проведены серии испытаний образцов из ПММА на растяжение при разных температурах, на разрушение внутренним давлением стальных тонкостенных цилиндрических оболочек (сосудов) с измерением скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос. Создана измерительная установка на основе прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон», соединенного с компьютером. Проведены измерения скорости трещины при прямолинейном распространении трещины и при ветвлении трещины.*

Ключевые слова: *ветвление трещины, скорость трещины, ПММА, стальные сосуды*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CRACK BRANCHING SPEED IN POLYMERS, STEELS

Alekseev A.A., Bolshev K.N., Syromyatnikova A.S., Ivanov A.R.
Yakut Scientific Center SB RAS

Abstract*. To experimentally determine the rate of crack branching, a series of tensile tests of PMMA samples were carried out at different temperatures, for fracture by internal pressure of thin-walled cylindrical steel shells (vessels) with crack velocity measurement by the method of rupture of conductive strips. A measuring system has been created based on a precision signal converter for resistance thermometers and thermoparks «Tercon» connected to a computer. The crack velocity was measured during rectilinear crack propagation and during crack branching.*

Keywords: *crack branching, crack speed, PMMA, steel vessels*

Ветвление трещины, является процессом, которое наблюдается в различных материалах, однако, нет общепринятого критерия ветвления трещины, до конца не установлен физический механизм перехода трещины от прямолинейного распространения к ветвлению [1–6].

Для исследования ветвления трещины, измерения скорости трещины на различных этапах распространения, ветвления трещины в полимерах, были проведена серия испытаний образцов из ПММА на растяжение при разных температурах, на образцы с одного торца в средней части наносился боковой надрез глубиной 3 мм и шириной 1,5 мм фрезерным инструментом, производилось испытание на растяжение образца до разрушения в разрывной машине «Instron» [7]. В металлах были проведены серии испытаний на разрушение внутренним давлением стальных тонкостенных цилиндрических оболочек (сосудов) из стали 20, изготовленных из бесшовной трубы длиной 1500 мм, диаметром 159 мм с толщиной стенки 5 мм, с приваренными сферическими днищами толщиной 5 мм. В центральной части оболочки, наносился искусственный дефект – продольный надрез глубиной, шириной по 1,5 мм, длиной 50 мм. Нагружение сосуда внутренним давлением осуществлялось в результате расширения замерзающей воды – наполненный жидкостью и герметизированный сосуд охлаждался при отрицательной температуры до разрушения. Для определения скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос, создана установка на основе быстродействующей платы АЦП для шины PCI ЛА-н10М8-100 и прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон», соединенных с компьютером [8].

Были проведены две серии испытаний на растяжение плоских образцов из полиметилметакрилата (ПММА) на разрывной машине «Instron» при температурах +20 ˚С и –60 ˚С с измерением скорости трещины. При +20° С трещина распространялась прямолинейно в плоскости, перпендикулярной направлению максимальных растягивающих напряжений; разрушающие напряжения составляли 10 МПа. Измерения скорости трещины показали следующее: зеркальная и матовая зоны поверхности разрушения соответствуют невысоким значениям скорости трещины (144–373 м/с), перьевая зона соответствует скоростям 418–454 м/с, ветвление трещины произошло при скорости около 500 м/с. При –

60° С разрушение происходит при более высоких разрушающих напряжениях 20–30 МПа, трещина распространялись от надреза прямолинейно на расстояние 12–15 мм до точки ветвления при скорости около 750 м/с, после которой разрушение происходило путем множественного ветвления и параллельного движения фронта нескольких трещин при скоростях 750–920 м/с (рис. 1).

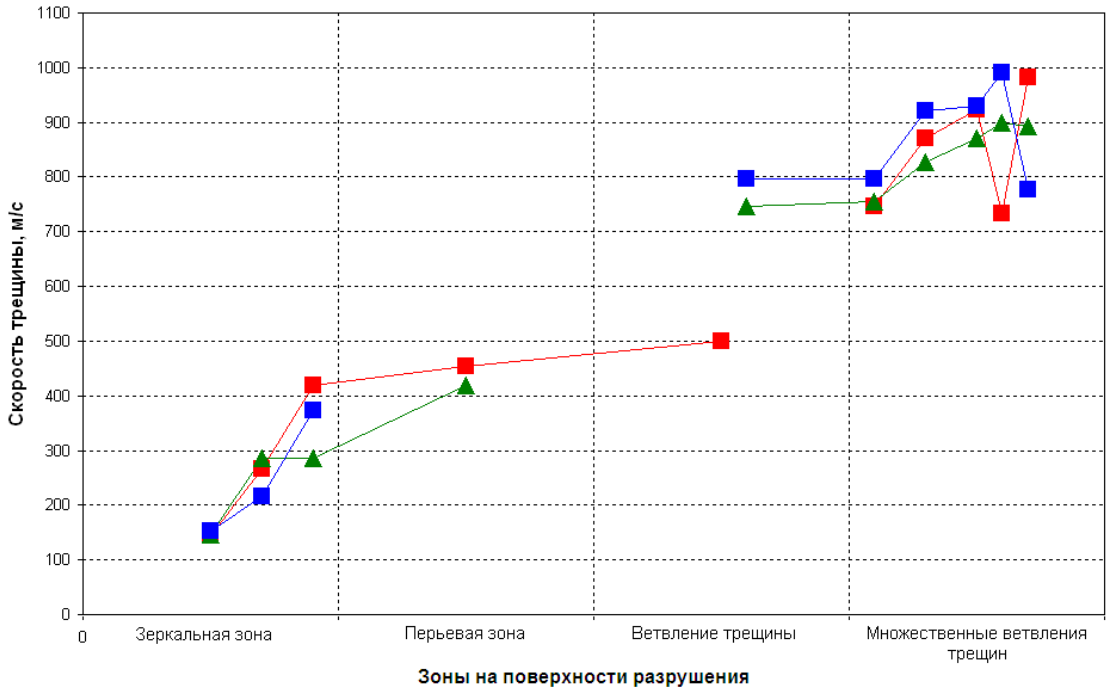


Рис. 1. Скорость трещины на различных этапах распространения, ветвления трещин в ПММА.

При испытаниях сосудов распространение трещины во всех случаях инициировалось от надреза. При разрушении сосудов трещина продвигалась от надреза прямолинейно от надреза в обе стороны, при увеличении скорости трещина начинала искривлять траекторию, затем происходило ветвление трещины. Ветвление трещины сопровождалось образованием микроветвей под углом 8–10^0 к основной трещине, как до, так и после ветвления основной трещины, углы ветвления трещины составляют 40–60^0, что значительно больше углов микроветвлений. Измерения скорости показали, что в стали при прямолинейном распространении скорость трещины составляет 350–541 м/с, при ветвлении трещины скорость трещины составляет 679–746 м/с (рис. 2).

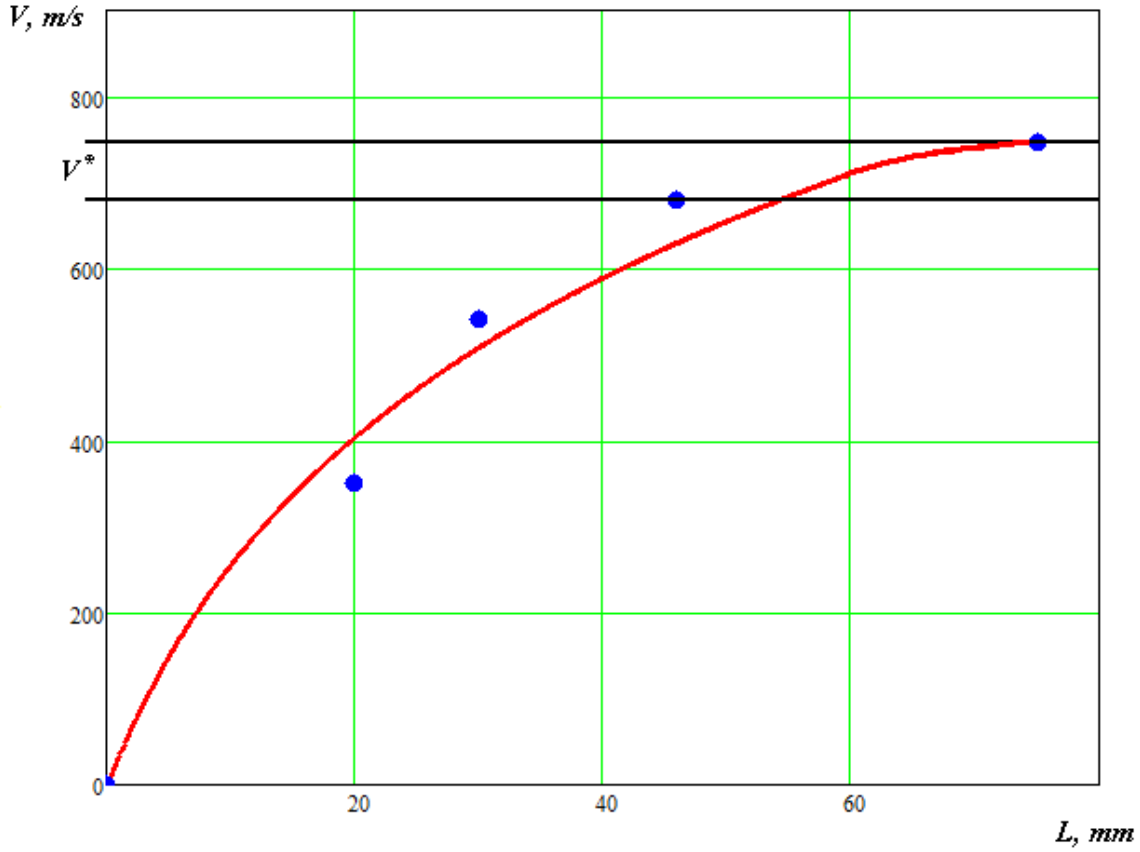


Рис. 2. Скорость трещины при прямолинейном распространении, ветвлении трещины в стали

Таким образом, установлено, что скорость ветвления трещины в стали составляет 679–746 м/с, что коррелирует со скоростью ветвления трещины в полимерах 500–800 м/с. Показано, что скорость ветвления трещины является критической (предельной) скоростью распространения трещины, и энергия, поступающая в вершину движущейся трещины, расходуется не на увеличение скорости трещины, а на создание новых трещин путем ветвления.

Список литературы

1. Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
2. Немец Я., Серенсен С.В., Стреляев В.С. Прочность пластмасс. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
3. Ravi-Chandar K., Knauss W.G. An experimental investigation into dynamic fracture. III. On steady-state crack propagation and crack branching. International Journal of Fracture. 1984. №26. P. 141-154.
4. Sharon E., Fineberg J. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials. Physical Review B. 1996. V.54, №10. P. 7128-7139.
5. Наймарк О.Б., Баранников В.А., Давыдова М.М. и др. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины // Письма в ЖТФ. 2000. Т.26, вып. 6. С. 67-77.
6. Даффи А.Р., МакКлур Дж.М., Айбер Р.Дж., Мэкси У.А. Практические примеры расчета на сопротивление хрупкому разрушению трубопроводов под давлением. Разрушение. В 7 т, т. 5. М.: Машиностение, 1977. С. 146-209.
7. Алексеев А.А., Большев К.Н., Иванов В.А., Сыромятникова А.С., Большаков А.М., Андреев А.С. Экспериментальное исследование скорости ветвления трещины в полимерах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Том 84. №4. С. 60-65.
8. Алексеев А.А., Большев К.Н., Иванов В.А., Сыромятникова А.С., Большаков А.М., Иванов А.Р.. Экспериментальное определение скорости ветвления трещины в стали // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 2. С. 45-48.

УДК 624.042:696.132:626.33
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-109-112

ОБ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДЗЕМНОМ ТРУБОПРОВОДЕ НА БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ

Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А., Яковлев Ю.А.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: ammosov.g@mail.ru

***Аннотация**. Магистральные трубопроводы, проложенные на территории Якутии, эксплуатируются в области распространения многолетнемерзлых грунтов. Особую опасность на пойменном участке для подземных трубопроводов представляет миграция влаги при промерзании и протаивании мерзлых грунтов, из чего трубопровод дважды в год меняет положение. В статье приведена оценка механических напряжений от деформаций, созданных морозными пучениями. Предложено математическое описание и выбор модели подземного трубопровода, а также определение реакции грунта, показаны полученные функции положения по точечным планово-высотным измерениям и оценки напряжений в подземном трубопроводе.*

***Ключевые слова**: подземный трубопровод, морозные пучения, реакция грунта, напряженно-деформированное состояние, сложные деформации трубопровода.*

ON EVALUATION OF STRESSES IN THE UNDERGROUND PIPELINE ON THE SHORE SLOPE

Ammosov G.S., Ivanov D.S., Kornilova Z.G., Antonov A.A., Yakovlev Yu.A.
V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

***Abstract.** Trunk pipelines laid on the territory of Yakutia are operated in the area of permafrost. A particular hazard in the floodplain area for underground pipelines is moisture migration during freezing and thawing of frozen soils, from which the pipeline changes position twice a year. The article provides an assessment of mechanical stresses from deformations created by frost beams. Mathematical description and selection of underground pipeline model, as well as determination of soil reaction are proposed, obtained position functions by point horizontal and vertical measurements and evaluation of stresses in underground pipeline are shown.*

***Keywords:** underground pipeline, frost heaving, soil reaction, stress-strain state, complex pipeline deformations.*

Введение. Сооружение подземных трубопроводов осложняется рядом факторов: трудности проведения земляных работ, пучение многолетнемерзлых грунтов при их замораживании после оттаивания и проваливание из-за оттайки. Но одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационную надежность трубопроводов, является нарушение устойчивого положения в связи со значительным снижением несущей и балластирующей способности многолетнемерзлого грунта при оттаивании [1, 2].

В центральной Якутии глубина оттаивания в тенистых местах составляет дециметры, на открытых местах достигает трех метров. Подземный трубопровод, лежащий в таком грунте, дважды в год меняет положение от морозных пучений. Многолетний мониторинг планово-высотного положения (ПВП) подземного трубопровода на пойменном участке протоки Хатасская [3] выявил участки, где изменения ПВП трубопровода за полгода достигают ~2 м [4].

Целью работы является оценка механических напряжений от деформаций, созданных морозными пучениями. В местах больших изменений геометрии трубопровода несколько прогибов идут подряд: выпуклость переходит в вогнутость, за которой без интервала следующая выпуклость и т. д. При этом величина прогибов разная. Поэтому по планово-высотным измерениям не представляется возможным выяснить стрелу прогиба для вычисления радиуса изгиба, через который можно оценить напряжение.

Радиус изгиба можно вычислить, имея функцию пространственного положения, которую можно получить, решая уравнение подземного трубопровода.

Материалы и методы исследования. В работе [5] был обоснован выбор модели подземного трубопровода, лежащего в периодически оттаивающем и замерзающем грунте, и получено следующее уравнение:

$$EI\frac{d^4Z}{dx^4} - \frac{D\rho_л g}{2} \cdot \frac{d^2Z}{dx^2} + p - q + \rho_л g = 0, \quad (1)$$

где E – модуль упругости; I – момент инерции сечения; D – диаметр трубопровода; $\rho_л$ – линейная плотность трубы; q – реакция грунта; p – вертикальная распределенная нагрузка; Z – вертикальное положение оси трубы.

В этом уравнении подземного трубопровода, в отличие от уравнений, использованных в работах [6-9], продольное усилие явно не входит, что упрощает решение. Для выяснения продольных усилий необходимо изучать много параметров, например, температуру перекачиваемого продукта, распределение и устройство компенсаторов и др.

Вертикальная нагрузка – это вес грунта, лежащего сверху трубы, – вычисляется по глубине залегания. От измерений планово-высотных положений получаем уровень поверхности грунта в нескольких точках, по которым, построив кубический сплайн, вычисляем уровень в промежуточных точках. После такого задания вертикальной нагрузки уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{d^4Z(x)}{dx^4} - \frac{\rho_л gD}{2EI} \cdot \frac{d^2Z(x)}{dx^2} - \frac{\rho_г gD}{EI} \cdot Z(x) = \frac{q(x)}{EI} - \frac{\rho_г gD}{EI} \cdot S(x) - \frac{\left(\rho_л - \frac{\rho_г \pi D^2}{8}\right)g}{EI}, \quad (2)$$

где $S(x)$ – уровень поверхности грунта; $\rho_г$ – плотность грунта; остальные обозначения такие же, как и в уравнении (1).

Уравнение (2) является неоднородным дифференциальным уравнением четвертого порядка с постоянными коэффициентами, методы решения хорошо отработаны.

Трудности в решении уравнения в данном случае вызывает определение реакции грунта $q(x)$.

Обычно реакцию грунта принимают, по гипотезе Винклера [6-9], пропорциональной осадке грунта. Коэффициент упругости называют «коэффициентом постели». Этот коэффициент зависит от состава и свойств грунта, его значение устанавливают экспериментально, проводя опыты по сжатию грунта.

Задание реакции грунта по гипотезе Винклера в нашем случае не подходит. Свойства мерзлого грунта меняются на расстоянии нескольких метров, что и является причиной неравномерных морозных пучений. Не представляется выполнимым сбор проб мерзлого грунта на глубине залегания трубопровода через каждый метр по всему исследуемому участку с последующим измерением коэффициента постели. Даже если проделать такую операцию, возникнет проблема определения осадки грунта – сжатие грунта неравномерно по причине неравномерных пучений. Гипотеза Винклера не совсем точно описывает реакцию грунта. Согласно этой гипотезе, сжатие грунта прямо пропорционально приложенному давлению, однако на практике эта зависимость заметно отклоняется от прямой пропорциональности.

Определение реакции грунта проведем методом подбора. В каждом узле сетки решений задаем реакцию грунта. Решаем уравнение. Если полученное решение положения трубы отличается от данных, полученных во время планово-высотных измерений, корректируем реакцию грунта в узлах и проводим следующее решение. Итерации повторяем до тех пор, пока решения уравнения не будут совпадать с измеренными значениями.

Численное решение уравнения провели методом конечных разностей. Для коррекции реакций грунта применили метод градиентного спуска.

На рис. 1 показана полученная функция положения подземного трубопровода на пойменном участке протоки Хатасская первой нитки магистрального газопровода по точечным планово-высотным измерениям в апреле 2018 г. В левой части рисунка – пойма р. Лены, в средней – береговой склон протоки, в правой – дно протоки. Положение трубопровода показано сплошной линией; кружками – измеренное положение трубопровода; штриховой линией – уровень дневной поверхности грунта; координаты даны в метрах от реперной точки.

Приведенное решение получено при следующих параметрах: количество узлов сетки решений 1000; начальное положение трубопровода – горизонтальная линия в глубине 8 м; начальные реакции грунта 45 кН/м в каждом узле; возмущение реакций грунта 100 Н/м; коэффициент в алгоритме градиентного спуска 10^8. После примерно 10 тысяч итераций получена функция, являющаяся решением уравнения подземного трубопровода (2) и проходящая по измеренным точкам. Следовательно, функция описывает текущее положение трубопровода.

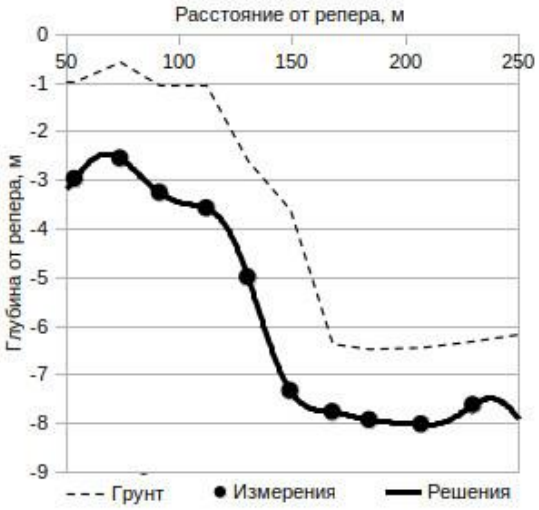


Рис. 1. Решение уравнения по данным высотно-плановых измерений.

Получив функцию положения трубопровода, вычисляем вторую производную, в случае малых деформаций она будет обратно пропорциональна радиусу изгиба. Возникшие в трубопроводе напряжения вычисляем по формуле [8, 10, 11]:

$$\sigma(x) = \frac{ED}{2} \cdot \frac{d^2 Z(x)}{dx^2} \tag{3}$$

Результаты оценки напряжений, наложенные на график функции положения трубопровода, показаны на рис. 2. Сплошной линией показаны напряжения, тонкой сплошной – положение трубопровода, штриховой – уровень дневной поверхности грунта.

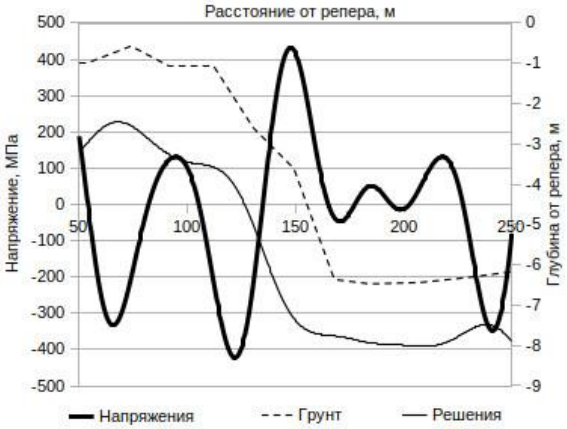


Рис. 2. Напряжения в подземном трубопроводе.

Обсуждение. Предложенное решение уравнения подземного трубопровода удовлетворительно сходится при нескольких тысячах итераций, что требует заметных вычислительных затрат. Для получения конечного результата нужно много раз численно решить дифференциальное уравнение (2), примерно равное количеству итераций умноженное на количество узлов сетки решений. На стандартном настольном персональном компьютере требуется до десятка часов на одно решение.

В исследованном магистральном трубопроводе применены трубы из стали марки 13Г1СУ, пределом текучести которой ~400 МПа. Но в наших оценках на некоторых участках были получены значения, превышающие предел текучести (рис. 2). Трубопровод исправно функционирует много лет, такие большие значения напряжений не наблюдаются. Такая погрешность объясняется тем, что при выводе уравнения (1) трубопровод был рассмотрен как сплошная балка [5], а не как тонкостенная. При уровнях деформаций, когда сплошная балка испытывает пластические деформации, тонкостенная цилиндрическая балка приобретет овальное сечение и будет работать в упругой области. Поэтому предложенный метод оценки не применим при напряжениях, близких к пределу текучести.

Выводы. Существующие оценки напряжений деформированного подземного трубопровода применимы, если деформация имеет вид одиночной арки [6–9].

В данной работе разработана методика оценки напряжений подземного трубопровода, деформированного в виде нескольких арок, идущих друг за другом, по планово-высотным измерениям.

Предложенная методика имеет некоторые погрешности при напряжениях, близких к пределу текучести, по причине моделирования трубопровода как балки сплошного сечения. Для дальнейшего усовершенствования методики ведется работа по разработке уравнения подземного трубопровода как тонкостенной цилиндрической балки.

Благодарность. *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (Рег. № 124032600080-4, научная тема FWRS-2024-0035).*

Список литературы:

1. Шамилов Х.Ш., Гулин Д.А., Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М. Об обеспечении устойчивости подземных магистральных трубопроводов на талых участках многолетнемерзлых грунтов // Нефтегазовое дело, – 2015. т. 13, № 2. С. 111-118.
2. Лазарев С.А., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Оценка технического состояния линейной части магистрального газопровода на участках со значительными пространственными деформациями // Газовая промышленность. – 2016. – № 9 (743). – С. 84-90.
3. A.A. Antonov, Yu.A.Yakovlev, Z.G.Kornilova, A.L.Tereshkin. Monitoring of spatial position of the underwater crossing of MGL across the Lena river by instrumental methods / Procedia Structural Integrity / Volume 30, 2020, Pages 11-16. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.003
4. D. S. Ivanov, G. S. Ammosov, Z. G. Kornilova, Yu. A. Yakovlev. Concerning the Planned-High-Altitude Position of the Underwater Crossing of Hatassy-Pavlovsk MGL Across the River Lena // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 666, International science and technology conference «Earth science» 8-10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation. DOI: 10.1088/1755-1315/666/4/042007.
5. Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2022. № 1(81). С. 27–30.
6. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1982. 340 с.
7. Горковенко А.И. Влияние некоторых закономерностей морозного пучения грунтов на высотное положение подземного трубопровода и его напряженно-деформированное состояние // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2006. № 1. URL: http://ogbus.ru/article/view/vliyanie-nekotoryx-zakonomernostej-moroznogo-pucheniya-gruntov-na-vysotnoe-polozhenie-podzemnogo-truboprovoda-i-ego-napryazhenno-deformirovannoe-sostoyanie (дата обращения: 22.03.2021).
8. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-географических условиях. / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов [и др.] М.: Интер, 2005. Т. 1. 706 с.
9. Ясин Э.М., Черникин В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1967. 119 с.
10. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности. М.: Изд-во АСВ, 2004. 424 с.
11. Справочник по сопротивлению материалов / ред. Писаренко Г.С. 2-е изд. Киев: Наук.думка, 1989. 736 с.

УДК 620.193:621.867.81.068.4:624.142
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-113-117

КОРРОЗИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ НА СЕВЕРЕ

Аммосов Г.С.[1], Иванов Д.С.[1], Корнилова З.Г.[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: ammosov.g@mail.ru

Аннотация. *В данной статье рассматривается модель определения скорости сплошной коррозии на стенке вертикального стального резервуара и ее достоверность. Оценка скорости коррозии проведена на основе натурных данных, полученных измерением толщины стенки на нижней части резервуара. Подчеркивается необходимость нахождения точных значений начальной толщины стенки резервуара, зависящей от высоты налива и среднегодовой температуры, для определения скорости коррозии. Данная модель может быть использована для прогнозирования срока службы резервуаров.*

Ключевые слова: *резервуар, коррозия, скорость коррозии, сплошная коррозия, низкие температурные режимы, начальная толщина стенки.*

CORROSION OF VERTICAL STORAGE TANKS OPERATING IN THE NORTH

Ammosov, G.S.[1], Ivanov, D.S.[1], Kornilova, Z.G.[1]
[1]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Abstract. *This article examines a model for determining the rate of continuous corrosion on the wall of a vertical steel storage tank and its validity. The corrosion rate is estimated based on in-situ data obtained by measuring the wall thickness at the bottom of the tank. The need to determine the corrosion rate accurately is emphasized, depending on the fill height and average annual temperature. This model can be used to predict the service life of storage tanks.*

Keywords: *storage tank, corrosion, corrosion rate, continuous corrosion, low temperature conditions, initial wall thickness.*

Введение. Топливно-энергетический ресурс для Республики Саха (Якутия) имеет стратегическое значение, общий объем резервуарного парка составляет 1,6 млн. м^3. По данным из официальных сайтов ведущих предприятий, обеспечивающих нужды народного хозяйства, на 2024 год за летний период навигации доставлено: АО «Саханефтегазсбыт» более 144 тыс. тонн топлива в 16 филиалов [1], которые расположены по всей республике возле водных артерий, АО НК «Туймаада нефть» более 90 тыс. тонн нефтепродуктов [2], АО «Сахаэнерго» на 2025 г. завезено более 74 тыс. тонн дизельного топлива и 120 тонн нефти [3], а по данным ГУП ЖКХ РС (Я) на начало навигации 2025 г. планировалось доставка 41 тыс. тонн нефтяного и 11,4 тыс. тонн газоконденсатного топлива [4].

Эксплуатационная работа резервуарных парков, баз, хранилищ нефти и нефтепродуктов отличается и имеет свои особенности, в отличие от южных широт Российской Федерации. В зависимости от интенсивности потребления топлива резервуары постепенно опустошаются и длительность хранения в них нефтепродуктов зависит от технологического режима и динамики объемов реализации нефтепродуктов. Стоит отметить, что стальные резервуары относятся к числу ответственных сварных конструкций, работающих в условиях низких климатических температур.

Предприятия топливно-энергетического комплекса уделяют особое внимание капремонту резервуаров и предпринимают все возможные действия, чтобы исключить риски, связанные с дальнейшей эксплуатацией опасных производственных объектов, не соответствующих требованиям промышленной безопасности. На 2019 год, по словам руководства одного из ведущих предприятий, срок эксплуатации более 90% вертикальных стальных резервуаров превысил 20-летний срок, а в отношении 84% – более чем в 2 и даже в 3 раза [5].

Получение информации о техническом состоянии резервуаров для определения допустимых нагрузок и безопасной эксплуатации металлоконструкций является одной из приоритетных задач. На основании учета различных факторов влияния, таких как температурные, силовые, коррозионные воздействия на емкость на конкретной площадке, формируется срок эксплуатации резервуара. Известно, что резервуары подвержены атмосферной, почвенной и внутренней коррозии, протекающей, в основ-

ном, по электрохимическому механизму. Опыт эксплуатации резервуаров на предприятиях показывает, что срок эксплуатации в значительной степени определяется коррозией и наиболее подверженными коррозионному износу являются нижний пояс стенки и днище резервуара. В свою очередь коррозия делится на виды: местная и сплошная.

Местная коррозия проявляется в виде различных дефектов на поверхности материала, таких как язвы, питтинги (местные ямки), трещины и т. д. Этот тип коррозии возникает в местах неоднородностей материала, таких как микропоры, дефекты в кристаллической решетке, участки сплава с незначительно отличающимся составом и другие аномалии. Местная коррозия, в целом, является стохастическим явлением, и ее проявления описываются вероятностными моделями [6, 7].

Сплошная коррозия, напротив, характеризуется равномерным разрушением материала по всей поверхности, воздействует на всю поверхность материала равномерно. Этот вид коррозии является наиболее распространенным и обычно приводит к значительной потере металла.

Определение скорости коррозии – важный показатель для оценки срока эксплуатации резервуара, позволяющий боллее точно прогнозировать его предельное состояние. В условиях Якутии короозионные процессы протекают медленнее и моделирование сплошной коррозии является актуальной задачей для более точного прогнозирования сроков эксплуатации.

Предлагаемый метод прогнозирования развития коррозии должен включать следующие этапы: выбор математической модели коррозии, данные измеренной толщины стенки резервуара. Далее, исходя из начальной толщины, подбираются параметры модели таким образом, чтобы она позволяла предсказать текущие толщины.

Исходные данные. Оценку скорости коррозии проведем на данных, полученных измерением толщины стенки резервуара вертикального стального объемом 5000 м^3 (РВС-5000) Якутской нефтебазы. Данный резервуар представляет вертикальную стальную цилиндрическую емкость диаметром 22,58 м и высотой 11,48 м, изготовленного из листовой стали 09Г2С толщиной 8 мм, введенный в эксплуатацию в августе 1981 г. для хранения топлива ТС-1 (авиационный керосин). Измерение толщины стенки проведено в июле 2003 г. и результаты приведены в таблице 1. Толщины стенки (δ) измерялись на разных высотах (x), отсчитываемых от основания резервуара.

Таблица 1. Толщина стенки резервуара, в зависимости от высоты

x, мм	25	60	95	130	165	200	235	270	305	340	375	410
δ, мм	6,51	6,54	6,55	6,57	6,64	6,65	6,74	6,74	6,76	6,75	6,74	6,66

Начальная толщина стенки не измерена. По ГОСТ [8] листы толщиной 8 мм имеют разброс от 7,2 мм до 8,2 мм. Также не регламентируется постоянство толщины по всей поверхности – вверху и внизу могут быть разные значения в пределах разброса толщин. Поскольку скорость коррозии очень маленькая, изменение начальной толщины даже на десятые доли мм сказываются на модели коррозии.

Постановка задачи и решения. Одним из наиболее распространенных типов коррозии, которая влияет на резервуары для нефтепродуктов, является электрохимическая. Определяющим условием протекания коррозии является образование гальванической пары. Известно, что скорость коррозии металла зависит от механических напряжений. Рассмотрели несколько вариантов зависимости скорости коррозии от напряжения: линейную [9, 10], квадратичную [10] и экспоненциальную [11].

Для решения поставленной задачи нам подходит экспоненциальная модель «Механохимии», предложенная Гутманом Э.М. [11], которая довольно близко и хорошо описывает зависимость скорости коррозии от механических напряжений:

$$\frac{d\delta}{dt} = -V_0 e^{\frac{V_M \sigma_{\text{ср}}}{RT}}. \quad (1)$$

где V_M – молярный объем металла, σ_{cp} усредненный по трем осям механическое напряжение, R – универсальная газовая постоянная, T – температура, V_0 – скорость коррозии не напряженного металла.

Скорость коррозии ненапряженного металла зависит от температуры по формуле Аррениуса, которая описывает зависимость константы скорости химической реакции от температуры, как:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (2)$$

где E_a – энергия активации химической реакции

Тогда формула (1) для скорости коррозии примет вид:

$$\frac{d\delta}{dt} = -V_0 e^{\frac{V_M \sigma_{\text{ср}} - E_A}{RT}}. \quad (3)$$

Температура нефтепродуктов, хранящихся в резервуарах, не может быстро меняться вслед за температурой окружающей среды, исходя из этого, логично считать, что температура металла стенки резервуара будет равна температуре жидкости, а не воздуха. Архивные данные среднемесячных температур за исследуемый промежуток времени, с августа 1981 по июль 2003 были получены с сайта «Справочно-информационный портал Погода и климат» [12]. В связи с этим температуры металла стенки решили взять усредненные многогодовые, с интерполяцией среднемесячных (таблица 2).

Таблица 2. Среднемесячные температуры в г. Якутске

	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	янв.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.
Дни	0	31	61	92	122	153	184	212	243	273	304	334	365
Темп	14,8	5,6	-8,4	-29,1	-38,7	-40,8	-35,8	-21,5	-6	6,6	15,3	18,6	14,8

В стенке вертикального резервуара действуют напряжения по трем осям: кольцевые, радиальные и вертикальные. Но кольцевые намного превосходят другие [13]. Потому в усредненном напряжении принимаем только кольцевые напряжения [13]:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{3}\sigma_K = \frac{\rho g D}{6\,\delta}\left(H - x - e^{-\beta x}\left[H cos\beta x + \left(H - \frac{1}{\beta}\right) sin\beta x\right]\right), \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, D – диаметр резервуара, ν – коэффициент Пуассона материала стенки, H – высота налитой жидкости, x – высота исследуемой точки, коэффициент β вычисляется по формуле:

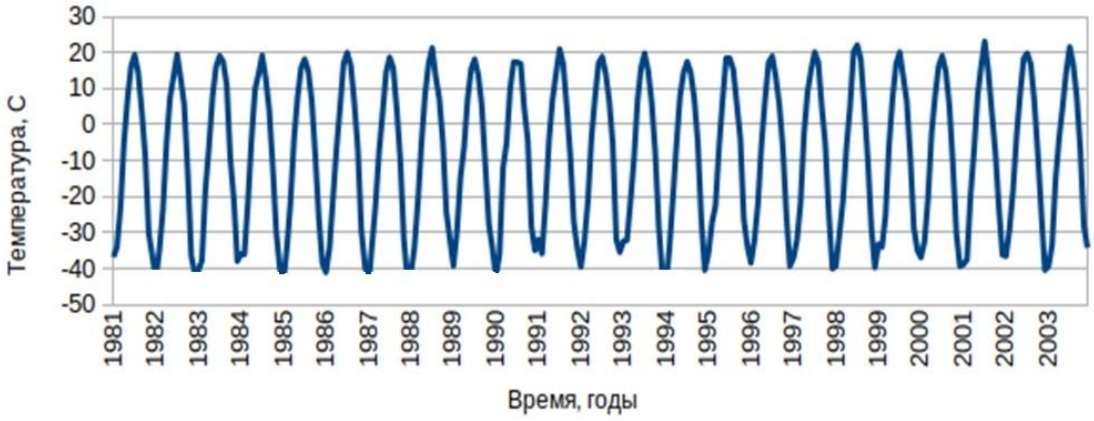
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{D^2\delta^2}}. \quad (5)$$

По уровню хранимого в резервуаре нефтепродукта и его отпуска точных данных нет. Возможны следующие варианты: 1 – резервуар заполняется летом и в течение года равномерно опорожняется; 2 – заполняется летом, в течение полугода уровень падает до 0,5 м, и в течение следующего полугодия уровень сохраняется. И так повторяется все годы эксплуатации для каждого варианта.

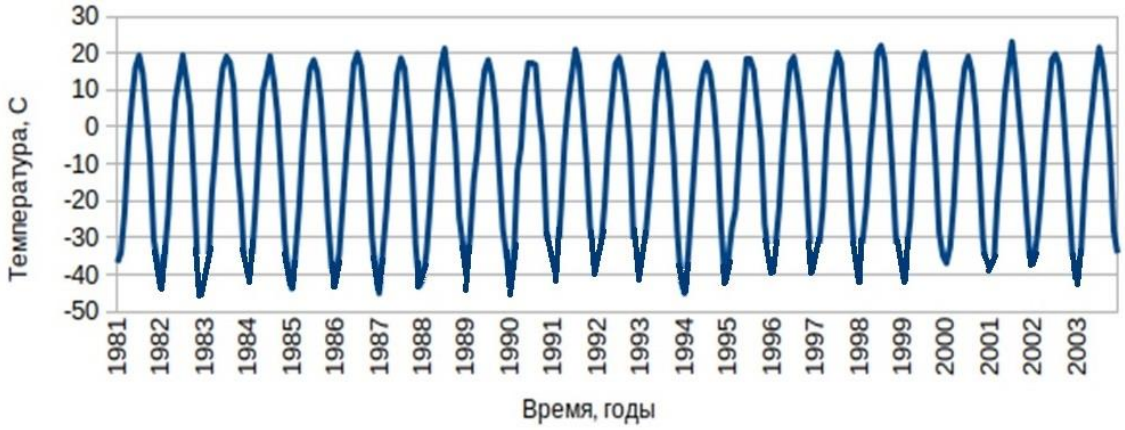
Для постройки модели коррозии требуется найти параметры V_0 и E_A в уравнении (2). Задаем начальную толщину в августе 1981, решаем дифференциальное уравнение (2) по времени до июля 2003 и сравниваем с измеренными данными по таблице 1. Подбор ведем методом градиентного спуска по неизвестным параметрам. Также проблемой является неизвестность начальной толщины – изменение толщины даже на десятую долю миллиметра существенно изменяет параметры. Поэтому решили моделировать толщину параболой по высоте, и параметры параболы включить в число искомых. Начальная толщина:

$$\delta(x, 0) = ax^2 + bx + c\,. \quad (6)$$

Исходя из обсужденных ранее аргументов, задача построения модели сплошной коррозии вертикального стального резервуара сводится к решению системы из уравнений (3), (4), (5), в которой температуры заданы зависимостью от времени как на рис. 1, а высоты налива топлива – как на рис. 2 и с начальным условием (6). Область решения по времени – это период с момента ввода в эксплуатации резервуара до момента измерения толщины стенок. Поскольку конечные толщины известны, а начальные необходимо найти, это представляет собой обратную задачу.



а)



б)

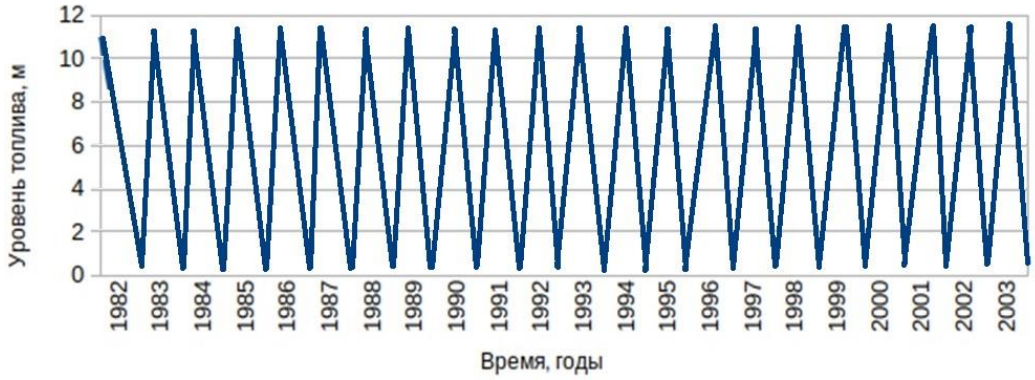
Рис. 1. Температура резервуара с учетом среднемесячной температуры в г. Якутске:
а) – вариант 1, б) – вариант 2

Параметры модели, которые требуется определить, включают константу скорости сплошной коррозии V_0, энергию активации химической реакции окисления железа E_a и коэффициенты параболы начальной толщины a, b, c.

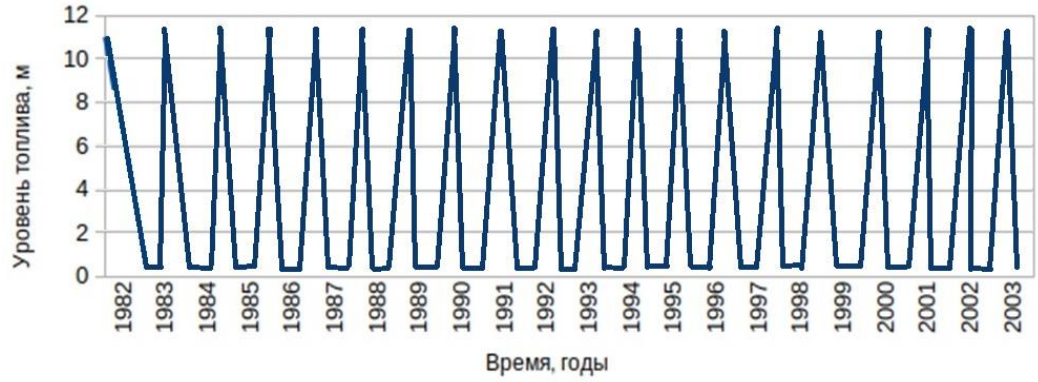
Алгоритм поиска неизвестных параметров следующий. Задаем значения параметров V_0, E_a, a, b, c и, решая систему при каждом значении высоты x_i, на котором были измерены толщины, получаем конечные толщины $\delta(x_i)$. Вычисляем невязку

$$SQR = \sum_i \left(\delta(x_i) - \delta_k(x_i)\right)^2, \tag{7}$$

где: $\delta_k(x_i)$ – измеренные толщины на высоте x_i (табл. 1). Задача теперь сводится к минимизации невязки путем варьирования параметров методом «градиентного спуска».



а)



б)

Рис. 2. Уровень жидкости в резервуаре: а) – вариант 1, б) – вариант 2.

В результате решения найдены следующие значения параметров модели для двух вариантов:

- константа скорости сплошной коррозии для обоих вариантов: $V_0 = 0{,}0118\,\frac{\text{мм}}{\text{месяц}}$;
- энергия активации окисления железа для обоих вариантов: $E_a = 1000\,\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$;
- коэффициенты параболы для обоих вариантов: $a = -6{,}54\,\frac{1}{\text{м}}$; b=3,95; c=7,12 *мм*.

На рис. 3 показаны результаты вычислений с использованием разработанной модели коррозии. Горизонтальная ось представляет высоту точки стенки резервуара, а вертикальная ось – толщину стенки резервуара. Вычисленные с помощью модели толщины представлены сплошной линией, измеренные толщины – окружностями, а восстановленная начальная толщина – штриховой линией.

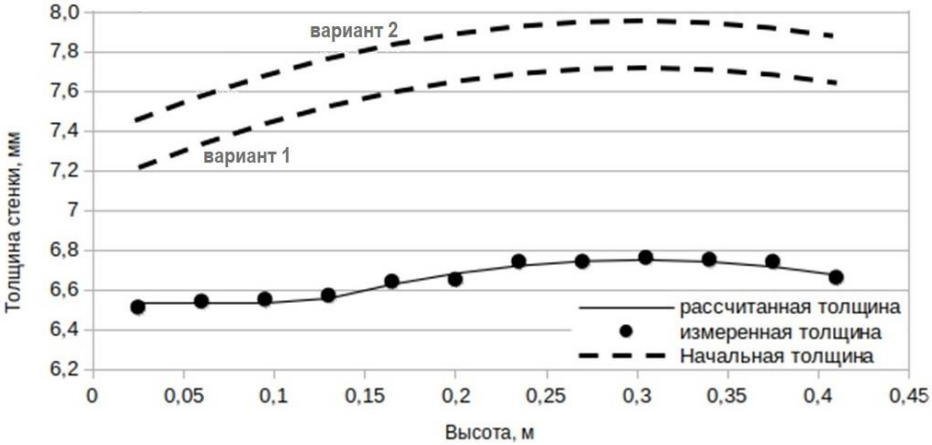


Рис. 3. Результаты вычисленных толщин стенки резервуара по разработанной модели коррозии

Выводы. Разработана модель, описывающая процесс сплошной коррозии вертикального цилиндрического резервуара. При разработке модели было использовано решение обратной задачи уравнения скорости коррозии. Результаты, полученные с помощью модели, удовлетворительно соответствуют практическим измерениям. Это свидетельствует об адекватности модели.

Представленная модель имеет потенциал для использования в прогнозировании срока службы резервуаров для хранения нефтепродуктов и открывает перспективы для разработки стратегии замены и ремонта существующего парка резервуаров. Это особенно актуально для парков резервуаров с большим количеством старых конструкций, подверженных коррозионному износу. Использование данной модели позволит предсказывать оставшийся ресурс резервуаров и определять оптимальное время для замены или проведения ремонтных работ, что способствует улучшению безопасности и надежности хранилищ для нефтепродуктов.

Благодарность. *Данная работа выполнена по программе фундаментальных исследований СО РАН и президиума РАН FWRS -2024-0035; № гос. Рег.: 1023031300031-9-2.3.7.*

Список литературы

1. https://portnews.ru/news/369215
2. https://ysia.ru/bolee-95-tysyach-tonn-nefteproduktov-perevezli-tujmaada-neft-v-period-navigatsii
3. https://1sn.ru/saxaenergo-zaversilo-navigacionnyi-zavoz-topliva
4. https://sakhalife.ru/arkticheskaya-navigacziya-gup-zhkh-rsya-itogi-i-plany/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F
5. https://ulus.media/2023/10/25/viktor-lebedev-prokommentiroval-situacziyu-s-priostanovkoj-raboty-neftebaz-v-treh-naselennyh-punktah-yakutii
6. Арутюнян, Р. А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии / Р. А. Арутюнян // Проблемы прочности. – 1989. – No 12. – С. 106–108.
7. Виноградова, С. С. Обзор стохастических моделей питтинговой коррозии / С. С. Виноградова, Р. Ф. Тазиева, Р. А. Кайдриков // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, No 8. – С. 313–318.
8. ГОСТ 19903-2015 «Прокат листовой горячекатаный. Сортамент»
9. Долинский, В. М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии / В. М. Долинский // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1967. – No 2. – С. 9–10.
10. Петров, В. В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В. В. Петров, И. Г. Овчинников, Ю. М. Шихов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1987. – 288 с.
11. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 1981.
12. Справочно-информационный портал Погода и климат / Средние месячные и годовые температуры воздуха в Якутске – URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm?ysclid=luvcv5jr7z265102553 (Дата обращения 10.04.2024) – Режим доступа: свободный – Текст: электронный
13. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966.

УДК 539.42
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-118-121

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЖЕСТКОСТЬ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

Андреев Я.М.[1], Прокопьев Л.А.[1], Максимова Е.М.[1]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: yakovmich@yandex.ru

Аннотация. *В работе исследовано влияние температуры на жесткость напряженного состояния в зоне предразрушения у вершины трещины. На основе асимптотического разложения компонент тензора напряжений предложена концепция эффективного коэффициента триаксиальности, рассчитываемого на границе зоны пластичности. Установлена аналитическая зависимость эффективного коэффициента триаксиальности от температуры через температурную зависимость предела текучести, описываемую моделью термически активируемого течения. Показано, что снижение температуры приводит к монотонному росту эффективного коэффициента триаксиальности. Полученные результаты позволяют количественно объяснить физический механизм хладноломкости: увеличение жесткости напряженного состояния при понижении температуры создает благоприятные условия для перехода от вязкого к хрупкому механизму разрушения.*

Ключевые слова: *коэффициент жесткости напряжений, T-напряжения, коэффициент биаксиальности напряженного состояния, поле напряжений, трещина.*

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON STRESS TRIAXIALITY IN THE PREFracture ZONE AT THE CRACK TIP

Andreev Ya.M.[1], Prokopyev L.A.[1]
[1]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

Abstract. *The article investigates the influence of temperature on the stress triaxiality in the prefracture zone at the crack tip. Based on the asymptotic expansion of stress tensor components, the concept of an effective stress triaxiality coefficient, calculated at the boundary of the plastic zone, is proposed. An analytical relationship between the effective stress triaxiality coefficient and temperature has been established via the temperature dependence of the yield strength, described by the thermally activated flow model. It is shown that a decrease in temperature leads to a monotonic increase in the effective stress triaxiality coefficient. The obtained results provide a quantitative explanation for the physical mechanism of cold brittleness: an increase in stress triaxiality with decreasing temperature creates favorable conditions for the transition from a ductile to a brittle fracture mechanism.*

Keywords: *stress triaxility, T-stress, biaxiality ratio, stress field, crack.*

Введение. Проблема обеспечения хладостойкости стальных конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур, сохраняет свою актуальность на протяжении десятилетий. Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических исследований, в научном сообществе до сих пор отсутствует консенсус относительно единой физической модели, адекватно описывающей явление хладноломкости [1-4]. Отсутствие таких моделей затрудняет разработку надежных критериев оценки хладостойкости новых материалов и конструкций. В этой связи представляется необходимым углубленное изучение фундаментальных аспектов поведения материала в зоне предразрушения у вершины трещины, где происходят процессы пластической деформации, накопления повреждений и последующего зарождения макроскопической трещины. Настоящая работа посвящена анализу влияния температурного фактора на жесткость напряженного состояния в указанной области как на ключевой параметр, контролирующий склонность материала к хрупкому разрушению.

Эффективный коэффициент триаксиальности у вершины трещины. Для количественной оценки жесткости напряженного состояния широко используется коэффициент триаксиальности , определяемый как отношение компоненты гидростатического напряжения $\sigma_{\text{г.с.}}$ к эквивалентному напряжению Мизеса $\sigma_{\text{экв}}$ [5]:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{г.с.}}}{\sigma_{\text{экв}}} \tag{1}$$

где $\sigma_{\text{г.с.}} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – гидростатическое напряжение,

$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{0.5((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}$ – эквивалентное напряжение Мизеса.

Рассмотрим асимптотическое решение для поля напряжений вблизи вершины трещины. На линии продолжения трещины (θ=0) для случаев плоского деформированного состояния (ПДС) и плоского напряженного состояния (ПНС) компоненты напряжений имеют вид [6]:

Для ПДС:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} + T_x \\ \sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \\ \sigma_{zz} = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ \tau_{xy} = 0 \end{cases} \tag{2}$$

Для ПНС:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} + T_x \\ \sigma_{yy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \\ \sigma_{zz} = 0 \\ \tau_{xy} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, T_x – Т-напряжения, r – расстояние от вершины трещины, μ – коэффициент Пуассона.

Так как на линии продолжения трещины (θ=0) касательные напряжения равны нулю, представленные в (2) и (3) компоненты напряжений по осям «x» и «y» являются главными напряжениями. В этом случае, если (2) и (3) подставить в выражение (1), получим распределение коэффициента триаксиальности по линии (θ=0) вида $\eta = f(r)$ при известных значениях параметров механики разрушения K_1 и T_x.

В рамках настоящего исследования предлагается введение эффективного коэффициента триаксиальности, вычисляемого в окрестности вершины трещины с учётом упругопластического поведения материала. В отличие от классического подхода, данный параметр определяется на границе зоны пластичности вдоль линии продолжения трещины (θ = 0). Эффективный коэффициент триаксиальности представляет собой значение коэффициента триаксиальности, вычисленное при радиусе $r = r_p$, где r_p – характерный размер зоны пластичности:

$$\eta_{eff} = \eta(r_0) \tag{4}$$

Данный подход основан на том, что механизм разрушения, наиболее вероятно, определяется в зоне предразрушения, которая при упругопластическом деформировании локализуется вблизи границы зоны пластичности. Таким образом, вычисление коэффициента триаксиальности при $r = r_p$ позволяет более адекватно оценить жесткость напряженного состояния в зоне, где инициируются механизмы разрушения.

Зависимость эффективного коэффициента триаксиальности от температуры. Размеры зоны пластичности на линии продолжения трещины ($\theta = 0$) по условиям текучести Ирвина представлены в следующем виде [7]:

Для плоского напряженного состояния:

$$r_p = \frac{K_1^2}{2\pi\sigma_T^2} \tag{10}$$

Для случая плоской деформации:

$$r_p = \frac{K_1^2}{18\pi\sigma_T^2} \tag{11}$$

Зависимость предела текучести от температуры приближенно может быть представлена в виде экспоненциальных функций [8]:

$$\sigma_T(t) = [\sigma_T]_{t0} \cdot exp\left[\beta_t\left(\frac{1}{t} - \frac{1}{293}\right)\right] \tag{12}$$

где $[\sigma_T]_{t0}$ – предел текучести при нормальных условиях, β_t – характеристика материала.

Подставляя выражения (10), (11), (12) в (4) получим выражение для расчета температурного распределения эффективного коэффициента триаксиальности у вершины трещины.

На рисунке 1 представлена рассчитанная зависимость эффективного коэффициента триаксиальности от температуры для параметров механики разрушения: $K_1 = 50\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
$T_x = -100\text{МПа}$.

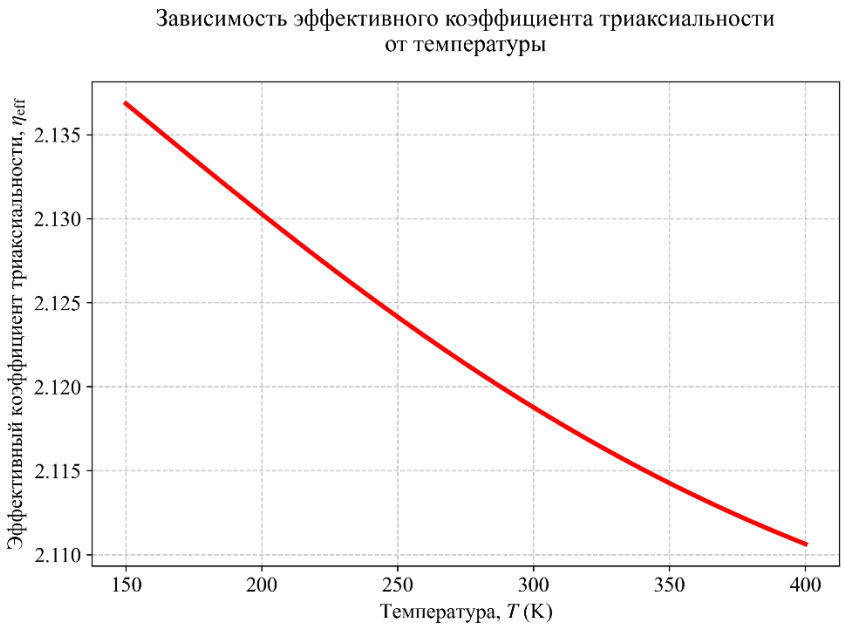


Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента триаксиальности от температуры

Полученные зависимости демонстрируют существенное влияние температуры на жесткость напряженного состояния в зоне предразрушения. Наблюдается монотонное увеличение эффективного коэффициента триаксиальности с понижением температуры. Этот рост обусловлен последовательной цепочкой физических процессов:

1. Снижение температуры приводит к увеличению предела текучести вследствие термически активируемой природы пластической деформации
2. Увеличение предела текучести вызывает уменьшение радиуса зоны пластичности, что следует из формул Ирвина для оценки размера пластической зоны
3. Уменьшение радиуса зоны пластичности при подстановке в выражения для компонент напряжений приводит к росту гидростатической составляющей напряжений относительно девиаторной.

Наблюдаемый рост эффективного коэффициента триаксиальности с понижением температуры качественно объясняет явление хладноломкости. Увеличение жесткости напряженного состояния создает благоприятные условия для реализации хрупких механизмов разрушения.

Выводы. Разработана методика расчета эффективного коэффициента триаксиальности, учитывающая температурную зависимость предела текучести и размеров зоны пластичности.

Показано, что эффективный коэффициент триаксиальности монотонно возрастает с понижением температуры.

Предложенный подход позволяет количественно оценить влияние температурных условий на склонность материала к хрупкому разрушению через анализ эффективного коэффициента триаксиальности.

Список литературы

1. Санников И.И., Голиков Н.И., Семёнов С.В. Исследование ударной вязкости сварного соединения стали 10хснд при сварке в условиях низких климатических температур // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. №1. С. 114-115
2. Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н. Повышение хладостойкости сварных соединений при автоматической сварке под флюсом за счет применения модулированного переменного тока в качестве источника питания сварочной дуги // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. №1. С.130-138
3. Борисова М.З. Особенности формирования изломов стальных образцов в наноструктурном состоянии, подвергнутых испытаниям на ударный изгиб при низких температурах // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. №1. С.196-198
4. Ялыгин С.А., Шапошников Н. О., Слепцов О.И., Ермаков Б.С., Швецов О.В. Структурная неоднородность металла труб как причина потери надежности и долговечности оборудования, работающего в условиях арктического климата // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. №1. С.138-142
5. Kazutake K. Ductile Fracture in Metal Forming, Academic Press, 2020, P.286. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814772-6.00002-3.
6. Астапов Н.С., Кургузов В.Д. Моделирование упругопластического разрушения компактного образца // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2024. №87. С. 44-58. DOI: 10.17223/19988621/87/5
7. Емельянов О.В., Пелипенко М.П. Оценка размера зоны пластических деформаций в вершине усталостной трещины при воздействиях перегрузок «Растяжение» // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2014. №4. С. 21-29
8. Молоков Константин Александрович, Маслов Кирилл Максимович Расчетные методы оценки ударной вязкости сварных элементов с трещинами // Вестник ИШ ДВФУ. 2020. №3 (44). С.22-36

УДК 321.643+551.345
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-122-126

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПЛАНОВО-ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОГО ГРУНТА

Антонов А.А., Иванов Д.С., Яковлев Ю.А., Корнилова В.В.
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова Сибирского отделения
Российской академии наук

Аннотация. *В статье приведены данные измерений планового и высотного положения трубопровода за период ноябрь 2024 – апрель 2025. Измерения проводились в апреле, когда трубопровод находится в мерзлом грунте, и в ноябре, когда грунт вокруг трубопровода талый. Подтверждено что процессы промерзания и оттаивания грунта вокруг магистрального газопровода на главной террасе пойменной зоны и на протоке имеют неравномерный характер. Изменения высотного положения трубопровода, доходят до 2,0 м.*

Ключевые слова: *трубопровод, мерзлый грунт, мониторинг, плановое положение, подводный переход*

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE PLANE-HIGH POSITION OF AN UNDERGROUND PIPELINE IN PERMANENTLY FROSTY SOIL CONDITIONS

Antonov A.A[1]., Ivanov D.S[1]., Yakovlev Yu.A[1]., Kornilova V.V.[1]
[1]Federal state budgetary institution of science Federal research center «Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS

Abstract. *The article presents data on the planned and high-altitude position of the pipeline for the period of November 2024 – April 2025. The measurements were conducted in April, when the pipeline is in frozen soil, and in November, when the soil around the pipeline is thawed. It has been confirmed that the processes of freezing and thawing of the soil around the main gas pipeline on the main terrace of the floodplain zone and on the channel are uneven. The changes in the high-altitude position of the pipeline can reach up to 2.0 m.*

Keywords: *pipeline, frozen soil, monitoring, planned position, underwater crossing*

Введение. Мониторинг изменений планово-высотного положения подземного трубопровода, который эксплуатируется в многолетнемерзлом грунте, представляет собой систематическое наблюдение за его состоянием, что позволяет предотвращать аварийные ситуации и обеспечивать безопасную эксплуатацию. Изменения в высотном положении могут быть вызваны различными факторами, такими как естественные процессы, которые происходят в мерзлотных грунтах. Необходимо учитывать влияние температурных колебаний, а также возможные деформации, которые могут происходить вследствие таяния мерзлоты или других природных явлений [1, 2].

Для эффективного мониторинга используют современные технологии и методики. Это может включать геодезические измерения, использование спутниковых систем и специализированных датчиков. Своевременное выявление изменений позволяет обеспечить надежность работы трубопровода и избежать негативных последствий, таких как утечки или разрушения конструкций.

На подземном трубопроводе можно наблюдать участки, где реальная картина деформации трубопровода является сложной [3, 4]. Особенно это заметно в зонах, подверженных воздействию морозных пучений. В таких местах деформации могут проявляться в виде чередующихся выпуклостей и вогнутостей, которые располагаются друг за другом без каких-либо промежутков. Это явление связано с морозными пучениями, возникающими из-за замерзания влаги в грунте, и приводящими к увеличению объема грунта и, как следствие, к давлению на трубопровод. При этом стоит отметить, что подобные деформации могут значительно варьироваться в зависимости от ряда факторов, таких как: тип почвы, уровень грунтовых вод и температура окружающей среды. Например, в глинистых почвах морозные пучения могут быть более выраженными, чем в песчаных, где вода быстрее уходит из-под поверхности. Кроме того, такие деформации могут негативно сказаться на целостности трубопровода, приводя к утечкам или даже его разрушению. Поэтому для предотвращения подобных последствий необходимо

проводить регулярные мониторинги состояния трубопровода. Таким образом, понимание механизмов, приводящих к деформациям в трубопроводе, является ключевым для обеспечения их надежности и долговечности в условиях сурового климата.

Многолетний мониторинг подземного трубопровода, проложенного в вечномерзлом грунте, показал, что имеются участки, в которых при оттайке и промерзании происходят различные интенсивные деформации.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является магистральный трубопровод условным диаметром 500 мм; пропускной способностью– 528 млн. м3/год; максимальное рабочее давление – 5,5 МПа. Для мониторинга были выбраны следующие участки: участок подводного перехода трубопровода (ППТ) – две нитки основная и резервная, далее I и II нитки ППТ и участок линейной части трубопровода между двумя склонами.

Измерение глубины залегания трубопровода проводились трассоискателемRD-8000 без прямого подключения к трубопроводу и с фиксацией точек замера по GPS и привязкой к местности по реперной точке приемником TOPCONNGR-5. Измерения планово-высотного положения (ПВП) трубопровода производились осенью и весной, в моменты максимумов оттайки и промерзания грунта соответственно [5].

В ноябре 2024 года были сняты замеры глубины залегания на I нитке в количестве 31 точки на прямых участках на расстоянии ~10 м, на склоне ~5 м соответственно. Также были измерены и на II нитке в количестве 21 точки. На участке между двумя склонами трубопровод однониточный и измерения проводились на южном склоне в количестве 31 точек замера глубины залегания для определения планово-высотного положения. Расстояние точек замеров, для снятия глубины залегания ~10 м.

В апреле 2025 года были сняты замеры глубины залегания на I нитке ППТ в количестве 34 точек на прямых участках на расстоянии ~10 м, на склоне ~5 м соответственно, также проведены измерения на II нитке ППТ в количестве 28 точек.
На участке между двумя склонами в количестве 31 точек замера глубины залегания для определения планово-высотного положения. Расстояние точек замеров, для снятия глубины залегания ~10–15 м.

Результаты и обсуждение. На рисунках 1-4 приведены данные измерений планового и высотного положения I-й и II-й ниток подводного перехода трубопровода за период ноябрь 2024 – апрель 2025. Измерения проводились в апреле, когда трубопровод находится в мерзлом грунте, и в ноябре, когда грунт вокруг трубопровода талый.

На рисунках 1 и 2 показано изменение планового и высотного положения трубопровода (I нитка ППТ) за год, в период с ноября 2024 по апрель 2025 года. Плановое положение трубопровода сместилось за данный период не более чем на 0,6 м, максимумы смещения наблюдаются на отметках 60 и -5, -160. На рисунке 2 видно, что произошла просадка грунта на отметках от -60 м до 100 м, до 1 м, а также что произошел подъем трубопровода относительно грунта на отметках от -55 м до -30 м от репера, доходящий до ~0,4 м и грунта на отметках от -15 м до 3 м от репера, до ~2,0 м, просадка трубопровода на отметках от -30 м до -15 м от репера, до ~0,9 м.

На рисунках 3 и 4 показано изменение планового и высотного положения трубопровода (II нитка ППТ) за год, в период с ноября 2024 по апрель 2025 года. Плановое положение трубопровода сместилось за данный период не более чем на 0,6 м, максимумы смещения наблюдаются на отметках 115, 70, 15 и -35. На рисунке 4 видно, что на отметках от 30 м до 70 м произошел подъем грунта до 1 м, а также, что произошел подъем трубопровода относительно грунта на отметках от 5 м до 20 м от репера, доходящий до ~0,8 м, просадка трубопровода на отметках от -40 м до -10 м от репера, до ~1,4 м, и на отметках от 25 м до 50 м от репера, до ~0,3 м.

Плановое и высотное положения магистрального трубопровода были зарегистрированы также на участке расположенном между двумя склонами вдоль протекающего ручья. На этом новом участке также наблюдается увлажненный грунт, а условия функционирования магистральной трубы аналогичны тем, что существуют на береговом склоне протоки. Однако основное отличие заключается в типе почвы, а также в наличие ручья и озера. Результаты представлены на рисунках 5 и 6. По данным исследования обнаружены изменения ПВП магистрального трубопровода, достигающие ~1,0 м.

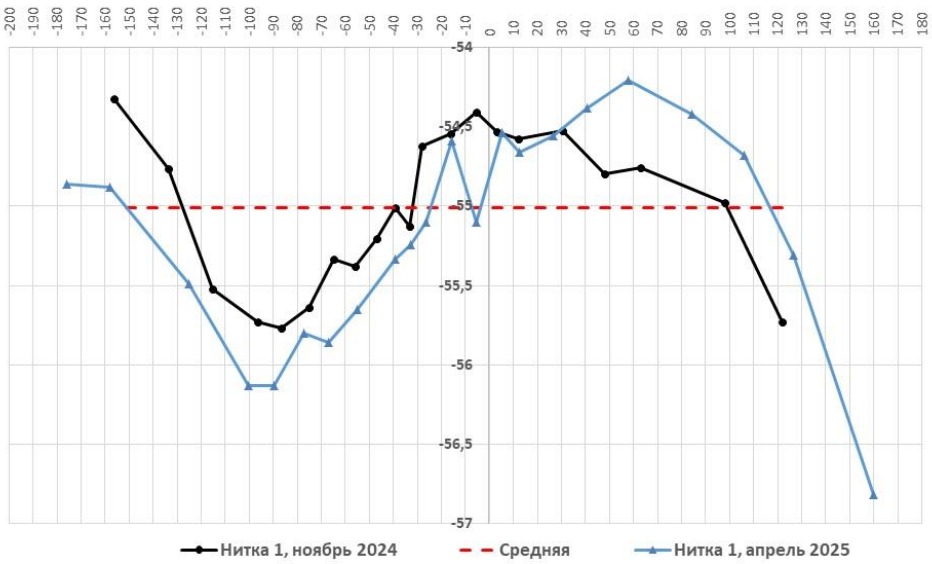


Рис. 1. Плановое положение трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, I Нитка ППТ

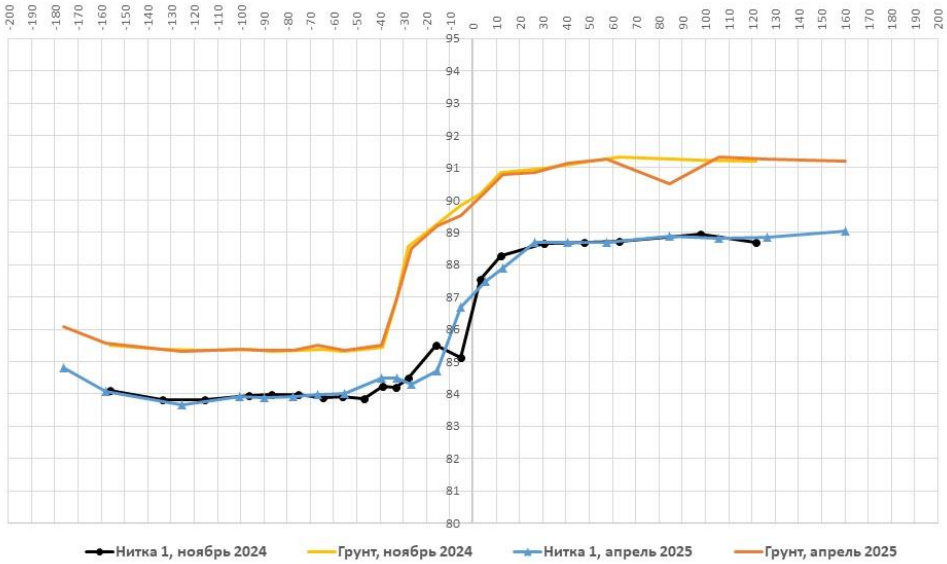


Рис. 2. Измерение дневной поверхности земли и высотного положения трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, I Нитка ППТ

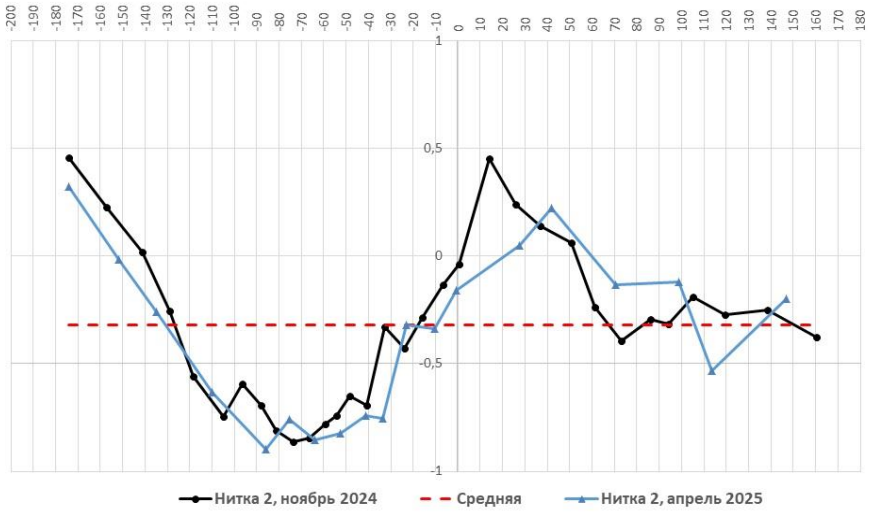


Рис. 3. Плановое положение трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, II Нитка ППТ

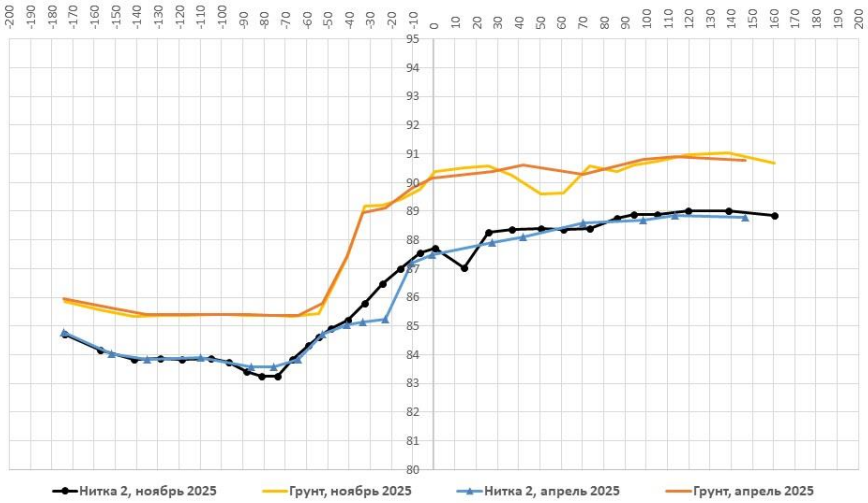


Рис. 4. Измерение дневной поверхности земли и высотного положения трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, II Нитка ППТ

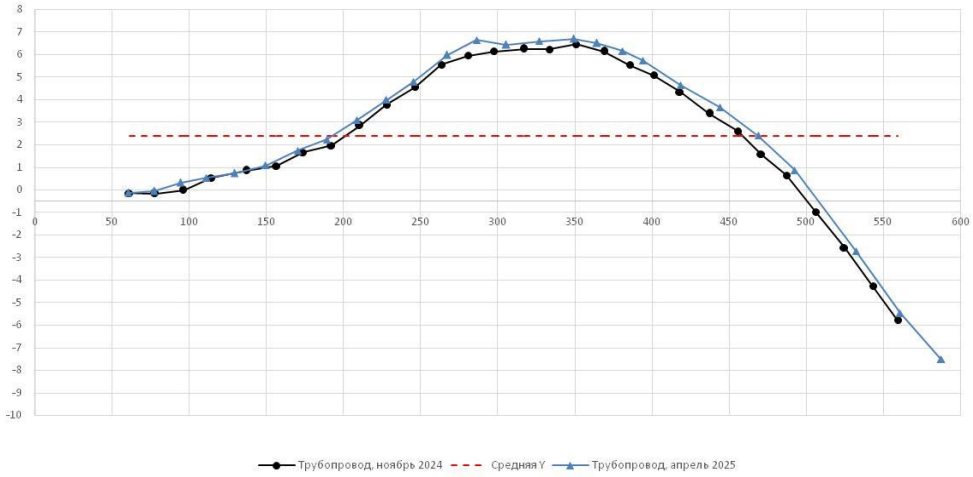


Рис. 5. Плановое положение трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, линейный участок

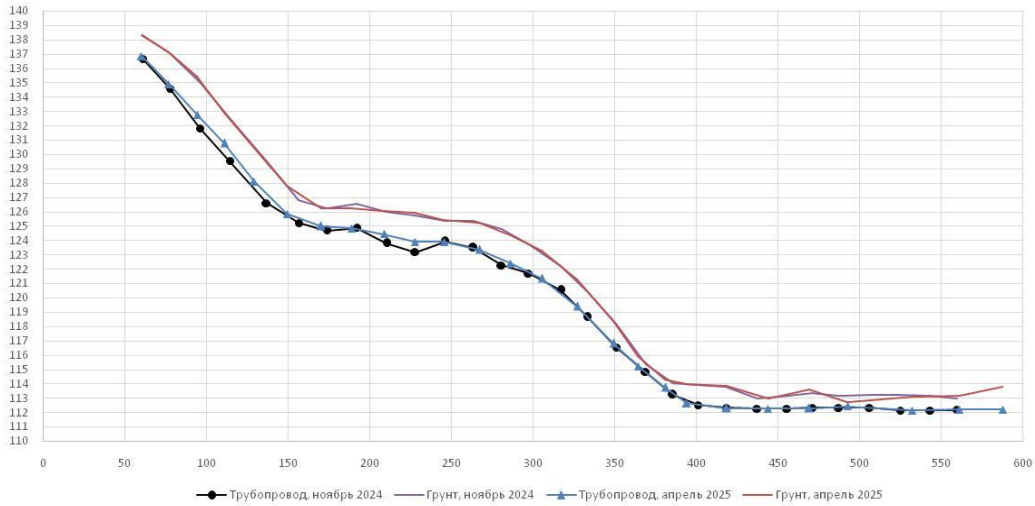


Рис. 6. Измерение дневной поверхности земли и высотного положения трубопровода, ноябрь 2024 и апрель 2025 года, линейный участок

Заключение. Полученные результаты подтверждают, что процессы промерзания и оттаивания грунта вокруг магистрального газопровода на главной террасе пойменной зоны и на протоке имеют неравномерный характер. Это приводит к изменению высотного положения трубопровода, достигающих до ~ 2,0 метра. Форма, которую принимает газопровод, представляет собой не единую арку, а серию выпуклостей и вогнутостей, возникающих последовательно.

Список литературы

1. Шамилов Х.Ш., Гулин Д.А., Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М. Об обеспечении устойчивости подземных магистральных трубопроводов на талых участках многолетнемерзлых грунтов // Нефтегазовое дело, – 2015. т. 13, № 2. С. 111-118
2. Лазарев С.А., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Оценка технического состояния линейной части магистрального газопровода на участках со значительными пространственными деформациями // Газовая промышленность. – 2016. – № 9 (743). – С. 84-90.
3. Иванов Д. С., Аммосов Г. С., Корнилова З. Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2022. – № 1(81). – С. 27-30.
4. Иванов, Д. С., Корнилова З. Г., Аммосов Г. С. Метод последовательного приближения с использованием градиентного спуска при оценке напряжений в подземных трубопроводах со сложными деформациями в пермафростной зоне // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2023. – № 4(86). – С. 23-28. – EDN UXDRJF.
5. Антонов А.А., Корнилова З.Г., Яковлев Ю.А., Терешкин А.Л. Методы и особенности исследования подводных переходов трубопроводов в среднем течении реки Лена // XVIII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: сб. материалов (Екатеринбург, 27-31 мая 2024 г.). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2024. – 230 с. – ISBN 978-5-6040873-4-3.– С. 151.

УДК 697.1; 620.19
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-127-131

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ЗАГЛУШКИ ОТОПИТЕЛЬНОГО РЕГИСТРА

Аргунова А.А.[1], Кузьмин С.А.[1], Адамов Р.Г.[1], Васильева М.И.[2]
[1] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск
[2] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: argu.na @mail.ru

***Аннотация**. Проведено комплексное исследование разрушения деталей отопительной системы: сварного шва, соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой с целью установления причин выхода из строя. Цель работы заключается в выявлении причин разрушения заглушки отопительного регистра. Методами оптической и электронной микроскопии, химического анализа и металлографии оценена структура, изучены химический состав, строение макро- микроструктуры поверхности разрушения части отопительного регистра подогревателя. Установлено, что разрушение сварного шва, соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой произошло в результате внутреннего высокого напряжения металла шва и заглушки, а также в результате высокого давления, возникшего при расширении воды внутри регистра подогревателя в связи с ее замерзанием.*

***Ключевые слова:** феррито-перлитная микроструктура, фрактографический анализ, хрупкое и вязкое разрушение.*

INVESTIGATION OF THE NATURE OF THE PLUG DESTRUCTION HEATING REGISTER

Argunova A.A.[1], Kuzmin S.A.[1], Adamov R.G.[1], Vasilyeva M.I.[2]
[1] North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk
[2] Institute of Physical and Technical Problems of the North. V.P. Larionov SB RAS, Yakutsk

***Abstract.** A comprehensive study of the destruction of the heating system parts has been carried out: the weld connecting the heater register pipe to the plug in order to determine the causes of the failure. The purpose of the work is to identify the causes of the destruction of the plug of the heating register. Optical and electron microscopy, chemical analysis, and metallography have been used to evaluate the structure, chemical composition, and macro-microstructure of the fracture surface of a part of the heater's heating register. It was found that the destruction of the weld connecting the pipe of the heater register to the plug occurred as a result of the internal high stress of the seam metal and the plug, as well as as a result of the high pressure generated by the expansion of water inside the heater register due to its freezing.*

***Keywords:** ferrite-pearlite microstructure, fractographic analysis, brittle and viscous fracture.*

Отопительный регистр представляет собой конструкцию из трубных отрезков, соединенных сваркой, выполняющих функцию обычных отопительных батарей. Основными преимуществами такой конструкции считается простота устройства, доступность расходных материалов и совместимость с любыми системами при малом гидравлическом сопротивлении [1, 2]. Область применения отопительных приборов регламентируется СП 60.13330.2020 [3]. В отопительных регистрах в качестве жидкости применяется вода. Система водяного отопления является распространенной благодаря высокой теплоемкости воды, эффективного регулирования теплоотдачи при различных температурах. Однако, следует учитывать основной недостаток воды – это расширение при замерзании, которая приводит к нарушению герметичности системы, и как правило, в местах локальных дефектов сварки или в местах скопления микродефектов трубы [4]. В условиях Севера частыми случаями промерзания отопительных систем являются: нарушение правил технической эксплуатации, несвоевременная подача тепла в отопительные системы или форс мажорные обстоятельства. В результате этого происходит расширение воды в системе отопления, что приводит к выходу из строя всю систему.

В данной статье проведено исследование сварного шва, соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой [5, 6]. Отрезок трубы, представленный на исследование, является частью отопи-

тельного регистра подогревателя. Внутренний диаметр трубы 98,5 мм, внешний диаметр 102 мм, толщина трубы – 3,8 мм, высота – 24,5 мм. Сверху трубы находится сварной шов. Внутри трубы на момент исследования, находился лед в виде столба, выступающего над поверхностью сварного шва, соединяющего трубу с заглушкой (см. рис. 1, стрелкой отмечен сварной шов).

Рис. 1. Отпиленная часть регистра подогревателя. Стрелкой отмечено разрушение по сварному шву, соединяющего трубу с заглушкой

Заглушка, представленная на исследование, имеет круглую куполообразную форму диаметром № 104 мм, толщиной 3,8 мм. По краям и в центре заглушки имеется сварной шов. В центре заглушки от конца сварного шва имеется повреждение металла в виде расширяющийся в центре трещины (рис. 2).

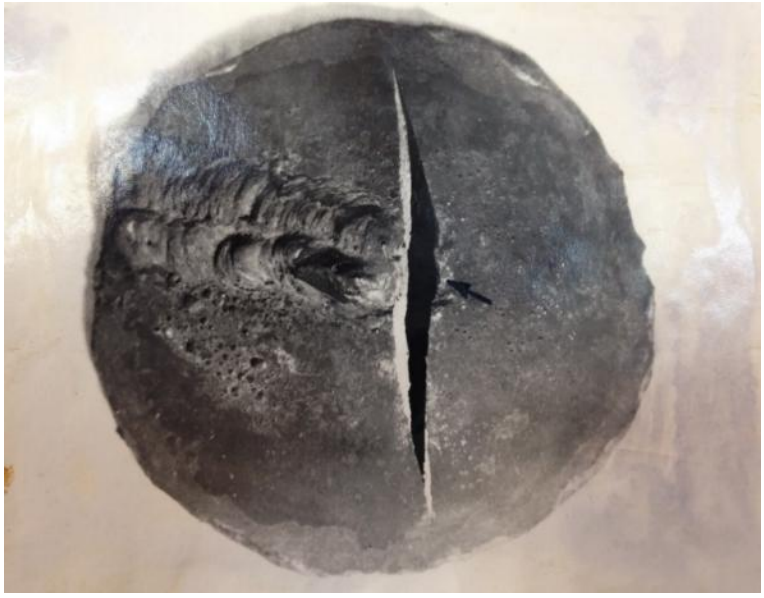


Рис. 2. Заглушка регистра подогревателя. Стрелкой отмечено разрушение

При макроисследовании поверхности разрушения (повреждений) трубы и заглушки на микроскопе «Цитовал» при 25^X до 40^X, установлено:

- Характер поверхности сварного шва трубы регистра блестящий, кристаллический, что свидетельствует о хрупком происхождении разрушения;
- Поверхность разрушения по месту соединения заглушки с трубой – сварному шву имеет блестящий кристаллический характер, что свойственно для хрупкого процесса (типа) разрушения.
- Разрушение в виде трещины на заглушке наиболее раскрыто в средней части, в конце сварного шва, имеет радиальные рубцы, исходящие снизу вверх с околошовной зоны сварного соединения, менее энергоемкого, по сравнению с остальным материалом, что свидетельствует о направлении разрушения с внутренней стороны (см. Рис. 3)

Рис. 3. Трещина в середине заглушки регистра подогревателя

Исследование химического состава. Для определения марки стали и микроструктуры были вырезаны 2 образца с материала исследуемой трубы. Химический состав исследуемых сталей был проведен на приборе «WAS Foundry-Master» (Германия) (табл.1). Анализ химического состава проведен для исследуемой трубы и соответствует стали марки 10 сп. (конструкционная низкоуглеродистая сталь широкого спектра применения: в строительстве, котельном хозяйстве, на производственных предприятиях) [7].

Таблица 1. Химический состав исследуемого материала

№	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Примечание
1 обр.	0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	0,15	0,25	-	-	-	10 сп

Для определения микроструктуры исследуемого образца проведено поэтапная пробоподготовка: шлифование, полирование, травление 4% раствором HNO_3 (азотной кислоты). При исследовании микроструктуры под оптическим микроскопом «Neophot-32» фирмы «Karl Jeiss Jena» при увеличении x100 установлено, что структура ферритно-перлитная, мелкозернистая, балл зерна 6-7, при увеличении x1000 видно, что перлит пластинчатый. Сталь с таким элементным составом (табл. 1) и структурой должна обладать хорошей пластичностью т. е. сопротивляемостью разрушению; хорошей свариваемостью, т.к. содержание углерода в ней мало [7].

Исследование поверхности разрушения проводилось на сканирующем электронном микроскопе «JXA-50A» фирмы «Jeol» (Япония).

В предполагаемом очаге разрушения, расположенного с внутренней стороны заглушки, в конце сварного соединения, на месте сильного раскрытия трещины видна малая зона пластической деформации, переходящей в квазихрупкое разрушение. Квази-отрыв возникает в сталях при температурах ниже критической хрупкости [8, 9]. Несмотря на то, что по своей энергоемкости подобный излом является хрупким т. е. металл обладает низким сопротивлением разрушению, поверхности излома однозначно содержат признаки предшествовавшей пластической деформации.

При исследовании поверхности разрушения заглушки по месту сварного соединения её с трубой установлен хрупкий тип разрушения, характеризующийся внутри кристаллическим сколом, представляющий кристаллические фасетки (Рис. 4, а). Как правило, это складчатый рисунок в виде расходящихся лучей или в виде характерного ручьистого узора от сливающихся в единый «поток» отдельных микротрещин (Рис. 4, б). Образование этих рельефов обусловлены возникновением слияния в единую поверхность разрушения соседних трещин, развивающихся в параллельных плоскостях.

а *б*

Рис. 5. Топография разрушения металла по месту сварного соединения: хрупкие фасетки скола: *а* – x300; *б* – x1000

Таким образом, фрактографический анализ показал, что очаг разрушения расположен с внутренней стороны заглушки в конце сварного соединения на месте сильного раскрытия трещины, и что поверхности разрушения имеют преимущественно хрупкий характер разрушения, который возникает в сталях при температурах ниже критической температуры хрупкости и от высоких внутренних напряжений металла [8–11].

На основании проведенных исследований установлено следующее:

Исследуемая деталь регистра изготовлена из углеродистой стали 10 сп, имеет ферритно-перлитную структуру, мелкозернистую, балл зерна 6–7, перлит пластичный. Сталь с таким элементым составом и структурой должна обладать хорошей пластичностью [7] т. е. сопротивляемостью разрушению, а также хорошей свариваемостью, ибо содержание углерода намного меньше, чем 0,25 %, который приводит к образованию закаленной структуры стали в зоне шва. В нормальном режиме эксплуатации т. е. 20°C и выше, у такой стали должна быть вязкий тип разрушения, ямочный.

Исследованием поверхности разрушения выявлено, что разрушение началось с внутренней стороны заглушки, в конце сварного соединения, о чем свидетельствуют радиальные рубцы, исходящие снизу вверх. Поверхность разрушения трубы имеет хрупкий характер разрушения, который возникает в сталях при температуре ниже критических, и от высоких внутренних напряжений металла.

Оценивая в совокупности полученные результаты исследования, учитывая наличие льда внутри трубы на момент исследования, куполообразную выдавленную форму заглушки, характер разрушения (хрупкий) и его направленность (с внутренней стороны), специфические свойства металла, следует признать, что:

- Разрушение сварного шва соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой и основного металла заглушки произошло в результате внутреннего напряжения металла шва и заглушки, высокого давления, возникшего при расширении воды внутри регистра подогревателя в связи с ее замерзанием;
- Куполообразная выпуклость заглушки с имеющийся в ней трещиной, возникающая к моменту разрушения регистра, указывает на достаточно высокую прочность сварного шва, соединяющего заглушку с трубой регистра по сравнению с основным металлом.

Вывод. Проведено фрактографическое исследование сварного шва, соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой. Химическим анализом выявлено соответствие исследуемой трубы составу конструкционной низкоуглеродистой стали марки 10 сп. Определен характер разрушения поверхности сварного шва по месту соединения заглушки с трубой – хрупкий. Разрушение сварного шва соединяющего трубу регистра подогревателя с заглушкой и основного металла заглушки произошло в результате внутреннего высокого напряжения и давления металла шва и заглушки, возникшего при расширении воды внутри регистра подогревателя в связи с ее замерзанием.

Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН (ЦКП ФИЦ ЯНЦ).

Список литературы

1. Крупнов, Б.А. Отопительные приборы, производимые в России и ближнем зарубежье / Б.А. Крупнов, Д.Б. Крупнов. – М.: АСВ, 2015. – 176 с.
2. Золотарев И. А. Окара В. Г., Коваленко И.И. Производство стальных сварных конструкций. –М:, Стройиздат. –1985. – 120 с.
3. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / Минстрой России. – М.: Стандартинформ, –2020. – 156 с.
4. Корнев, В.М. Охрупчивание материала стальных конструкций при низких температурах и катастрофическое разрушение // Физическая мезомеханика. – 2018. –Т. 21. –№ 2. –С. 45-55.
5. Рыбаков В. М., Ширшов Ю. В., Чернавский Д. М., Кривошей А. В., Фоминых В. П. Сварка строительных металлических конструкций. –М., –1993. – 266 с.
6. РД 34 15.132-96. Сварка и контроль качества сварных соединений металлоконструкций зданий при сооружений промышленных объектов. – Москва: НПО ОБТ, 2001. – 120 с.
7. Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф. Марочник сталей и сплавов. –М.: Научно-техническое издательство “Машиностроение”, –2015. –1215 с.
8. Бесман А. Г. Исследование особенностей микростроения усталостных трещин изломов. –М., Научная публикация ЦНИИТМАШ, №307, –1970, –4 с.
9. Гордеева Т. А. Фрактография. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т. 1. Физические методы исследования металлов (Справочное пособие). –М., «Машиностроение», –1971, – С. 202-231.
10. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций /уч. пособие для студентов высших учебных заведений. – М., МИСиС. –2007. – 264 с.
11. Иванова В.С., Терентьев В. Ф. Природа усталости металлов. –М., «Металлургия», –1975. – 456 с.

УДК 697.1; 620.19
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-132-135

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Аргунова А.А.[1], Кузьмин С.А.[1], Адамов Р.Г.[1], Васильева М.И.[2]
[1] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск
[2] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: argu.na@mail.ru

Аннотация. *В настоящее время наблюдается тенденция увеличения доли аварий на магистральных газопроводах по причине коррозионной неустойчивости материала трубопровода. В статье приведены результаты исследований поврежденного участка газопровода, используемого в условиях Севера. Проведены исследования химического состава, визуальный осмотр внешних и внутренних сторон предоставленного фрагмента газопровода. Исследованы структуры основного металла и участка подверженного дефекту со сквозным отверстием. Структура основного материала исследуемой трубы мелкозернистая, слабополосчатая, феррито-перлитная. На участке ближе к дефекту структура крупнозернистая, с видманштеттовым образованием. Выявлены многочисленные следы деформации и коррозионных ямок, свидетельствующие о хрупкой структуре и динамических нагрузках при эксплуатации.*

Ключевые слова*: газопровод, видманштетт, коррозионные ямки, феррито-перлитная микроструктура.*

INVESTIGATION OF THE FRACTURE SURFACE OF THE DAMAGED MAIN GAS PIPELINE

Argunova A.A.[1], Kuzmin S.A.[1], Adamov R.G.[1], Vasilyeva M.I.[2]
[1] North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk
[2] Institute of Physical and Technical Problems of the North. V.P. Larionov SB RAS, Yakutsk

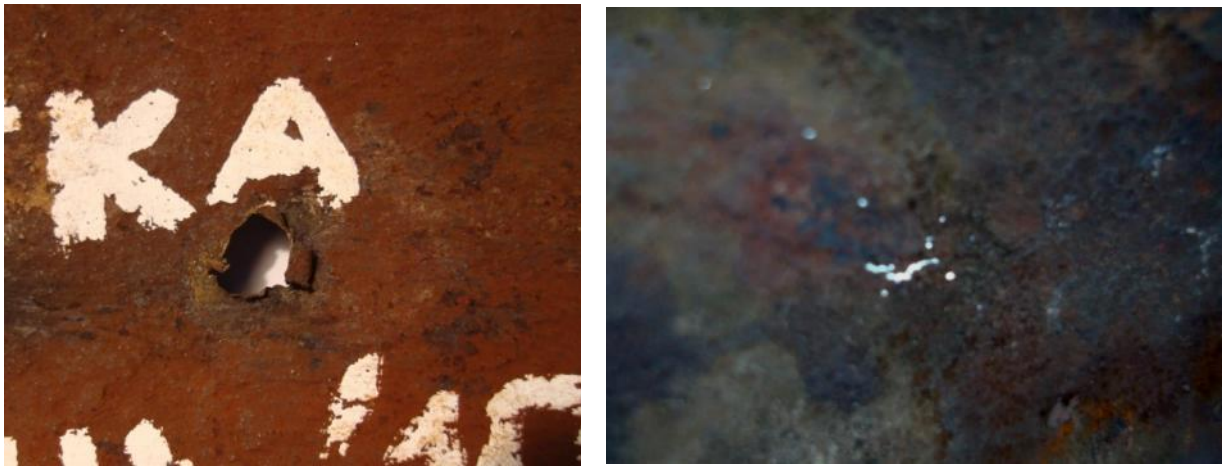
Abstract*. Currently, there is a tendency to increase the proportion of accidents on main gas pipelines due to the corrosion instability of the pipeline material. The article presents the results of studies of the damaged section of the gas pipeline used in the conditions of the North. Chemical composition studies and visual inspection of the external and internal sides of the provided gas pipeline fragment were carried out. The structures of the base metal and the defect-prone area with a through hole are investigated. The structure of the main material of the pipe under study is fine-grained, slightly striped, ferrite-pearlite. In the area closer to the defect, the structure is coarse-grained, with a Widemannstatt formation. Numerous traces of deformation and corrosion pits have been identified, indicating a brittle structure and dynamic loads during operation.*

Keywords*: gas pipeline, widmannstatt, overheating, corrosion pits, ferrite-pearlite microstructure.*

Одним из важных источников загрязнения окружающей среды является коррозионное разрушение трубопроводов, транспортирующих различные коррозионно-активные вещества, например газы, нефть, или продукты их химической переработки. Протяженность трубопроводов, используемых для транспортных целей, непрерывно возрастает, что связано с бесспорным их преимуществом перед всеми существующими способами транспортировки нефтепродуктов. В то же время увеличение протяженности трубопроводов приводит к повышению возможности их разрушения в результате коррозии, а значит, и к возрастанию загрязнения окружающей среды вследствие разлива транспортируемых веществ [1–2]. Для предотвращения экологической опасности внимание уделяется контролю качества по всему периметру поверхности трубопроводов, и особенно, в местах их пересечения с водоемами. В результате воздействия внешних факторов с течением времени меняются служебные свойства трубопроводных конструкций, что приводит к развитию различных дефектов, которые приводят к аварийным разрушениям [3–5]. При этом восстановление разрушенного участка возможна вырезкой и заменой их на новые трубы или ремонт без вырезки с помощью полноохватных муфтовых конструкций. Поэтому мониторинг состояния трубопроводов в процессе эксплуатации и своевременный ремонт или замена изношенных участков является актуальной задачей. Для выявления начальных этапов дефектов и коррозионного поражения трубы используется неразрушающий контроль [4–6]. Однако, если про-

изошла авария, необходимо провести исследования структурно-деградационных изменений трубопровода, для установления причин случившегося. Исходя из этого, целью работы является исследование макро- и микроструктуры разрушенного газопровода.

Объектом исследования является поврежденный кусок газопровода овальной формы размером ~ 165x112 мм, толщиной стенки ~ 8 мм. С внутренней стороны поверхность равномерно покрыта продуктами коррозии коричневого цвета, также имеются следы деформации (вогнутости). Имеется сквозное повреждение неправильной формы размером ~7x7 мм, толщина стенки газопровода по краям сходит на нуль, то есть полное разъедание материала продуктами коррозии, поврежденные края как-бы втолкнуты во внутрь газопровода (рис. 1, а).



а б

Рис. 1. Поврежденный кусок со сквозным отверстием: а – сквозное повреждение, края отверстия, втолкнутые во внутрь газопровода; б – участок стенки газопровода со сквозными отверстиями и узкой ветвистой трещиной

С внешней стороны образец деформирован, хорошо выражены следы деформации размером ~123 x80 мм. Живое сечение материала трубы начинает уменьшаться с границ деформации, на месте сквозного отверстия размером ~ 7x7 мм оно уменьшается до нуля мм, также прослеживается узкая ветвистая трещина размером 4 мм и сквозные отверстия (рис. 2, б).

Химический состав исследуемой стали проведен на приборе «WAS Foundry-Master» (Германия). В табл. 1 приведен результат химического анализа и по химическому составу соответствует стали Ст20 (конструкционная углеродистая качественная сталь, применяемая для производства деталей, сварных конструкций, в строительстве, машиностроении (ГОСТ 1050-88)) [7]. Основным недостатком данной стали является коррозионная неустойчивость, которая наиболее проявляется при эксплуатации во влажных условиях или в соприкосновении с агрессивной средой.

Таблица 1. Химический состав исследуемого трубопровода

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	P	S
Образец	0,22	0,26	0,59	0,08	0,07	0,004	0,01	0,01	0,02

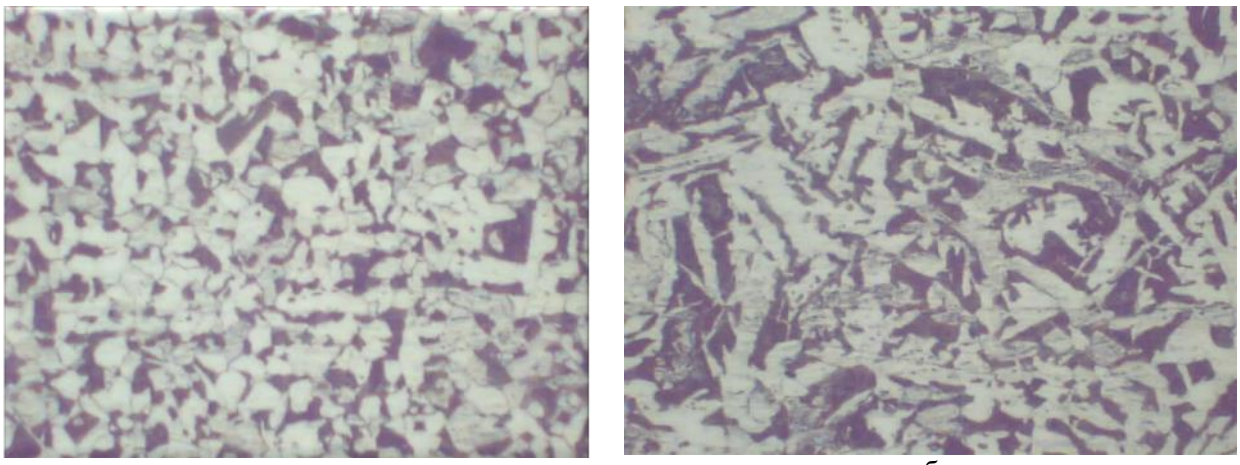
С помощью макроанализа выбраны участки для дальнейшего микроскопического анализа. Для определения структуры исследуемой стали были вырезаны 2 образца:

– 1 образец вырезан с участка, не подверженного дефекту (основной металл);

– 2 образец с участка, подверженного дефекту (дефектный металл).

Вырезанные образцы шлифовали, полировали, для выявления микроструктуры травили 4%-ным раствором азотной кислоты (HNO_3) в этиловом спирте. Исследование микроструктуры образцов проводили на оптическом микроскопе «МЕТАМ РВ-22» при увеличениях x100 и x500.

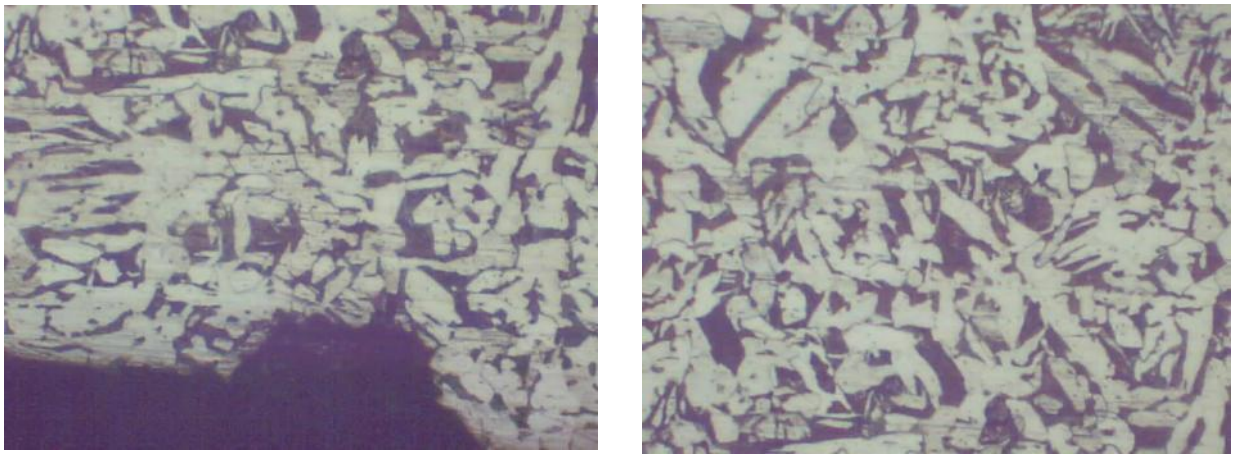
Основной металл состоит из мелко-зернистой, феррито-перлитной, слабополосчатой структуры, с баллом зерна 6–7 (рис. 2, а). Форма зерен равноосная. Известно, что при увеличении количества углерода в стали перлитное составляющее структуры преобладает чем ферритное. В данном случае процентное содержание перлита к ферриту 20/80 соответственно. Однако в 1 образце есть участок с крупнозернистой структурой, которая находится ближе к дефектному участку (рис. 2, б).



а б

Рис. 2. Микроструктура основного металла, х500: а – мелкозернистая феррито-перлитная, слабополосчатая микроструктура; б – участок с крупнозернистой микроструктурой

Микроструктура образца с поврежденного дефектом участка имеет многочисленные коррозионные ямки и крупнозернистое строение с игольчатым образованием в виде видманштетта (Рис. 3). Следует отметить, что образование видманштетта свидетельствует о чрезмерном перегреве, при котором происходит фазовая перекристаллизация. С такой структурой сталь становится очень хрупкой, плохо выдерживает динамические нагрузки и непригодна для изделий более или менее ответственного назначения. Сочетание мелкозернистой равномерной структуры представленной детали с крупнозернистой, с игольчатым образованием структуры, свидетельствует о низких ее механических характеристиках, о высокой концентрации напряжений, имеющихся в стали и о низкой сопротивляемости ее разрушению. При исследовании структуры образца с дефектом, с места зарождения коррозионных ямок, видна деформация зерен, раздробление (рис. 3, а). При отдалении от поврежденного участка раздробление зерен уменьшается, однако сохраняется крупнозернистая структура (рис. 3, б).



а *б*

Рис. 3. Микроструктура поврежденного участка, х500: *а* – развитие коррозионной ямки, вблизи разрушения видна измельченная структура, вызванная деформацией, наклепом; *б* – по мере удаления с места повреждения деформация и наклеп уменьшаются

Таким образом установлено, что материал трубы газопровода изготовлен из стали Ст20. Проведен макроанализ предоставленного поврежденного куска газопровода. Зафиксированы геометрические параметры сквозных повреждений, которые полностью повержены разъеданию материала продуктами коррозии. Исследованы структуры материалов основного металла (мелкозернистая феррито-перлитная) и участка поврежденного дефектом (крупнозернистая структура с видманштеттовым образованием). Структура дефектного участка имеет места образования многочисленных коррозионных ямок, вблизи сквозного повреждения наблюдается раздробление зерен и наклеп. Коррозионные ямки могут быть вызваны неблагоприятным расположением данного участка газопровода, то есть с местом соприкосновения с агрессивной средой. Учитывая подверженность стали марки ст20 разъеданию коррозии при эксплуатации в неблагоприятных условиях, рекомендуется использовать усиленное защитное покрытие.

Список литературы

1. Козырев Н.Б. Об особенностях обнаружения стресс-коррозионных повреждений магистральных газопроводов // Коррозия. № С.96-98.
2. Гареев А. Г., Насибуллина О. А., Ризванов Р.Г. Изучение коррозионного растрескивания магистральных газонефтепроводов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 6. С. 126-147.
3. Bekim Berisha, Christian Raemy. Multiscale modeling of failure initiation in a ferritic–pearlitic steel // Acta Materialia. – 2015 – 100 – P. 191-201.
4. Melchers R.E. Predicting long-term corrosion of metal alloys in physical infrastructure // npj Mater Degrad. 2019. V. 3. Article number: 4.
5. Cole I.S., Marney D. The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils // Corrosion Science. 2012. V.56. P. 5-16.
6. Hou Y., Lei D., Li S., Yang W., Li Ch. Experimental Investigation on Corrosion Effect on Mechanical Properties of Buried Metal Pipes // International Journal of Corrosion. 2016. V.2016. Article ID 5808372. 13 p.
7. Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф. Марочник сталей и сплавов. –М.: Научно-техническое издательство “Машиностроение”, –2015. –1215 с.

УДК 620.186 539.422
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-136-139

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ МЕТОДОМ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТМ-АНАЛИЗА ИЗЛОМОВ

Ачикасова В.С., Лепова К.Я.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: achikasova@iptpn.ysn.ru

Аннотация. *Разработка широкого спектра методик анализа и диагностики свойств материалов разной мерности, в том числе субмикронной структуры металлов и сплавов является одной из главных задач в современном материаловедении. Актуальным направлением развития данных методов является увеличение разрешающей способности оборудования. Одним из таких перспективных методов исследования свойств материалов является метод зондовой микроскопии, которая позволяет анализировать и наблюдать поверхность образцов материала в трех-мерных координатах. В данной работе был применен метод сканирующей туннельной микроскопии для исследования изломов образцов из рельсовой стали, испытанных на ударную вязкость*

Ключевые слова: *сканирующая туннельная микроскопия, железнодорожные рельсы, изломы, ударные испытания, шероховатость*

INVESTIGATION OF FAILURE MECHANISMS OF RAIL STEEL BY MORPHOLOGICAL STM FRACTURATION ANALYSIS METHOD

Achikasova V.S., Lepova K.Ya.
Institute of Physical and Technical Problems of the North. V.P. Larionova SB RAS
FIC «Yakutsk Scientific Center» SB RAS

Abstract*. Developing a wide range of methods for analyzing and diagnosing the properties of materials of various dimensions, including the submicron structure of metals and alloys, is a key challenge in modern materials science. A key area of research for these methods is increasing the resolution of equipment. One such promising method for studying material properties is probe microscopy, which allows for the analysis and observation of the surface of material samples in three-dimensional coordinates. In this study, scanning tunneling microscopy was used to examine fractures of rail steel specimens tested for impact strength.*
Keywords: *scanning tunneling microscopy, railway rails, fractures, impact testing, roughness*

Введение. В материаловедении применяются в основном экспериментальные методы исследования структур сталей и сплавов. Известные и часто используемые методы оптической и электронной микроскопии в исследовании структур металлов и сплавов имеют широкие аналитические возможности, но вместе с тем в данных методах имеются недостатки. Данные методы дают возможность получения двухмерных (2D) изображений, хотя и имеются косвенные методы получения объемных изображений, однако не всегда удовлетворяют требованиям исследователей. В настоящее время, в современной металлографии появились новые методы исследований, связанные с использованием принципиально новых способов неоптического построения изображения поверхности, в частности зондовая микроскопия [1, 2, 3]. Метод сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) является эффективным инструментом для исследования тонкой структуры поверхности образцов.

Известно, что эксплуатация сложных технических систем, таких как железнодорожный и автомобильный транспорт в суровых климатических условиях Севера характеризуется частыми простоями техники из-за поломок, аварий и ремонта. Основной причиной является то, что материалы железнодорожных рельсов и колёсных пар подвержены действию низких климатических температур, приводящих к изменению свойств как за счёт вязко-хрупкого перехода, так и вследствие возникновения различных дефектов, возникающих в структуре материала и обуславливающих концентрацию напряжений.

Изучение микроструктуры, морфологии поверхности рельсовой стали на различных структурных уровнях дает возможность исследовать изменения структуры материала вследствие такой деградации, повреждения материала[4]. Актуальность темы обусловлена тем, что железнодорожная отрасль в Республике Саха(Якутия) в настоящее время находится на стадии активного развития, повышаются

как пассажиропоток, так и грузовые перевозки ж/д транспортом по маршруту Нерюнгри – Томмот – Алдан – Нижний Бестях, строится промышленная магистраль Нижний Бестях – Магадан [5] .

Материал и методика исследования. Объектом исследования является сталь головки железнодорожного рельса марки Р50 после эксплуатации в Республике Саха (Якутия).

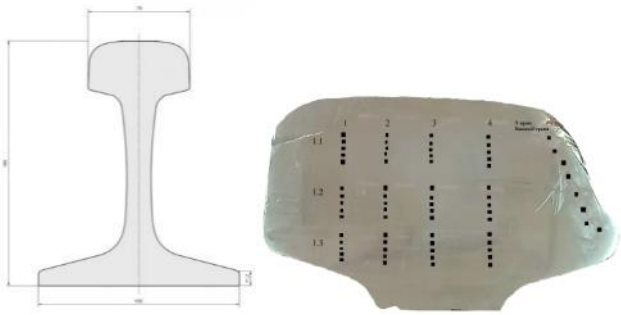


Рис. 1. Схема общего вида рельса и вид исследуемой головки рельса.
На образце по сечению отмечены измерения микротвердости

Таблица 1. Химический состав исследуемой стали

C, Углерод	Si, Кремний	Mn, Марганец	Cr, Хром	Ni, Никель	P, Фосфор	S, Сера	Mo, Молибден	Cu, Медь	Fe, Железо
0,80	0,31	0,98	0,06	0,07	0,01	0,01	0,02	0,13	ост

Для выявления механических характеристик исследуемой стали проведены механические испытания на ударный изгиб, определена ударная вязкость KCV=12,39Дж/см^2. Определены твердость 367,47 кгс/мм^2 и микротвердость по сечению головки рельса: Н, 3842 МПа вблизи поверхности катания. Микроструктура исследуемой стали характеризуется наличием феррито-перлитовой микроструктурой.

Цель работы – исследование механизмов разрушения рельсовой стали методом морфологического СТМ анализа. При эксплуатации в сложных климатических условиях пара рельс-колесо испытывают контактно-усталостные нагрузки, приводящие к необратимым изменениям структуры и накоплению повреждений в материале. В исследовании морфологии поверхности усталостных разрушений сталей существуют множество методов изучения данных механизмов усталости. Методы анализа топографии усталостных трещин, после испытаний образцов на ударный изгиб применяются исследователями во многих работах с применением параметров шероховатости поверхности [6].

В данной работе на нанометровой приставке профилометра модели 130 производства АО завода «Протон» (Москва, Зеленоград РФ), представляющей собой сканирующий туннельный микроскоп SMM-2000 (рис. 2.), исследованы изломы ударных образцов стали головки железнодорожного рельса после эксплуатации, испытанных на удар при +20 ^{0}С (рис. 3).

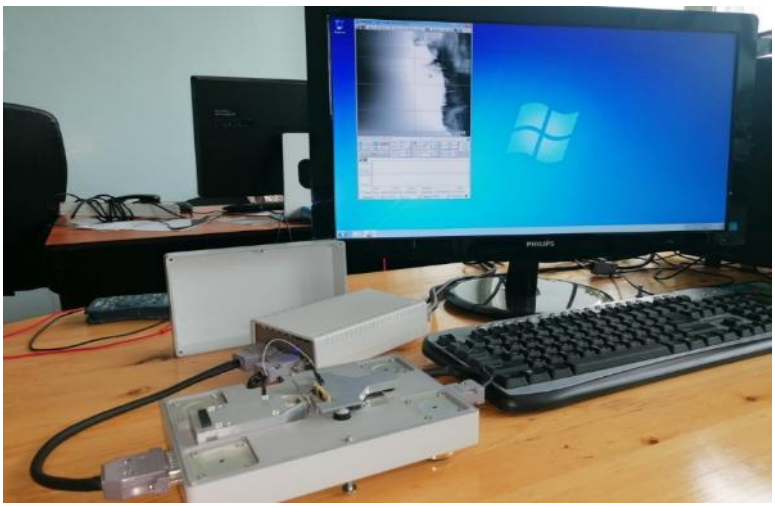
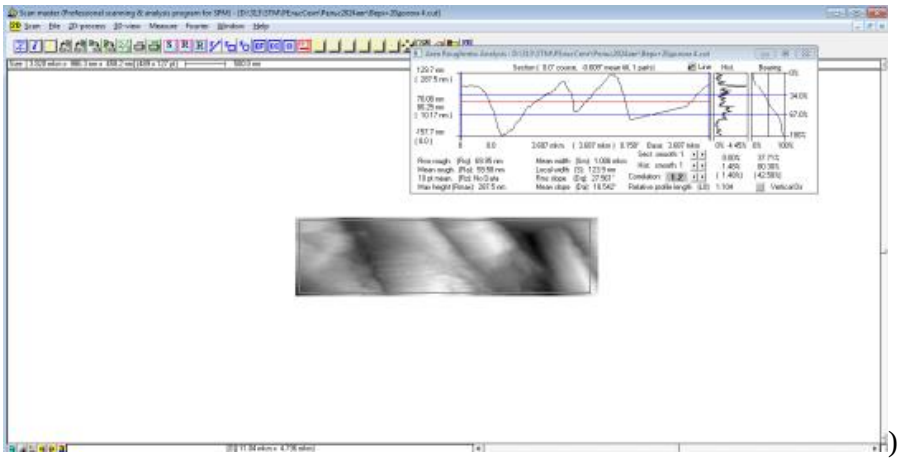


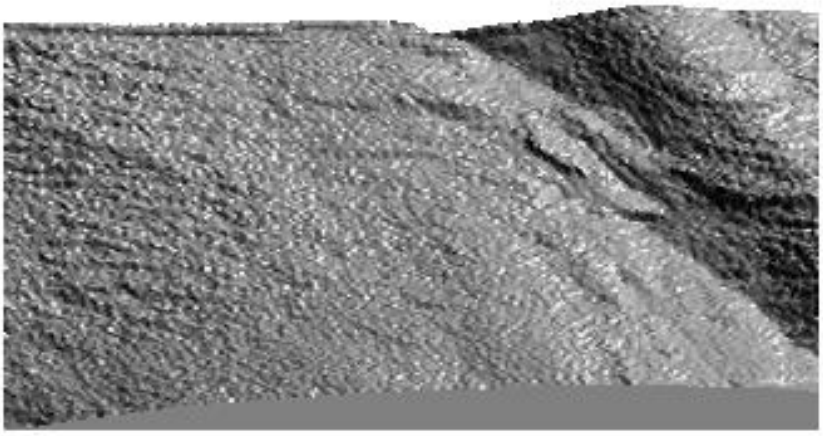
Рис. 2. Зондовый микроскоп SMM-2000

Рис. 3. Поверхность образцов после ударного изгиба при +20 ^{0}С

Определение параметров рельефа изломов проводились в зоне надреза, в центре излома образца и в зоне долома. При сканировании выбраны размеры кадров 4х4 мкм и 2х2 мкм. При обработке кадров была выбрана медианная фильтрация 3х3, 5х5, в зависимости от качества полученного скана.



а)



б)

Рис. 4. Вид сканов туннельной микроскопии: *а)* поверхности 2D и график профиля поверхности излома стали; *б)* поверхности 3D излома стали

Наличие в меню Программы Skan Master измерительных инструментов позволяет применить команду Area Rougness, позволяющая измерить параметры шероховатости по прямоугольному сечению

изображения полученного скана. Проводились измерения параметров рельефа: среднеарифметическая шероховатость Ra; средний шаг неровностей профиля Sm, максимальная высота профилей и базовую длину исследуемого профиля (рис. 4).

Таблица 2. Параметры шероховатости излома образца в зоне сканирования

Части головки рельса	Зоны изломов ударных образцов	Температура испытания, 20^0C			
		Параметры рельефа			
		Среднеарифметическая шероховатость R_a, nm	Средний шаг шероховатостей профиля S_m, nm	Высота профиля R_{max}, nm	База, mkm
Верхняя часть	Надрез	Скан 4х4 12,68	344,8	73,94	2,14
	Центр	Скан 2х2 10,29	-	38,59	1,022
	Долом	31,9	151,6	178,28	2,72
Средняя часть	Надрез	12,94	-	48,68	0,87
	Центр	30,7	-	117,4	1,18
	Долом	31,52	233,85	168,52	3,54

Выводы. Определено, что показатели шероховатости вблизи подповерхностной области катания сечения головки рельсовой стали (до 10мм) имеют значения выше ,чем в области центра сечения головки рельса в 1,5–2 раза. При сравнении образца рельса после эксплуатации и рельса в состоянии поставки основные показатели шероховатости такие как среднеарифметические отклонения Ra и высота профиля Rz у образцов после эксплуатации также выше, чем у образцов поставки 1,5–2 раза.

Для подтверждения полученных результатов и объективного анализа необходимы дополнительные исследования для накопления статистических данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 124032600080-4, научная тема FWRS-2024-0035

Список литературы

1. Корнилов В.М., Лачинов А.Н., Логинов Б.А., Беспалов В.А. Сканирующая туннельная микроскопия структуры Si−SiO2: использование режима ошибки обратной связи при исследовании поверхности / Физика и техника полупроводников, 2009, том 43, вып. 6
2. Шляхова Г.В., Бочкарева А.В. Возможности использования атомной силовой микроскопии в металлографии / Известия высших учебных заведений – 2020 – Т.63, №7
3. Арефьева Л.П., Дука В.В.,. Дроган Е.Г Исследование морфологии и топологии пластинчатого и зернистого перлита стали У8 на субмикронном уровне /Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15
4. Щербакова О.О., Муравьева Т.И., Шкалей И.В. Эволюция структуры и свойства рельсовой стали в процессе эксплуатации / Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2022. Vol. 9, no. 1
5. Григорьев А.В., Лепов В.В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации Арктики и Субарктики. Железнодорожный транспорт. – Рос.акад.наук, Сиб.отд, Ин-т физ-тех.проблем Севера им. В.П.Ларионова.-Новосибирск: СО РАН: Изд-во СО РАН, 2018.-112с.
6. Wojciech Macek Fracture surface formation of notched 2017A-T4 aluminium alloy under bending fatigue / International Journal of Fracture – Volume 234, pages 141-157, (2022)- https://doi.org/10.1007/s10704-021-00579-y

УДК 669.14.539.89
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-140-143

ОБОСНОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ВЗЛИВА ТОПЛИВА В ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ИЗ СТАЛИ СТ3 В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР

Григорьев А.В., Бурнашев А.В., Иванов А.Р., Бурнашев Е.А.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: greegor1212@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматривается проблема эксплуатации вертикальных стальных одностенных резервуаров (РВС), изготовленных из стали Ст3, в условиях низких климатических температур. Проведен анализ механических свойств и хладостойкости материала при отрицательных температурах. На основе анализа напряженно-деформированного состояния стенки резервуара и влияния температурных деформаций обоснована необходимость ограничения максимального уровня взлива (верхней отсечки) для предотвращения развития хрупких трещин в зонах концентраторов напряжений, прежде всего в околошовной зоне монтажного стыка, сварных стыков днища и нижних поясов резервуара. Предложена методика расчета безопасного уровня взлива, учитывающая рабочую температуру и механические характеристики стали.*

Ключевые слова: *резервуар вертикальный стальной, Ст3, низкие температуры, хрупкое разрушение, взлив, остаточные напряжения.*

JUSTIFICATION FOR LIMITING THE MAXIMUM FUEL INTAKE IN VERTICAL RESERVOIRS MADE OF ST3 STEEL AT LOW CLIMATIC TEMPERATURES

Grigoriev A.V., Burnashev A.V., Ivanov A.R., Burnashev E.A.
V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS

Abstract. *The article considers the problem of operation of vertical steel single-walled tanks (RVS) made of St3 steel in conditions of low climatic temperatures. The analysis of the mechanical properties and cold resistance of the material at subzero temperatures is carried out. Based on the analysis of the stress-strain state of the tank wall and the influence of temperature deformations, the need to limit the maximum level of rise (upper cut-off) is justified to prevent the development of brittle cracks in the stress concentrator areas, primarily in the near-seam zone of the mounting joint, welded joints of the bottom and lower belts of the tank. A method for calculating the safe level of take-off is proposed, taking into account the operating temperature and mechanical characteristics of steel.*

Keywords: *Vertical steel reservoirs, St3, low temperatures, brittle fracture, rise, residual stresses.*

Введение. Вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) широко используются для хранения нефтепродуктов и других жидкостей в различных климатических зонах Российской Федерации. Часть парка резервуаров, находящихся в эксплуатации, изготовлена из углеродистой стали марки Ст3, которая обладает удовлетворительными механическими свойствами в интервале положительных температур. Однако при эксплуатации в условиях Арктики и Субарктики возникает серьезная проблема, связанная со склонностью данной стали к охрупчиванию – резкому снижению пластичности и ударной вязкости при отрицательных температурах [1, 2].

Одной из критических эксплуатационных операций является заполнение резервуара до уровня, превышающего расчетный («взлив»), что на практике иногда допускается для увеличения единовременно хранимого объема. Данная практика, безопасная в летний период, становится потенциально катастрофической в условиях низких климатических температур. Целью настоящего исследования является теоретическое и практическое обоснование необходимости строгого ограничения максимального уровня взлива для резервуаров из Ст3 при отрицательных температурах.

Анализ механических свойств стали Ст3 при низких температурах. Известно, что сталь Ст3 относится к классу низкоуглеродистых сталей, склонных к повышенной химической неоднородности и наличию значительного количества неметаллических включений. Эти факторы способствуют снижению сопротивления хрупкому разрушению.

Ключевой характеристикой, определяющей склонность стали к охрупчиванию, является ударная вязкость (KCV). Согласно данным [3], ударная вязкость стали Ст3 при температуре +20 °C составляет в среднем 50–60 Дж/см². При понижении температуры до –20 °C этот показатель может снижаться до 25–35 Дж/см², а при –40 °C – до 15–20 Дж/см² и ниже, что приближается к критическому порогу хрупкости для конструкционных сталей.

Температура вязко-хрупкого перехода, при которой доля вязкой составляющей в изломе составляет 50%, для стали Ст3 может находиться в диапазоне от –15 °C до –30 °C в зависимости от химического состава плавки и толщины проката [4]. Таким образом, в условиях низких климатических температур (–40 °C...–60 °C) стенка резервуара работает в области полностью хрупкого разрушения.

Напряженно-деформированное состояние стенки резервуара при взливе. Напряжения в стенке вертикального резервуара определяются гидростатическим давлением столба жидкости [5]. При заполнении резервуара до высоты H, кольцевые напряжения σ_θ в нижней части (в первом поясе) рассчитываются по формуле:

$$\sigma_\theta = \rho * g * H * R / s, \quad (1)$$

где:

ρ – плотность продукта;

g – ускорение свободного падения;

H – высота взлива;

R – радиус резервуара;

s – толщина стенки первого пояса.

При взливе уровень продукта поднимается выше расчетного, что приводит к пропорциональному росту кольцевых напряжений в наиболее нагруженном первом поясе. Однако опасность представляет не только абсолютное значение напряжения, но и его сочетание с другими факторами.

Факторы, способствующие хрупкому разрушению при низких температурах

Во-первых, это концентраторы напряжений. Реальная конструкция резервуара содержит множество концентраторов напряжений: сварные швы (особенно монтажные стыки поясных листов), технологические отверстия, зоны крепления оборудования. В зоне сварного шва неизбежно присутствуют дефекты (поры, непровары), остаточные сварочные напряжения, достигающие значений предела текучести, и изменение структуры металла (зона термического влияния). При низких температурах именно в этих зонах происходит зарождение хрупкой трещины [6].

Вторым важным фактором являются температурные напряжения. При резком снижении температуры окружающего воздуха наружная поверхность стенки резервуара охлаждается быстрее, чем внутренняя, контактирующая с продуктом. Это создает значительный температурный градиент по толщине стенки, приводящий к возникновению дополнительных температурных напряжений растяжения на внутренней поверхности [7]. Эти напряжения суммируются с мембранными напряжениями от гидростатического давления.

Также процесс заполнения резервуара, ветровая нагрузка, сейсмические воздействия создают динамические составляющие нагрузки и являются триггером для мгновенного развития хрупкой трещины.

Таким образом, при эксплуатации в условиях низких климатических температур в зоне локации несплошностей возникает сложное напряженное состояние, суммарные напряжения в котором могут превысить предел хладостойкости стали. Возникает риск развития хрупкой трещины, обладающей высокой скоростью распространения в охрупченном материале, что может привести к мгновенному сквозному разрушению стенки по всей высоте резервуара с катастрофическим последствием – полным вытеканием продукта [8].

В качестве примера можно привести аварийное разрушение вертикального резервуара, которое произошло в декабре 2007 г. при температуре наружного воздуха – 35 °C и ветре 1–2 м/с в северо-восточном направлении. Установлено, что в основном металле первого пояса стенки в вертикальном направлении образовалась трещина между первым и вторым вертикальными монтажными швами (отсчет швов произведен от монтажного против часовой стрелки). По сварным соединениям произошел отрыв стенки от днища по зоне термического влияния (ЗТВ) уторного шва, также зафиксирован отрыв стенки от крыши по зоне термического влияния (ЗТВ) кольцевого шва на участке протяженностью 30 метров. В результате разрушения стенка резервуара была отброшена в юго-западном направлении на расстояние 10 метров, заняв развернутое положение.

В результате отрыва стенки от днища произошел разлив сырой нефти массой 422 тонны. Первоначальный выброс нефти имел северную направленность с последующим распространением в запад-

ном и восточном направлениях. Вследствие динамики выброса нефтепродукты вышли за пределы обвалования, образовав загрязнение общей площадью приблизительно 5000 м². На поверхности днища резервуара зафиксирован остаточный слой нефтепродукта толщиной 15 мм.

Проведенный спектральный химический анализ металла корпуса резервуара позволил идентифицировать марку стали как Ст3пс по ГОСТ 380-88.

Рис. 1. Разрушение резервуара

Методика обоснования ограничения уровня взлива. Для обеспечения безопасной эксплуатации резервуара необходимо ограничить уровень максимального взлива топлива таким образом, чтобы суммарные эквивалентные напряжения в наиболее опасной зоне не превышали допустимого значения, гарантирующего от хрупкого разрушения.

Таким образом для снижения рисков хрупкого разрушения резервуара необходимо:

1. Определить критическую температуру хрупкости (Ткр) для конкретной партии стали резервуара на основе данных сертификата и проведения инструментального контроля образцов. За $T_{кр}$ можно принять температуру, при которой ударная вязкость KCV = 30 Дж/см².

2. Определить рабочую расчетную температуру ($T_р$). Принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки в районе эксплуатации.

3. Если $T_р < T_{кр}$, необходимо ввести поправочный коэффициент на прочность $\gamma_с$, зависящий от разницы $\Delta T = T_{кр} - T_р$. Данный коэффициент может быть аппроксимирован из зависимости ударной вязкости от температуры. В первом приближении для $\Delta T > 20°C$ рекомендуется $\gamma_с \leq 0.7$.

4. Расчет допустимой высоты максимального взлива топлива ($H_{доп}$) производится по модифицированной формул (1) с учетом снижения допускаемого напряжения:

$$[\sigma]_{доп} = [\sigma] * \gamma_с * \gamma_к, \quad (2)$$

где:

[σ] – допускаемое напряжение для стали Ст3 при положительной температуре;

$\gamma_к$ – коэффициент, учитывающий состояние конструкции (коррозионный износ, наличие дефектов).

Тогда:

$$H_{доп} = ([\sigma]_{доп} * s) / (\rho * g * R) \quad (3)$$

Уровень максимального взлива должен быть установлен таким образом, чтобы высота столба продукта не превышала $H_{доп}$.

Заключение. Эксплуатация вертикальных стальных резервуаров, изготовленных из стали марки Ст3, в условиях низких климатических температур сопряжена с повышенным риском хрупкого разрушения. Предельное состояние конструкции может быть инициировано синергетическим действием нескольких факторов: рабочих напряжений от гидростатической нагрузки, остаточных сварочных напряжений, значительных температурных градиентов и охрупчивания базового материала при отрицательных температурах. Данная комбинация создает условия для лавинообразного развития трещины, приводящего к катастрофическому отказу.

В целях минимизации рисков и обеспечения требований промышленной безопасности представляется необходимым реализовать следующий комплекс мер:

Установить безусловный запрет на эксплуатацию резервуаров из стали Ст3 в случаях, когда прогнозируемая температура окружающей среды опускается ниже –40 °С.

Для резервуаров, работающих в регионах с холодным климатом, разработать и утвердить технологические регламенты, регламентирующие безопасные уровни наполнения в зависимости от текущего и прогнозируемого температурного диапазона. Расчет предельных уровней должен производиться на основе строгой методики, учитывающей хладостойкость материала.

В рамках плановых ремонтных операций ужесточить процедуры неразрушающего контроля качества сварных соединений, с фокусом на зоны нижних поясов и конструктивные концентраторы напряжений. Целью является своевременная идентификация и устранение технологических дефектов, выступающих инициаторами хрупкого трещинообразования.

Список литературы

1. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия.
2. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
3. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции.
4. Головин С.А. Хладноломкость и надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.
5. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
6. Санников И.И., Коврова Д.Ф, Устинов Е.П. Исследование ударной вязкости конструкционных сталей и сварных соединений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №6(37) Ч. 1. С. 71-74.
7. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Инструкция по технической диагностике вертикальных стальных резервуаров.
8. Н.И. Голиков, А.М. Большаков, А.Р. Иванов, А.А. Алексеев, Н.М. Литвинцев, Р.П. Тихонов, Н.К. Макаров, Л.Н. Татаринов Неравномерные осадки днищ вертикальных резервуаров, эксплуатирующихся в условиях Севера / Безопасность труда в промышленности. – 2008, №1, С.42-44.
9. Васильев Г.Г., Коршак А.А. Прочность и надежность резервуаров и трубопроводов. – М.: Недра, 1990. – 280 с.

УДК 539.42:629.421:629.4.027.4:551.582
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-144-148

МИКРОМЕХАНИЗМЫ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И РАЗРУШЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Дьячковский И.И., Лепов В.В., Ачикасова В.С., Григорьев А.В.
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН», Россия, Якутск
E-mail: e5dii@mail.ru

Аннотация. *Испытания на ударную вязкость образцов рельсовой стали, применяющейся на железной дороге в экстремальных климатических условиях Центральной Якутии, и морфологический анализ поверхностей изломов с помощью сканирующей туннельной микроскопии повреждённых поверхностей выявили особенности морфологии микроструктуры деформированных участков рельса.*
Ключевые слова: *низкотемпературный вязкохрупкий переход, сталь, ударный изгиб, сканирующая туннельная микроскопия, фрактография, микромеханика повреждений*

STUDY OF FRACTURE MICRO-MECHANISMS FOR RAIL STEEL UNDER THE EXTREME CONDITIONS OF THE NORTH

Dyachkovskii I.I., Lepov V.V., Achikasova V.S., Grigoriev A.V.
V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS – separate division of the Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center SB RAS”, Russia, Yakutsk

Abstract. *Impact tests of rail steel samples used on railways in the extreme climatic conditions of Central Yakutia, and morphological analysis of fracture surfaces using scanning tunnel microscopy of damaged surfaces revealed features of the morphology of the microstructure of deformed sections of the rail.*
Keywords: *low-temperature ductile-to-brittle transition, steel, impact bending, scanning tunneling microscopy, fractography, damage micromechanics*

С целью прогнозирования механического поведения, оценки и повышения долговечности стальных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях Севера и Арктики применяются исследования микромеханизмов накопления повреждений, которые могут быть выявлены посредством микроструктурного анализа поверхностей разрушения, полученных после проведения испытаний при различных температурных режимах. Такой анализ позволяет не только идентифицировать тип разрушения, но и выявить закономерности процесса накопления повреждений при реальных условиях эксплуатации.

Комплексные электронно-микроскопические исследования, а также качественные и количественные методы анализа предоставляют возможность проведения подобных исследований на различных масштабных уровнях, что способствует получению более полного представления о механизмах разрушения и накопления повреждений, и позволяет разрабатывать эффективные подходы к увеличению срока службы стальных конструкций, эксплуатируемых в экстремальных климатических условиях Севера и Арктики [1].

Следует отметить, что процесс разрушения повреждённых материалов как сред с изменяющейся анизотропной микроструктурой в достаточной мере ещё не изучен. Так, поведение в них трещин может отличаться от материалов с изотропной структурой как формой зарождающихся трещин [2], так и динамикой их дальнейшего роста и слияния [3], включая как статическое, так и усталостное нагружение [4, 5], что выявляется посредством последующего качественного и количественного анализа поверхности методами оптической фрактографии и сканирующей электронной микроскопии изломов [6,7].

Материалы и отбор проб. Исследуемый материал представляет собой высокоуглеродистую рельсовую сталь (предположительно, сталь марки 76Ф), определенную по ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные». Этот материал эксплуатируется в климатических условиях Центральной Якутии. Химический состав определен на спектрометре FOUNDRY-MASTER UVR (изготовитель WAS AG, Германия) результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав рельса

Материал	Содержание химических элементов, %									
Рельсовая сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	Cu	Fe
	0,80	0,31	0,98	0,06	0,07	0,01	0,01	0,02	0,13	ост

По принятой металлургической классификации и категории изучаемый рельс является ДТ350 то есть дифференцированно термоупрочненным с прокатным/отдельным нагревом общего назначения. Механические свойства представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства материала

Категория рельсов	Временное сопротивление, Н/мм^2	Предел текучести, Н/мм^2	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость (–60 °C), KCU, Дж/см^2
	Не менее				
ДТ350	1180	800	9,0	25,0	15

Проведены ударные испытания образцов, полученных из металла областей, прилегающих к центральной части, и к верхней поверхности рельса (рис. 1).

Выявление особенностей микроструктуры при ударном изгибе образцов из повреждённого при эксплуатации в условиях ударно-усталостной нагрузки и низкой температуры материала позволяет выявить особенности накопления повреждений, аспекты низкотемпературного вязко-хрупкого перехода в стали, а также выработать меры по предотвращению или снижению преждевременного выхода рельса из строя.

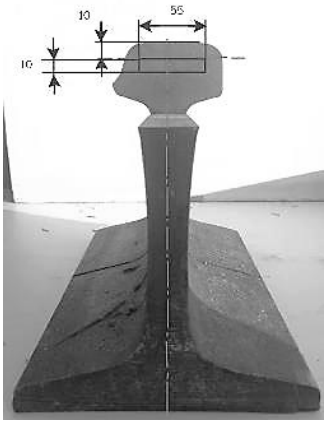


Рис. 1. Схема вырезки по сечению рельса

Образцы и испытания. Один тип образцов был подготовлен для определения механических свойств и усталостного поведения рельса при различных температурах испытаний. Их геометрия и размеры показаны на рис. 2, а.

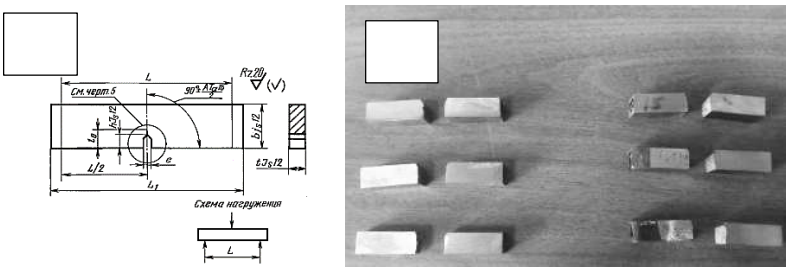


Рис. 2. Геометрия. размеры образцов и вид образцов после испытаний

В соответствии с ГОСТ 25.506-85 «Методы механических испытаний металлов», образцы для испытания на трещиностойкость были вырезаны в форме параллелепипеда со сторонами 55x10x10 мм. Эти испытания проводились на инструментированном маятниковом копре. «Amsler RKP-450» (изготовитель «Zwick Roell», Германия). Испытания проводились при комнатной температуре в окружающем воздухе. На образцы нанесен V-образный надрез, глубиной 2 мм, предназначенный для концентрации напряжений. Вид образцов после испытаний показан на рисунке 2,б.

Сканирующая туннельная микроскопия зон пластической деформации. Для исследования микромеханизмов разрушения и накопления повреждений был проведен микроструктурный анализ изломов испытанных на ударный изгиб образцов из рельсовой стали. Этот анализ выполнялся методами оптической (Neophot 32) (см. рис. 3) и сканирующей туннельной (СММ-2000) микроскопии. (см. рис. 4).

С точки зрения исследования процессов, происходящих в вершине трещины, важно получить информацию о величине пластической деформации, следы которой остаются в том числе в виде остаточного искажения формы зерен после механических испытаний. Излом образцов на ударный изгиб в этом плане не может дать достаточную, тем более исчерпывающую информацию, поскольку отражает интенсивные процессы отрыва и скола, происходящие на поверхности сливающихся микротрещин и микропор, тогда как боковые поверхности образца вблизи поверхности отрыва показывают остаточную пластическую деформацию, если таковая имела место быть.

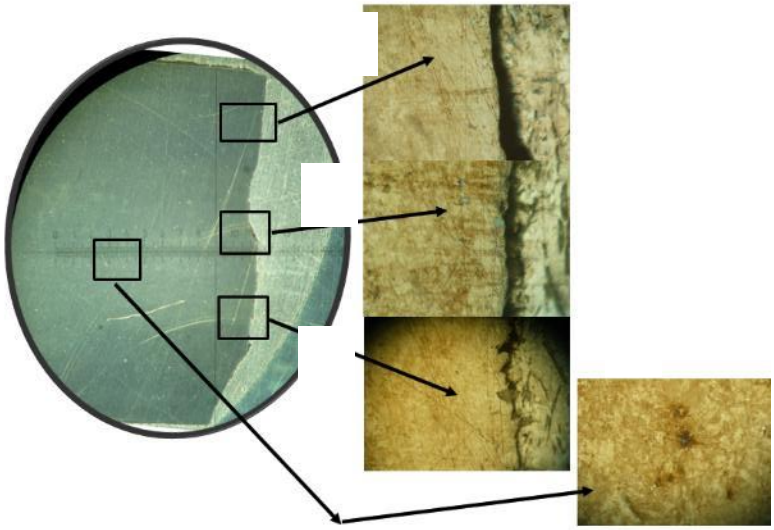


Рис. 3. Схема исследования на оптическом микроскопе боковой поверхности ударных образцов из материала рельса: а) зона надреза, б) центральная зона, в) зона долома, г) исходный недеформированный материал

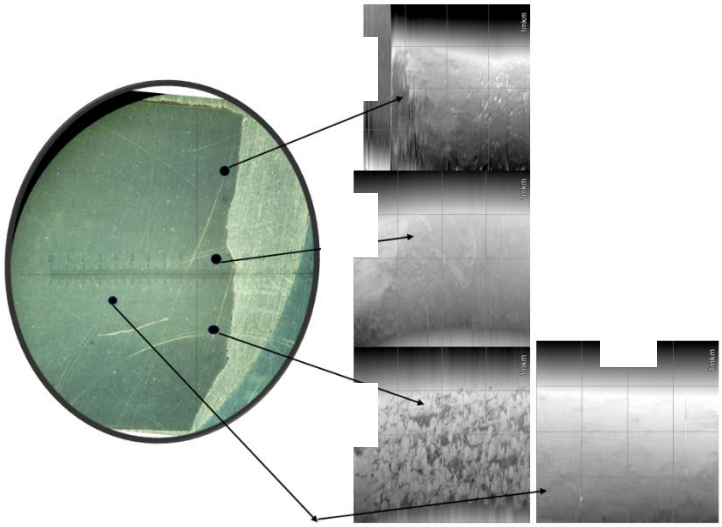


Рис. 4. Схема исследования на СТМ боковой поверхности ударных образцов из материала рельса: а) зона надреза, б) центральная зона, в) зона долома, г) исходный недеформированный материал

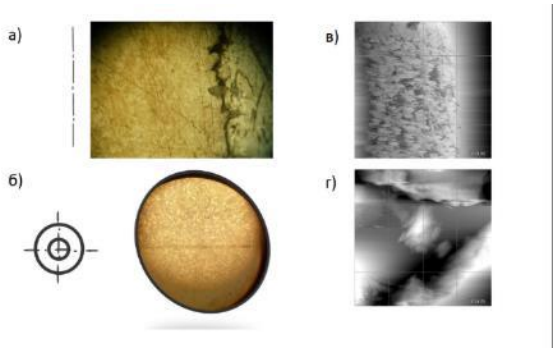


Рис. 5. Оптические микрофотографии поперечных (а, увеличение х200) и продольных (б, увеличение х56) сечениях, полученные с помощью оптической микроскопии и сканирующей туннельной микроскопии при поперечных (в) и продольных (г) сечениях

Оценка шероховатости поверхности разрушения (рис. 6) образцов, испытанных на ударный изгиб при температуре +20 °С, количественно свидетельствуют об уровне неоднородности.

На завершающем этапе обработки была проведена шлифовка поверхности с использованием абразивного материала зернистостью 1200, после чего выполнена полировка с применением алмазной пасты. В процессе были выявлены микроцарапины, предположительно возникшие вследствие использования абразивного материала с крупными частицами или осколков сплава Вуда. Для устранения микроцарапин была использована алмазная паста с более мелкой зернистостью, полировка осуществлялась с применением керосина на шерстяной ткани.

Поскольку рельсовая сталь является дооэвтектоидной, двухэтапная последовательность травления не нужна и вместо этого было использовано травление одним раствором. Это делается для оптимизации фазового контраста и выявления морфологии феррита и перлита для образцов. наблюдаемых в оптический микроскоп (ОМ) Neophot-32 (Carl Zeiss, Германия) (рис. 6а и б). Раствор 4%-ный азотной кислоты использовался для очерчивания общей микроструктуры. Такой подход позволил четко идентифицировать равноосные домены/зерна и фазовые границы. как в поперечном, так и в продольном разрезах, подтверждая однородность ферритно-перлитной матрицы. На изображениях оптического микроскопа ярко-белые зоны соответствуют ферритным доменам, а темно-серые – перлитовым доменам. В целом. перлитные домены имеют равноосную форму. в то время как ферритные домены демонстрируют неправильной вытянутой формы. Значительной полосатости не наблюдается, и микроструктуры, ориентированные перпендикулярно или параллельно оси образца. не показали заметной разницы [8].

Сканирующий зондовый микроскоп демонстрирует отчетливый контраст и более высокое пространственное разрешение по сравнению с ОМ. признаки особенно ярко выражены в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ). Используя эти свойства, мы провели более детальные наблюдения за микроструктурой рельсовой стали с помощью профилометра с нанометровой приставкой СММ-2000 («Завод Протон-МИЭТ», Россия). На рисунке 3с показана морфология включений в перлитовой матрице. На рис. 3д показана морфология и характеристики распределения перлита и феррита в рельсе, которая согласуется с результатами ОМ. Ферритных зерен или их границ не наблюдалось

Результаты и обсуждение

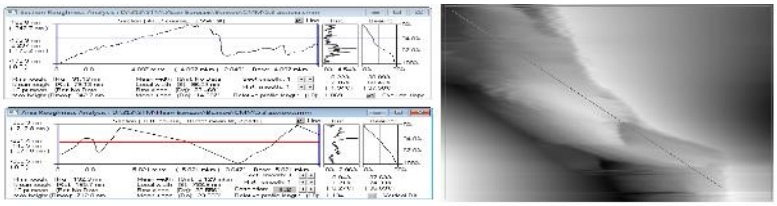


Рис. 6. Анализ шероховатости поверхности разрушения боковой поверхности образца (+20 °С)

Согласно приведенным на рис. 6 результатам, вычисленные значения среднего арифметического отклонения профиля и средний шаг неровностей профиля, для испытанных при температуре +20 °С образцов будут равны R_a =14,10нм; S_m=223,32 мкм, соответственно.

При накоплении достаточного количества данных по поверхностям разрушения возможно построение не только аналитических, но и численных моделей, построенных на стохастических алгоритмах [9] с целью для прогноза скорости и траектории трещины по известным исходным распределениям дефектов и пор в материале, а также для выявления лежащей в их основе микромеханизмов разрушения.

Если поры в вязкой среде растут по мере увеличения деформации, и сливаются с первичной трещиной либо по границам, либо путём образования множества разрозненных зон повреждениями, то трещины при хрупком разрушении распространяются более прямолинейно, и внутренняя структура материала в меньшей степени определяет их рост. Стохастическое моделирование позволяет визуализировать и предсказывать рост трещины, количественно характеризуя скорость и вероятность разрушения.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках Программы ФНИ государственных академий наук (проект FWRS-2024-0035) при поддержке РНФ (24-21-20122) (https://rscf.ru/project/24-21-20122). Также, авторы благодарны сотрудникам Отдела 40 ИФТПС СО РАН, в частности к.т.н., с.н.с. Васильевой М.И., за помощь в подготовке образцов.*

Список литературы

1. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
2. Irwin G (1957), Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // Journal of Applied Mechanics, 1957, 24, 361–364
3. Lapin R.L., Kuzkin V.A., Krivtsov A.M. Quasi-static crack growth in three-layer media: a numerical experiment // Letters on Materials, 2023, Vol.3(3), pp. 272-277. DOI 10.22226/2410-3535-2023-3-272-277
4. Lepov V.V., Grigorev A.S., Achikasova V.S., Lepova K.Ya. Some aspects of structural modeling of damage accumulation and fracture processes in metal structures at low temperature // Modelling and Simulation in Engineering. 2016. P.1-6. DOI 10.1155/2016/7178028
5. Zhang Yunbo, Luo Yunrong, Wu Xin, Guan Yanbing. The Review of Research on Fatigue Crack Propagation in Metallic Materials // International Journal of Materials Science and Technology Studies, 2024, Vol.1(1). DOI 10.62051//ijmsts.v1n1.05
6. Surface science: an introduction / Oura ... (et al.). p. cm. – (Advanced texts in physics, ISSN 1439-2674) Includes bibliographical references and index. 1. Surfaces (Physics) I. Oura, K. (Kenjiro), 1941- II. Series. QC. DOI 10.1007/978-3-662-05179-5
7. Лепов В. В., Бисонг С. М., Голых Р. Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;28(1):156-171. DOI 10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171
8. Lu Liu, et al. The Fatigue Behaviors of a Medium-Carbon Pearlitic Wheel-Steel with Elongated Sulfides in High-Cycle and Very-High-Cycle Regimes. August 2021 Materials 14(15):4318 DOI: 10.3390/ma14154318
9. Lepov V., et al. Microstructure analyses and multiscale stochastic modeling of steel structures operated in extreme environment // Procedia Structural Integrity. 2018. C. 1201-1208.

УДК 669.14.539.89
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-149-152

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕСУРСА ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЕЙ

Иванов А.Р.
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: spartak01@mail.ru

Аннотация. *В статье представлена методика оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов и резервуаров, эксплуатирующихся в условиях Республики Саха (Якутия) на основе разработанной методики оценки предельного состояния конструкционных материалов. Данная методика оценки остаточного ресурса не требует использования методов неразрушающего контроля и сложной аппаратуры. Показан расчет остаточного ресурса магистрального газопровода.*

Ключевые слова: *остаточный ресурс, предельное состояние, магистральный газопровод, потеря пластичности.*

METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE PLASTICITY RESOURCE OF STEELS

Ivanov A.R.
V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS

Abstract*. The article presents a methodology for assessing the residual resource of main gas pipelines and reservoirs operated in the Republic of Sakha (Yakutia) based on the developed methodology for assessing the limiting condition of structural materials. This method of estimating the remaining resource does not require the use of non-destructive testing methods and sophisticated equipment. The calculation of the remaining resource of the main gas pipeline is shown.*

Keyword: *Residual resource, terminal condition, main gas pipeline, loss of plasticity.*

Магистральные газопроводы и резервуары для хранения ГСМ Республики Саха (Якутия) построены и функционируют в зоне распространения вечномерзлых грунтов. На протяжении более 50 лет стабильная эксплуатация газопроводных систем обеспечивает основным топливом центральную часть Республики Саха (Якутия). Однако общее техническое состояние газопроводов и резервуаров с каждым годом ухудшается, их эксплуатационный ресурс практически исчерпан.

Остаточный ресурс – срок надежного и безаварийного функционирования трубопровода (резервуара) при его фактическом техническом состоянии, не требующем проведения дополнительных мероприятий и капитальных затрат.

В основном при оценке остаточного ресурса исходят от изменения скорости деградационных процессов. К числу таких процессов для газопроводов и резервуаров относятся:

– изменение пластичности металла, определяемой по изменению предела текучести, твердости, ударной вязкости;

– уменьшение толщины стенки при воздействии на металл фронтальной (общей) коррозии;

– изменение НДС при воздействии на металл локальной (язвенной, межкристаллитной) коррозии;

– старение изоляционного материала.

В настоящее время рядом нормативных документов рекомендуется оценка остаточного ресурса упрощенными методами по отдельным деградационным процессам.

В данное время существуют следующие виды расчетов остаточного ресурса металлоконструкций: по коррозионному утонению стенки металла трубы или резервуара; при действии изменяющихся напряжений при изгибе трубопровода в результате необратимых процессов просадки трубопровода производится по экспериментальным данным просадки и расчета $\sigma_{ЭКВ}$; по изменению механических характеристик металла; по изменению ударной вязкости металла трубы; по оценке напряженно-деформированного состояния при наличии фронтальной коррозии металла трубы; по оценке локального напряженно-деформированного состояния в местах коррозионных язв (питтингов) металла трубы;

Одним из недостатков существующих методов расчета остаточного ресурса, является необходимость применения разрушающих методов и вырезки образцов для механических испытаний, и невозможность оперативной диагностики текущего состояния материала в полевых условиях.

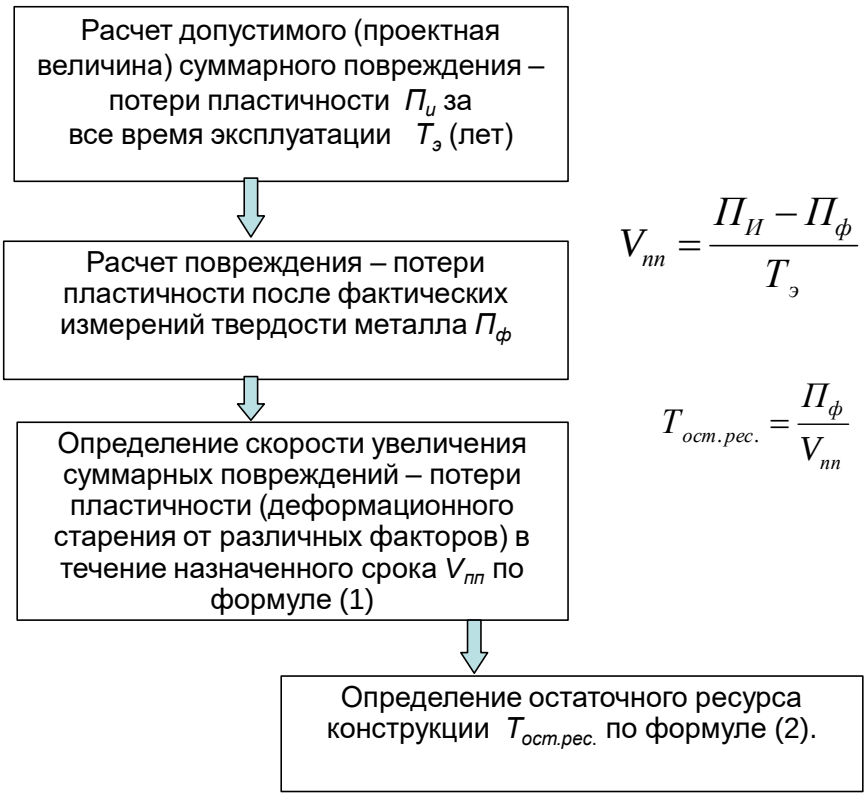
На основе проведенных экспериментальных исследований и разработанной методики оценки предельного состояния [1, 2], предложена методика оценки остаточного ресурса [3] для конструкций типа магистральных газопроводов и резервуаров, по следующей схеме (рис. 1):

– вычисляется допустимое (проектная величина) суммарное повреждение – потеря пластичности $П_и$ за все время эксплуатации $T_э$ (лет);

– после фактических измерений твердости металла устанавливается потеря пластичности $П_ф$;

– в течение назначенного срока определяется скорость увеличения суммарных повреждений – потери пластичности (от различных факторов) $V_{пп}$ по формуле (1);

– определяется остаточный ресурс конструкции $T_{ост.рес}$. по формуле (2).



$$V_{пп} = \frac{П_И - П_ф}{T_э} \qquad (1)$$

$$T_{ост.рес.} = \frac{П_ф}{V_{пп}} \qquad (2)$$

Рис. 1. Схема методики расчета остаточного ресурса металлоконструкции

С использованием разработанной методики оценки остаточного ресурса [3] была проведена оценка остаточного ресурса магистрального газопровода линейной части диаметром 530 мм и толщиной стенки 7 мм. Участок Берге-Якутск построен в 1968 году из труб стали марки 09Г2С, эксплуатируется 57 лет. В соответствии с приведенной схемой, определим следующее:

1. Допустимое значение потери пластичности, исходя из анализа, примем равным $П_и$ =0.8;

2. В течение 57 лет эксплуатации, твердость металла газопровода повысилась с 80НВ (в исходном состоянии) до 120НВ и составила потерю пластичности порядка $П_ф$ =0.6, а скорость потери пластичности за вес период эксплуатации в среднем составила $V_{пп}$ =0.008 в год;

3. При выполнении условий по данной схеме, исходя из оценки скорости потери пластичности за время эксплуатации, определяется время – 10.5 лет (остаточный ресурс), до следующей оценки состояния газопровода, которое согласовывается с контролирующими и надзорными органами.

Для сравнительного анализа результатов предложенного метода оценки остаточного ресурса были проведены расчеты остаточного ресурса этого же магистрального газопровода различными методами согласно РД 12-411-01 «Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов».

D= 530 мм, h = 7 мм, σ_{To} *=345 МПа,* σ_{Bo} *=590 МПа,*

время эксплуатации $t_ф$ *=57 лет.*

Строим график функции $\psi(t)$ с интервалом точности (+10%) в виде двух кривых: ψ и $\psi=\psi+0{,}1*\psi$ и три прямые: $\rho=\frac{\sigma_T}{\sigma_B}=0{,}9$; $\sigma=\frac{\sigma_T}{\sigma_B}=\frac{\sigma_{T\Phi}}{\sigma_{B\Phi}}=0{,}8$; $t=t_{\Phi}$ =57 *лет* (рис. 2).

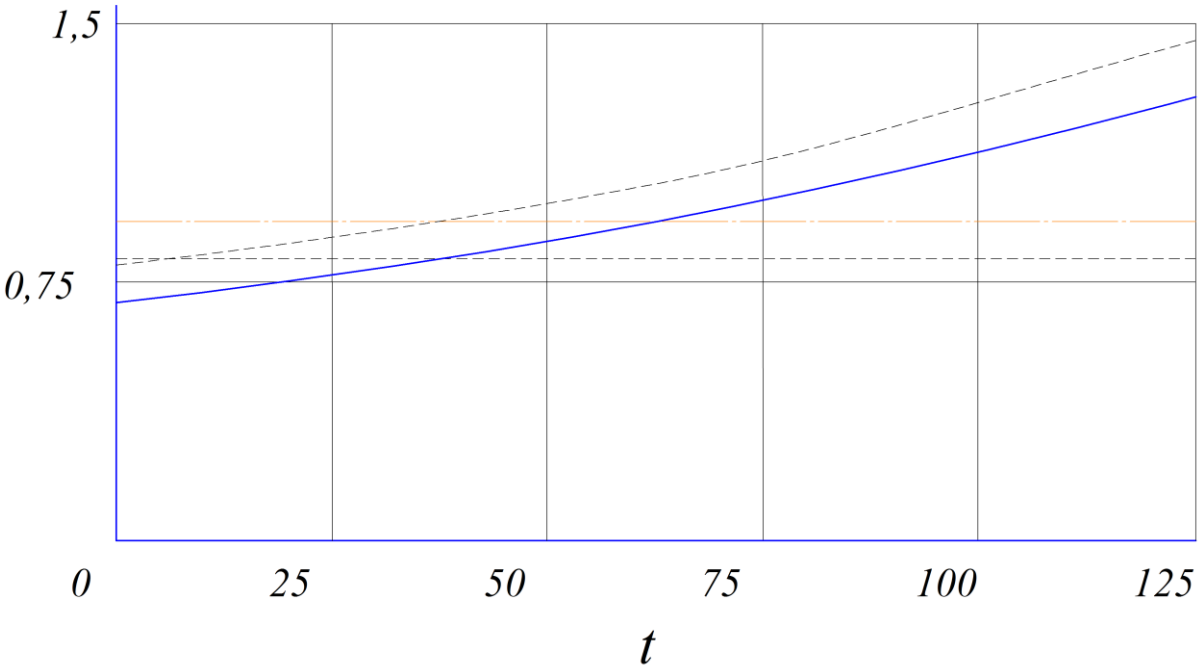


Рис. 2. График расчета остаточного ресурса магистрального газопровода

Находим абсциссу точки пересечения кривой ψ, с прямой $\rho=\frac{\sigma_T}{\sigma_B}=0{,}9$, $t_{кр}$ =41 лет. Определяем точку пересечения прямой $t=t_{ф}$ и $\sigma=\frac{\sigma_T}{\sigma_B}=\frac{\sigma_{T\Phi}}{\sigma_{B\Phi}}=0{,}8$, $Z_{ф}$. Точка $Z_{ф}$ не попадает в интервал точности функции ψ, следовательно величину остаточного срока службы $t_{ост}$ определяем с использованием условно-фактического времени эксплуатации газопроводов $t_{уф}$, равного абсциссе точки пересечения кривой ψ с прямой $\sigma=\frac{\sigma_T}{\sigma_B}=\frac{\sigma_{T\Phi}}{\sigma_{B\Phi}}=0{,}8$. В этом случае $t_{ост}=t_{кр}-t_{уф}$. Из графика находим, что $t_{уф}$ = 30 лет.

$t_{ост}=41-30=11$ лет – остаточный срок службы газопровода.

Таким образом, по результатам определения остаточного ресурса выяснено, что остаточный ресурс газопровода, вычисленный по предложенному методу, равен 10.5 годам, а остаточный ресурс, рассчитанный согласно РД 12-411-01 равен 11 и 12 годам. По рекомендациям научно-технической документации Ростехнадзора при оценке остаточного ресурса несколькими методами, выбирается минимально рассчитанный остаточный ресурс.

По методике оценки остаточного ресурса по изменению потери пластичности были проведены расчеты остаточного ресурса при разных значениях скорости потери пластичности для газопроводов и резервуаров (рис. 3 и 4). Их анализ показывает, что с увеличением скорости потери пластичности, остаточный ресурс быстрее уменьшается для газопроводов.

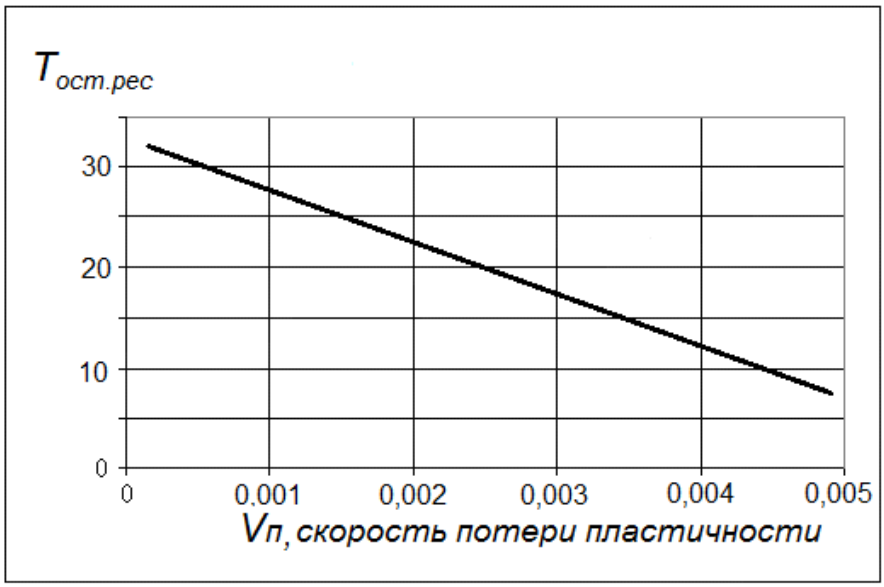


Рис. 3. Зависимость остаточного ресурса от скорости потери пластичности для газопровода

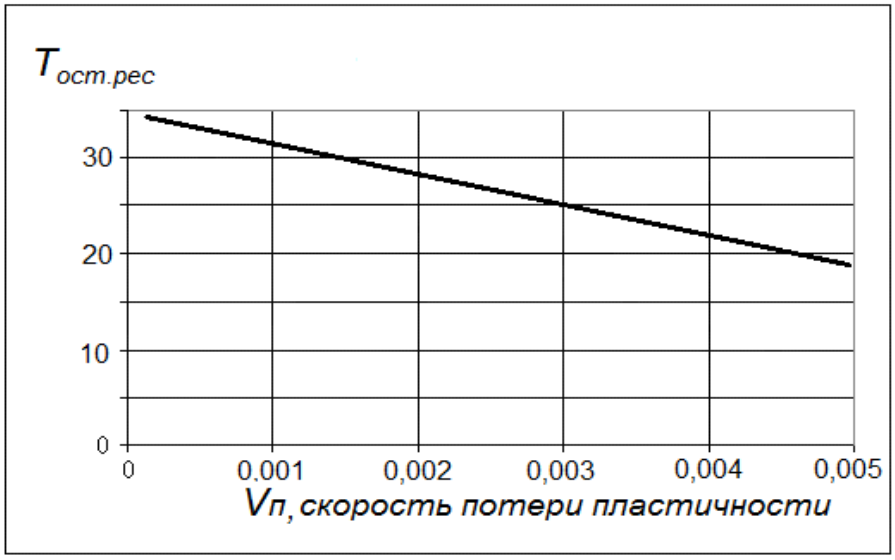


Рис. 4. Зависимость остаточного ресурса от скорости потери пластичности для резервуара

Список литературы

1. Лыглаев А.В., Большаков А.М., Иванов А.Р. Оценка предельного состояния металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Заводская лаборатория – апрель №7-2009, С.44-47.
2. Иванов А.Р., Большаков А.М. Способ оценки потери пластичности по изменению микротвердости конструкционной стали / Патент на изобретение № 2382351 от 22.02.2010г.
3. Иванов А.Р. Разработка методики оценки остаточного ресурса трубопроводов и резервуаров, работающих в условиях Крайнего Севера. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Новосибирск. – 2011. –18 с.
4. Ivanov A.R., Bolshakov A.M. and Lyglaev A.V. Estimation of ultimate state of metal structures exploited in the environment of the extreme north / Inorganic materials – Volume 46, №14-2010, 1564-1566, DOI: 10.1134/S0020168510140177.

УДК 624.044:621.644:551.343.72
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-153-158

О СЛОЖНЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ В ПОДЗЕМНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ МОРОЗНЫХ ПУЧЕНИЯХ

Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г., Антонов А.А., Корнилова В.В.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН г. Якутск
E-mail: ivanovds@gmail.com

Аннотация. *Магистральные трубопроводы, проложенные на территории Якутии, подвергаются более быстрому износу из-за влияния многолетнемерзлых грунтов на их эксплуатационную надежность.*

В статье показано, что многолетним мониторингом планово-высотного положения магистрального газопровода нами выявлен участок берегового склона на протоке Табагинская, в котором дважды в год происходят интенсивные деформации.

Предложен механизм, приводящий к сложным деформациям подземного трубопровода при морозных пучениях в момент начала замерзания грунта. Разработанная математическая модель в первом приближении подтверждает этот механизм.

Ключевые слова: *подземные магистральные трубопроводы, планово-высотное положение, вечномерзлый грунт, морозное пучение, сложные деформации, математическая модель.*

ON COMPLEX DEFORMATIONS IN AN UNDERGROUND PIPELINE DURING FROST HEAVING

Ivanov D.S., Ammosov G.S., Kornilova Z.G., Antonov A.A., Kornilova V.V.
V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North SB RAS Yakutsk

Abstract. *The main pipelines laid on the territory of Yakutia are subject to faster wear due to the influence of permafrost soils on their operational reliability. The article shows that long-term monitoring of the planned altitude position of the main gas pipeline has identified a section of the coastal slope on the Tabaginskaya bayou, in which intense deformations occur twice a year. A mechanism is proposed that leads to complex deformations of the underground pipeline during frost heaving at the moment of the beginning of freezing of the soil. The developed mathematical model confirms this mechanism in the first approximation.*

Keywords: *underground main pipelines, planned elevation, permafrost, frost heaving, complex deformations, mathematical model.*

Введение. Магистральные трубопроводы, проложенные на территории Якутии, эксплуатируются в экстремальных климатических и инженерно-геологических условиях.

Сооружение трубопроводов осложняется рядом факторов: сложность проведения земляных работ, пучение многолетнемерзлых грунтов при их замораживании после оттаивания и проваливание из-за оттайки. Но одним из основных факторов, влияющих на эксплуатационную надежность трубопроводов, является нарушение устойчивого положения в связи со значительным снижением несущей и балластирующей способности многолетнемерзлого грунта при оттаивании [1, 2].

В зонах, подверженных воздействию морозных пучений, деформации могут проявляться в виде чередующихся выпуклостей и вогнутостей, которые располагаются друг за другом без каких-либо промежутков, что связано с морозными пучениями, возникающими из-за замерзания влаги в грунте, и приводящими к увеличению объема грунта и, как следствие, к давлению на трубопровод.

Особую опасность представляет на пойменном участке для магистральных трубопроводов миграция влаги при промерзании и протаивании (оттайке) мерзлых грунтов и связанная с ними деформация земной поверхности, влияющая на оценку прочности и надежности конструкции в целом [3, 4]. Вследствие этого в трубопроводе возникают непроектные воздействия, приводящие к изменению планово-высотного положения (ПВП).

На рис. 1 представлены данные ПВП измерений подводного перехода второй нитки магистрального газопровода через р. Лену на участке протоки Табагинская, полученные с интервалом в полгода [5]. Сплошной линией показана дневная поверхность грунта, ромбами – измеренные точки в апреле 2018 г. (трубопровод находился в замерзшем грунте), кружками – через полгода в ноябре 2018 г. (тру-

бопровод находился в оттаявшем грунте). Штриховым линиям соответствует предполагаемое положение трубы. Как видно, на участке 180-200 м от репера сдвиг вертикального положения достигает 2 м за полгода.

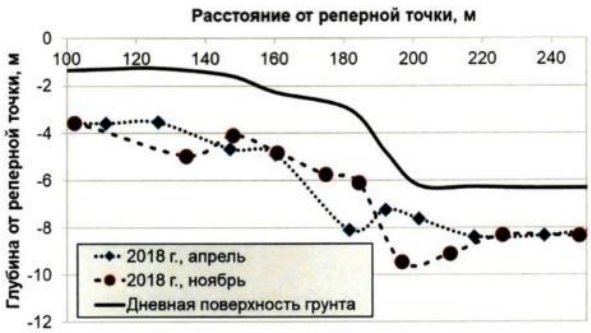


Рис. 1. Изменение положения трубопровода за полгода

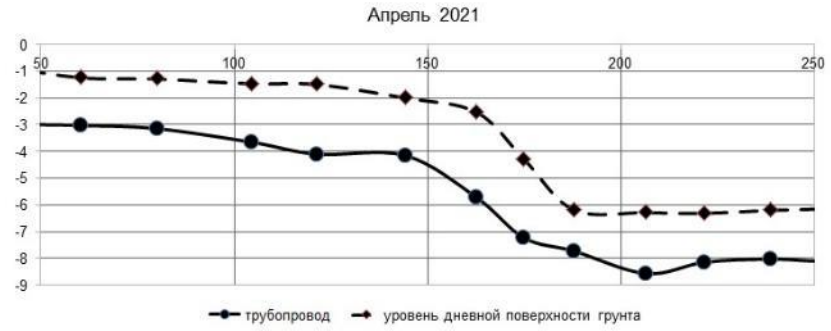
Материалы и методы исследования. Многолетним мониторингом нами выявлен участок левого берегового склона на протоке Табагинская, где дважды в год происходят сезонные экзогенные процессы в виде морозного пучения и протаивания грунта. Выбор левого берега непосредственно связан с тем, что слой сезонного промерзания, начиная с приурезного участка, смыкается с зоной вечномерзлых грунтов. Для определения сезонных колебаний был использован метод обследования планово-высотного положения (ПВП) трубопровода [5].

На рисунке 2 показаны результаты измерения ПВП подземного трубопровода в ряд последовательных сезонов на участке интенсивных деформаций. Измерения проводились в апреле, когда трубопровод находится в мерзлом грунте, и в ноябре, когда грунт вокруг трубопровода талый.

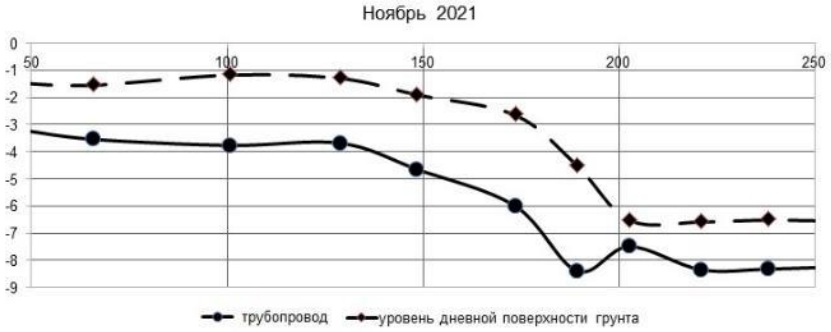
На рис. 3 видно, что высотное положение трубопровода в ноябре 2021 года примерно повторяло очертание дневной поверхности грунта, но на расстоянии ~170 метров от репера уходит вниз с сильным прогибом. На расстоянии 190 метров от репера трубопровод начинает подниматься вверх. В дальнейшем на расстоянии 210 метров трубопровод повторяет очертание дневной поверхности грунта. Через полгода, в апреле 2022 года, в промерзшем грунте, случился сильный прогиб вниз (более полутора метров) возле отметки 135 м (рис. 2 в, рис. 3), после замерзания грунта, в апреле 2022 года, прогиб, отмеченный на расстоянии 170 метров от репера, почти выпрямился, но появился прогиб величиной ~1 метр возле отметки 220 м от репера (рис. 2 в, рис. 3).

На подземном трубопроводе существуют места, где реальная картина деформации трубопровода является сложной – на участке воздействия морозных пучений деформации получаются в виде нескольких выпуклостей и вогнутостей, следующих друг за другом без интервалов.

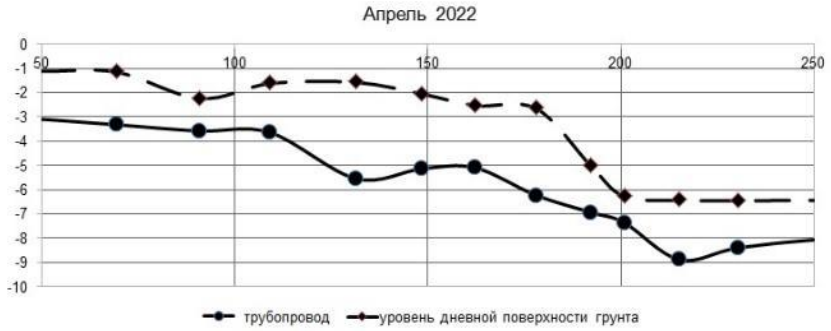
Нами предлагается следующий механизм, объясняющий наблюдаемое явление. Участок подземного трубопровода с интенсивными деформациями проходит по склону протоки, обращенному на юг. Южный склон поглощает больше солнечной радиации, чем горизонтальные участки, и замерзание грунта запаздывает по сравнению с прилегающими участками. С наступлением холодов верхние и нижние участки склона в результате замерзания грунта защемляют трубопровод и двигаются по вертикали из-за морозных пучений. При этом скорости вертикальных движений на верхнем и нижнем концах разные, в зависимости от условий солнечной радиации, состава грунта и т. д. Средний участок находится в талом грунте, жесткость которого на порядок меньше замерзшего, и в нем происходят деформации трубопровода. Из-за различия величин сдвигов на противоположных концах возникают изгибные деформации. При изгибе происходящие в средней части сдвиги трубопровода могут превосходить по величине концевые сдвиги, вызываемые пучениями.



а)



б)



в)

Рис. 2. Положение трубопровода: а) апрель 2021 года, б) ноябрь 2021 года и в) апрель 2022 года. По вертикали глубина в метрах относительно репера, по горизонтали расстояния в метрах от репера

Упрощенная схема предложенного механизма представлена на рисунке 4. Наверху и внизу склона уже замерзший грунт показан штриховкой. В середине склона грунт еще талый. Вверху и внизу склона пучения замерзшего грунта тянут трубопровод вверх с разной интенсивностью. В середине склона талый грунт не двигается и за счет его сопротивления на трубопровод действуют силы, направленные вниз. Из комбинации разнонаправленных сил трубопровод получает изгибные деформации. Даже при малом изгибе из-за длины изогнутого участка, могут возникнуть большие смещения, превосходящие по величине подъемы крайних участков.

Для проверки предложенного механизма нами разработана математическая модель в первом приближении, т. е. упрощенная модель.

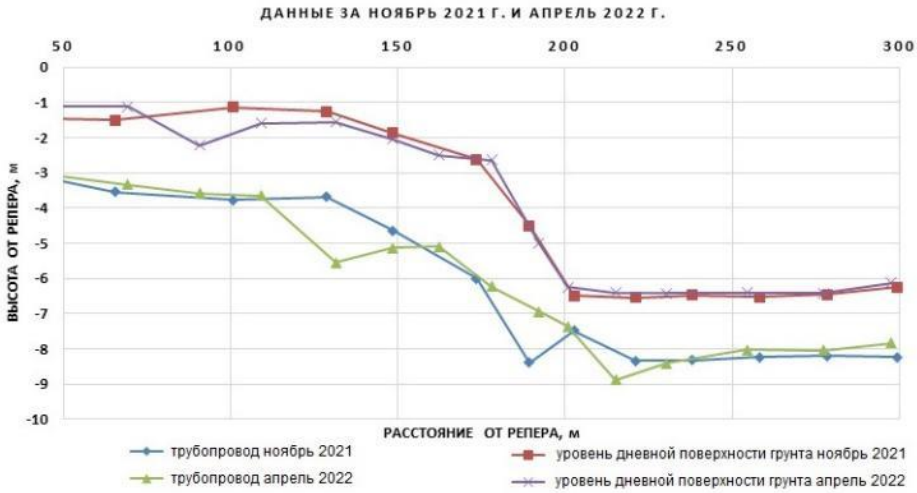


Рис. 3. Сравнение данных ПВП трубопровода за ноябрь 2021 года и апрель 2022 года

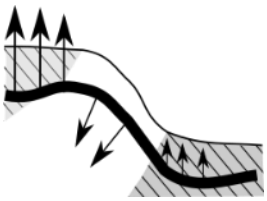


Рис. 4. Воздействие сил на подземный трубопровод в момент начала замерзания грунта

Для получения функции положения подземный трубопровод рассматривают как балку, лежащую на упругом основании [6, 7], описывающуюся уравнением

$$EI\frac{d^4v}{dx^4} + P\frac{d^2v}{dx^2} + cv = 0, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, I – момент инерции сечения, P – продольное усилие на трубопровод, c – коэффициент постели грунта, v – вертикальное перемещение трубы.

В работе [8] из вариационного принципа выводится уравнение для произвольного подземного трубопровода в общем виде. В случае прямолинейного трубопровода уравнение выглядит так:

$$EI\frac{d^4v}{dx^4} + P\frac{d^2v}{dx^2} = r + q, \quad (2)$$

обозначения такие же, как в уравнении (1), добавлены r – реакция грунта и q – вертикальная распределенная нагрузка, x – продольная координата, м.

В уравнении (1) считается, что глубина залегания трубы постоянная, также свойства грунта однородны либо кусочно-однородны, поэтому его невозможно использовать для моделирования трубопровода, подвергающегося неравномерной нагрузке. В уравнениях (1) и (2) определения сжимающих усилий вызывает затруднение, поэтому надо исходить из условий закрепления на краях, т. е. измерять трубопровод от компенсатора до компенсатора, а это километры. Измерение длинных участков на порядок увеличивает трудоемкость полевых работ, и при численном решении количество узлов сетки решения также увеличивается на порядок, как следствие, увеличиваются вычислительные затраты и точность.

Выбор модели подземного трубопровода и вывод уравнения, независящего явным образом от продольных усилий, и учитывающего непостоянность глубины залегания, неравномерность реакций грунта, представлен в работе [9]. Момент сил изогнутой балки выражается по формуле [5]

$$M = \frac{EI}{\rho} = EI\frac{d^2Z}{dx^2}, \quad (3)$$

где: M – изгибающие моменты, E – модуль упругости, I – момент инерции сечения, ρ – радиус изгиба (при малых деформациях обратно пропорционален второй производной).

Полученное в [9] уравнение функции вертикального положения трубопровода по форме совпадает с уравнениями, приведенными в [6-8], но не требует явного задания продольных усилий и упрощает решение. Распределенную нагрузку сверху p вычисляем как вес грунта над трубой, зависящую от глубины трубы.

$$EI\frac{d^4Z}{dx^4} - \frac{D\rho_л g}{2} \cdot \frac{d^2Z}{dx^2} + p - q + \rho_л g = 0. \quad (4)$$

где: E – модуль упругости; I – момент инерции сечения; D – диаметр трубопровода; $\rho_л$ – линейная плотность трубы; g – ускорение свободного падения; q – реакция грунта; p – вертикальная распределенная нагрузка; Z – вертикальное положение оси трубы.

Обсуждение. В решении уравнения (4) использованы следующие значения.

Модуль упругости для стали 13Г1СУ взят из проекта на подводный переходе E=206 ГПа.

Момент инерции для круглой балки сплошного сечения [10]

$$I = \frac{\pi D^4}{64}. \quad (5)$$

Линейную плотность трубопровода вычислили по формуле

$$\rho_л = \rho\pi D\delta \quad (6)$$

где $\rho = 7800\frac{кг}{м^3}$ – плотность стали; D = 0,53 м – диаметр трубопровода; δ = 0,013 м – толщина стенки трубопровода.

Решение по описанному алгоритму представлено на рис. 5 и получено при следующих параметрах: количество узлов сетки решений 1000; начальное положение трубопровода горизонтальная линия в глубине 8 м; начальные реакции грунта 45 кН/м в каждом узле; возмущение реакций грунта 100 Н/м; коэффициент в алгоритме градиентного спуска 10^8. После примерно 10 тысяч итераций получена функция, являющаяся решением уравнения подземного трубопровода (4) и проходящая по измеренным точкам.

На рис. 5 показана полученная функция положения подземного трубопровода на участке протоки Табагинская магистрального трубопровода по точечным планово-высотным измерениям в апреле 2018 г. В левой части рисунка – пойма р. Лены, в средней – береговой склон протоки, в правой – дно протоки. Положение трубопровода показано сплошной линией; кружками – измеренное положение трубопровода; штриховой линией – уровень дневной поверхности грунта; координаты даны в метрах от реперной точки.

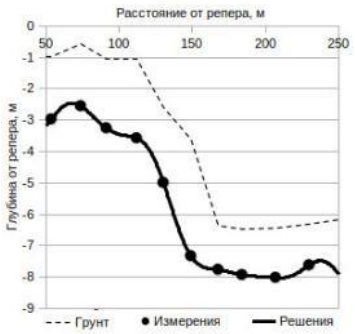


Рис. 5. Напряжения в подземном трубопроводе: ▬ – напряжения, ——— – положение трубопровода, ------ – уровень дневной поверхности грунта

Из полученной функции положения трубопровода вычислили радиусы изгиба, по которым оценивали возникшие механические напряжения. В исследованном трубопроводе применены трубы из марки 13Г1С-У, предел текучести ~ 400 МПа, а на некоторых участках получены значения, превышающие этот предел. Это означает, что деформация трубопровода выходит за пределы применимости уравнения (4).

Трубопровод кроме упругих деформаций в некоторых областях может испытывать и пластические деформации, которые рассчитываются с использованием упругопластических моделей.

Выводы. Изучены воздействия морозных пучений, приводящие к деформации подземного трубопровода сложной формы. Такие воздействия пучений на магистральный подземный трубопровод до сих пор не приведены в научной литературе. Сдвиги при этих деформациях достигают ~2 м, что является опасным для эксплуатации трубопровода и, несомненно, требует детального изучения.

Предложен механизм, приводящий к сложным деформациям подземного трубопровода и объясняющий сдвиги трубопровода на порядок превышающий уровень пучения. Разработанная математическая модель, хоть и упрощенная, но подтверждает предложенный механизм.

Благодарность. *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (Рег. № 124032600080-4, научная тема FWRS-2024-0035).*

Список литературы

1. Шамилов Х.Ш., Гулин Д.А., Хасанов Р.Р., Султанмагомедов С.М. Об обеспечении устойчивости подземных магистральных трубопроводов на талых участках многолетнемерзлых грунтов // Нефтегазовое дело, – 2015. т. 13, № 2. С. 111-118.
2. Лазарев С.А., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Оценка технического состояния линейной части магистрального газопровода на участках со значительными пространственными деформациями // Газовая промышленность. – 2016. – № 9 (743). – С. 84-90.
3. Permyakov P.P., Kornilova Z.G., Ammosov G.S. Concerning the Bottom Erosion and Frost Heaving on the Section of the Underwater Crossing Route of MGL Across the River Lena // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 666, International science and technology conference «Earth science» 8-10 December 2020, Vladivostok, Russian Federation. DOI: 10.1088/1755-1315/666/3/032005.
4. Лебедев М.П., Пермяков П.П., Иванов Дж.С., Яковлев Ю.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при пучении грунта // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Arctic and Subarctic Natural Resources. Якутск, 2018. Т. 25. № 3, С. 114-120.
5. IvanovD.S., AmmosovG.S., Kornilova Z.G. Influence of natural climatic conditions on the spatial position of the underwater gas pipelines on the Lena floodplain // Procedia Structural Integrity. Vol. 20. Pp. 242-247. Published: 2019 in Igf Workshop Fracture and Structural Integrity. DOI: 10.1016/J. PROSTR.2019.12.146.
6. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1982. – 340 с.
7. Ясин Э.М., Черникин В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. – М.: Недра, 1967. – 119 с.
8. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-географических условиях / А.М. Шаммазов, Р.М. Зарипов, В.А. Чичелов и др. – М.: Интер, 2005. Т. 1, 706 с.
9. Иванов Дж.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений // Трубопроводной транспорт: теория и практика. 2022. № 1 (81). С. 27-30.
10. Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности. – М: Изд. АСВ, 2004. – 424 с.

УДК 303.7:004.41
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-159-163

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ С УДАЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОСТОВ

Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Иванов Т. Д., Аммосова Л.С.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
E-mail: ivanovds@gmail.com

Аннотация. *Представлена разработка автономной распределённой измерительной системы для мониторинга механических напряжений в подземных трубопроводах, эксплуатируемых в условиях вечной мерзлоты, и в стенках резервуаров для нефтепродуктов. Система построена на основе энергоэффективных удалённых постов, использующих микроконтроллер STM32 и 24-битный АЦП CS1238, с передачей данных через GSM-модуль SIM800L. Серверная часть реализована на платформе FreeBSD с использованием СУБД PostgreSQL. Удалённые посты способны работать до нескольких месяцев от одного литиевого аккумулятора, поддерживают конфигурацию с 12 измерительными каналами и обладают универсальностью для работы с различными аналоговыми датчиками. Архитектура системы обеспечивает масштабируемость до нескольких тысяч измерительных постов и удалённый доступ к данным в режиме реального времени.*

Ключевые слова: *распределенная измерительная система, удаленный измерительный пост, микроконтроллер, прецизионный АЦП, автоматизированный сбор данных, GPRS, долговременный мониторинг.*

TECHNICAL EQUIPMENT FOR DATA COLLECTION FROM REMOTE MONITORING STATIONS

Ivanov D.S.[1], Ammosov G.S.[1], Ivanov T.D.[1], Ammosova L.S.[1]
[1]V.P. Larionov Institute of Physico-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk

Abstract. *An autonomous distributed measurement system has been developed for monitoring mechanical stresses in underground pipelines operating in permafrost conditions and in petroleum product storage tanks. The system comprises energy-efficient remote units based on STM32 microcontrollers and 24-bit CS1238 ADCs, which transmit data via SIM800L GSM modules to a central FreeBSD server running PostgreSQL. The remote units can operate for several months on a single lithium battery, support configurations with up to 12 measurement channels, and are capable of collecting data from various analog sensors. The system architecture provides high scalability (supporting thousands of remote units) and remote data access.*

Keywords: *distributed measurement system, remote measurement station, microcontroller, precision ADC, automated data collection, GPRS, long-term monitoring.*

Введение. Многолетний мониторинг планово-высотного положения подземных трубопроводов в условиях вечной мерзлоты выявил на отдельных участках интенсивные деформации, возникающие дважды в год – в периоды промерзания и оттаивания грунта. Для описания этих процессов была разработана математическая модель [1, 2], верификация которой требует натурных измерений механических напряжений в трубопроводе именно в указанные периоды.

Также разработана математическая модель сплошной коррозии резервуара для нефтепродуктов [3]. В этой модели одним из определяющих факторов являются механические напряжения в стенках резервуара. Их величина зависит от уровня жидкости, который изменяется неравномерно. Для расчета напряжений в стенках использована математическая модель, разработанная Тимошенко [4]. Как и любая модель, она основана на определенных допущениях и может давать погрешности при отклонении реальных условий от тех, которые были приняты при ее разработке. Для точного определения непрерывно изменяющихся напряжений необходим мониторинг в течение года.

В связи с этим была поставлена задача разработать и изготовить специализированную измерительную систему, способную в автономном режиме проводить измерения механических напряжений с заданной периодичностью и надежно накапливать полученные данные в течение всего года. Особую сложность представляет тот факт, что объекты измерений – как участки подземных трубопроводов в зоне вечной мерзлоты, так и резервуары для хранения нефтепродуктов – расположены на значительном

удалении от исследовательской лаборатории. Это исключает возможность регулярного визуального контроля или сбора данных вручную, а также предъявляет повышенные требования к энергоэффективности и надежности системы.

Концепция разрабатываемой системы предполагает ее полную автономность, длительную энергонезависимость и возможность дистанционной передачи данных. Использование современных микросхем с высокой надежностью и сверхнизким энергопотреблением делает реализацию такой системы технически достижимой.

Функциональная схема измерительной системы. Измерительная система построена по распределенному принципу и включает сеть удаленных измерительных постов, а также центральный сервер сбора и хранения данных.

Функциональная схема измерительного поста представлена на рис. 1. Преобразование аналоговых сигналов от первичных датчиков в цифровую форму осуществляется с помощью прецизионных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Для обеспечения многоканальности измерений в составе каждого поста используется несколько АЦП.

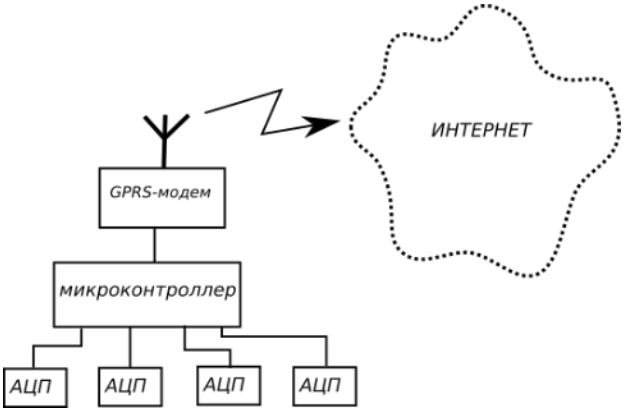


Рис. 1. Функциональная схема измерительного поста

Центральный процессор поста на базе микроконтроллера выполняет функции сбора оцифрованных данных, их временной буферизации и формирования пакетов в формате, пригодном для передачи. Для коммуникации с центральным сервером используется GPRS-модем, обеспечивающий передачу данных через сети сотовой связи.

На стороне серверной части реализован программный комплекс, выполняющий прием телеметрической информации, ее верификацию и долговременное хранение в реляционной базе данных. Авторизованный исследователь получает доступ к измерительной информации через специализированное клиентское приложение, которое предоставляет инструменты для просмотра, анализа и экспорта данных в различных форматах.

Предложенная архитектура системы обеспечивает высокую степень автономности, оперативность мониторинга и минимизирует необходимость физического присутствия персонала на удаленных объектах.

Аналого-цифровой преобразователь. В качестве АЦП выбрана микросхема CS1238 от фирмы Chipsea Technologies (Shenzhen) Corp. Это двухканальный 24-битный прецизионный АЦП, сочетающий высокую точность измерений с низкой стоимостью. Такое сочетание характеристик позволяет экономически эффективно реализовывать многоканальные измерительные посты. Техническая документация на микросхему приведена в источнике [5].

Питание микросхемы от 3 В до 5 В, что позволяет питать напрямую от одного литиевого элемента питания. Потребляемый ток в дежурном (спящем) режиме составляет около 100 нА, а в активном режиме измерения возрастает до 2,5 мА. Поскольку АЦП большую часть времени находится в дежурном режиме и переходит в режим измерения лишь эпизодически (продолжительность одного измерения не превышает одной секунды), несколько таких микросхем могут питаться от одного литиевого аккумулятора в течение нескольких месяцев.

Согласно технической документации, уровень собственного шума микросхемы составляет 180 нВ. Экспериментальная проверка подтверждает заявленные параметры: на рисунке 2 представлены результаты измерения шумов на эталонном резисторе – значения находятся в диапазоне от 1179,75 мкВ до 1180,12 мкВ, что в среднем соответствует паспортным характеристикам.

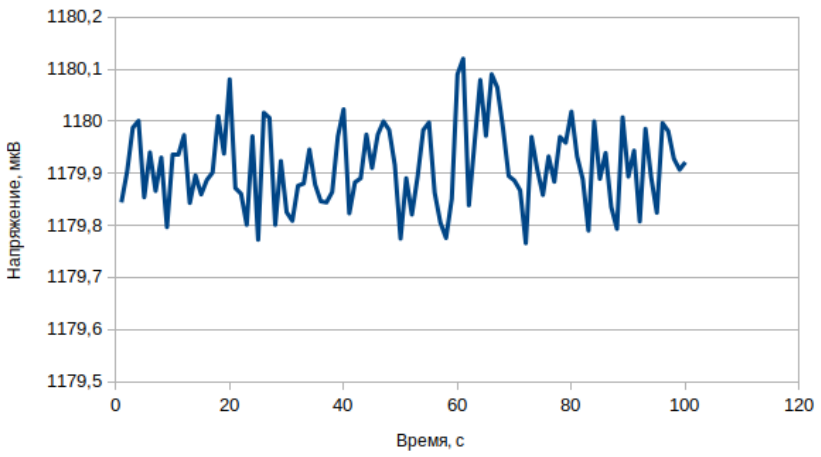


Рис. 2. Измерение собственных шумов АЦП

Для связи с микроконтроллером используется двухпроводной интерфейс на основе протокола SPI (последовательный периферийный интерфейс).

Микроконтроллер. В качестве управляющего микроконтроллера выбрана модель STM32F030F4P6. Ее главное преимущество – крайне низкое энергопотребление при достаточной для решаемых задач вычислительной производительности. Микроконтроллер оснащен 32-битным ядром ARM Cortex-M0, имеет 4 КБ оперативной памяти (SRAM) и 16 КБ флэш-памяти для хранения программы. Техническая документация на микроконтроллер приведена в источнике [6].

Микроконтроллер предоставляет 15 универсальных портов ввода-вывода (GPIO). Из них два порта зарезервированы для взаимодействия с GPRS-модемом, что оставляет 13 портов для подключения аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Поскольку для каждой микросхемы АЦП требуются две управляющие линии (в рамках используемого интерфейса), к микроконтроллеру можно подключить до 6 АЦП. Учитывая, что каждый АЦП имеет 2 измерительных канала, общее количество измерительных каналов в одном посту может достигать 12.

В состав микроконтроллера входит встроенный таймер реального времени (RTC). Для минимизации энергопотребления контроллер программирует RTC на пробуждение через заданный интервал, после чего переходит в режим пониженного энергопотребления (спящий режим). По истечении заданного времени RTC пробуждает микроконтроллер, запускается цикл измерений: опрашиваются все подключенные АЦП, собранные данные упаковываются и передаются на сервер через GPRS-модем. После завершения передачи микроконтроллер снова переходит в спящий режим.

Напряжение питания микроконтроллера составляет 2,6–4,0 В, что позволяет подключать его напрямую к стандартному литиевому аккумулятору без дополнительных преобразователей. В спящем режиме потребляемый ток не превышает 2 мкА, а в активном режиме – около 5 мА.

Цикл опроса всех аналого-цифровых преобразователей занимает несколько секунд, а установка соединения с сервером и передача данных – порядка одной минуты. Таким образом, активная фаза работы длится примерно 1 минуту, после чего устройство переходит в спящий режим на 30–60 минут. При таком режиме работы среднее энергопотребление системы лишь незначительно превышает уровень дежурного тока, что обеспечивает длительную автономную работу от одного аккумулятора.

GPRS модем. Для передачи данных через сотовую сеть в измерительной системе используется GSM/GPRS-модуль SIM800L, разработанный компанией SIMCom. Этот модуль предназначен для подключения различных встраиваемых устройств к мобильным сетям стандарта 2G (GSM/GPRS) и получил широкое распространение благодаря своей компактности, надежности, низкой стоимости и широкой поддержке в сообществе разработчиков. Техническая документация на модуль приведена в источнике [7].

Модуль поддерживает работу в четырех диапазонах (850/900/1800/1900 МГц), что обеспечивает совместимость с большинством GSM-сетей по всему миру. Для обмена данными с микроконтроллером предусмотрен стандартный последовательный интерфейс UART, что упрощает интеграцию даже с простыми микроконтроллерами. Управление модулем осуществляется с помощью широко распространенных AT-команд, а встроенная поддержка стека IP/TCP/UDP/HTTP значительно упрощает реализацию связи с удаленным сервером – разработчику не нужно программировать сетевые протоколы «с нуля».

Питание модуля осуществляется от источника напряжением 3,4–4,4 В, что позволяет подключать его напрямую к одному литиевому аккумулятору. Модуль поддерживает энергосберегающие режимы, что значительно снижает среднее энергопотребление при редкой передаче данных. В активном режиме

среднее токопотребление составляет около 200 мА. В дежурном (спящем) режиме потребление тока составляет всего около 0,7 мА, что делает SIM800L пригодным для использования в автономных системах с редкой передачей данных.

Этот модуль обеспечивает надежную и экономичную передачу телеметрических данных по сотовой сети, полностью соответствуя требованиям проекта в отношении автономности, компактности и длительного времени работы от аккумулятора.

Сервер сбора, хранения данных. Серверная часть системы реализована на базе обычного настольного компьютера, работающего под управлением операционной системы FreeBSD. Выбор именно этой ОС обусловлен ее высокой стабильностью, надежностью, эффективным управлением ресурсами и отличной поддержкой сетевых сервисов, что особенно важно для задач непрерывного приема и хранения телеметрических данных.

На сервере развернута реляционная система управления базами данных PostgreSQL, которая используется для долгосрочного хранения всех поступающих данных измерений. PostgreSQL выбран благодаря своей отказоустойчивости, поддержке сложных запросов, целостности данных.

В рамках серверного программного обеспечения разработано три взаимосвязанных приложения:

1) Приложение для приема данных постоянно работает в фоновом режиме, ожидая входящих соединений от удаленных измерительных постов по протоколу TCP/IP. Оно аутентифицирует поступающие запросы, проверяет целостность данных и записывает их в соответствующие таблицы базы данных с привязкой ко времени и идентификатору поста.

2) Серверное API-приложение – обеспечивает взаимодействие с клиентской частью. Оно обрабатывает запросы исследователей (например, «получить данные с поста № 3 за последнюю неделю»), извлекает нужную информацию из базы данных и возвращает ее в структурированном виде.

3) Клиентское приложение, устанавливаемое на рабочих станциях исследователей, предназначено для удобного взаимодействия с сервером. Оно подключается к серверному API, получает запрошенные данные, визуализирует их в понятной форме (графики, таблицы, сводки), позволяет фильтровать и анализировать информацию, а также поддерживает экспорт результатов в формат Microsoft Excel для дальнейшей обработки или интеграции с другими аналитическими инструментами.

Такая архитектура обеспечивает масштабируемость, безопасность и удобство работы с данными, позволяя исследователям получать актуальную информацию в любое время без необходимости физического доступа к измерительным постам.

По отзывам системных администраторов, сервер на базе стандартного настольного компьютера под управлением FreeBSD со стандартными настройками уверенно справляется с обработкой до сотни одновременных запросов.

Учитывая, что регистрация данных с одного измерительного поста занимает приблизительно одну минуту, это позволяет обслуживать до сотни постов в минуту. При условии, что посты передают данные с интервалом раз в 30 минут, теоретическая пропускная способность сервера составляет до 3000 измерительных постов.

Выбранная серверная архитектура обладает значительным запасом производительности, многократно превышающим потребности проекта. При планируемом количестве измерительных постов, которое на порядок меньше предельных возможностей системы, ресурсы сервера можно считать фактически неограниченными для всех текущих и перспективных задач.

Выводы. Разработанная измерительная система полностью соответствует поставленным задачам. Она обеспечивает надежный, автономный и удаленный сбор данных в условиях, когда объекты исследования находятся на удалении, а требования к длительной работе от аккумуляторов являются важными.

Одним из ключевых достижений проекта стала низкая себестоимость одного измерительного поста. Благодаря использованию доступных, но надежных компонентов (таких как 24-битный аналого-цифровой преобразователь CS1238 и микроконтроллер STM32F030P6) удалось создать экономически эффективное решение. Можно масштабировать для большого количества постов измерений без значительного увеличения бюджета. Что открывает возможность развертывания плотной сети наблюдения – например, вдоль протяженных участков трубопроводов или на крупном объекте.

Энергоэффективность системы находится на высоком уровне. Благодаря тщательно продуманной архитектуре энергосбережения, включающей режим глубокого сна микроконтроллера, низкое энергопотребление аналого-цифрового преобразователя в дежурном режиме и оптимизированный график передачи данных, один стандартный литиевый аккумулятор способен обеспечить работу поста в течение нескольких месяцев без подзарядки.

Изначально система проектировалась для измерения сопротивления тензометрических датчиков, однако в процессе разработки она превратилась в универсальную платформу для сбора данных. Архитектура поста позволяет подключать любые аналоговые датчики, выходной сигнал которых может быть оцифрован аналого-цифровым преобразователем. Одна и та же аппаратная платформа может использоваться для мониторинга напряжения, температуры, давления, влажности и других физических величин – достаточно лишь заменить датчик и скорректировать калибровочные коэффициенты в программном обеспечении.

Система обладает значительным запасом масштабируемости. Серверная часть, построенная на базе FreeBSD и PostgreSQL, способна обрабатывать данные до тысяч измерительных постов, что делает архитектуру практически неограниченной в рамках текущих и даже перспективных задач проекта.

Разработанное решение сочетает в себе доступность, надежность, энергоэффективность и гибкость, что делает его перспективным инструментом для долгосрочного мониторинга инженерных сооружений в сложных природных условиях.

Благодарность. *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (Рег. № 124032600080-4, научная тема FWRS-2024-0035).*

Список литературы

1. Иванов Д. С. Вывод уравнения подземного трубопровода для применения в расчетах напряженно-деформированного состояния при воздействии неравномерных морозных пучений / Д. С. Иванов, Г. С. Аммосов, З. Г. Корнилова // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2022. – № 1(81). – С. 27-30.
2. Иванов Д.С. Метод последовательного приближения с использованием градиентного спуска при оценке напряжений в подземных трубопроводах со сложными деформациями в пермафростной зоне / Д. С. Иванов, З. Г. Корнилова, Г. С. Аммосов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2023. – № 4(86). – С. 23-28. – EDN UXDRJF.
3. Моделирование сплошной коррозии для оценки сроков эксплуатации вертикального стального резервуара / Г. С. Аммосов, Д. С. Иванов, А. С. Кротов, О. В. Старцев // Коррозия: защита, материалы. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2025. – № 14. – С. 1-6. – DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-14-1-6. – EDN DGQINY.
4. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва: Наука, 1966. – 636 с.
5. Техническое описание 24-битного АЦП CS1238 (версия 1.5) [Электронный ресурс] / Chipsea Technologies. – URL: https://en.chipsea.com/api/uploadfileFront?content=https://chipsea-obs.obs.cn-south-1.myhuaweicloud.com:443/uploads/CS1238%E6%95%B0%E6%8D%AE%E6%89%8B%E5%86%8CV1.5_1668155271.pdf&title=CS1238%E6%95%B0%E6%8D%AE%E6%89%8B%E5%86%8CV1.5 (дата обращения: 30.10.2025).
6. Техническое описание STM32F030x4/x6/x8: 32-разрядный микроконтроллер на базе ARM®, до 48 МГц, флэш-память от 16 до 64 КБ, оперативная память от 4 до 8 КБ, USART, SPI, I²C, АЦП [Электронный ресурс] / STMicroelectronics. – Ред. 5. – 2023. – URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f030f4.pdf (дата обращения: 30.10.2025).
7. Спецификация аппаратного обеспечения SIM800L. V1.05 [Электронный ресурс] / SIMCom Wireless Solutions. – 2020. – URL: https://simcom.com/uploads/softs/SIM800L_Hardware_Design_V1.05.pdf (дата обращения: 30.10.2025).

УДК 669.14.539.89
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-164-167

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УТЕЧКИ ГАЗА И РАНЖИРОВАНИЕ ОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

Ильин Г.Ю.[1], *Бурнашев А.В.*[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: iling@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматривается задача оперативного определения места утечки природного газа из магистрального газопровода в полевых условиях. Проблема состоит в том, что визуальные признаки часто отсутствуют, а потоки газа рассеиваются в грунте и атмосфере. Предложен практико-ориентированный подход, основанный на трассовом обследовании с переносным газоанализатором, локальной оценке интенсивности выхода газа через дефект. Исследование включает два этапа. Сначала выполняется линейная разметка оси газопровода, выявляются аномалии метана по порогам в ppm и %НКПР. Представлен алгоритм ранжирования утечек по плотности потока. Получены экспериментальные данные восьми дефектов на действующем участке газопровода. Показано, что метод обеспечивает локализацию с точностью до 0,5–1,5 м и даёт количественную оценку интенсивности выхода. Ранжирование по плотности выхода позволяет дифференцировать приоритет ремонтных работ и улучшает планирование мониторинга. Обсуждены ограничения подхода и требования к условиям измерений.*

Ключевые слова: *магистральный газопровод, утечка газа, газоанализатор, локализация утечки, плотность выхода, определение концентрации.*

METHODOLOGY FOR NON-CONTACT DETECTION OF GAS LEAK LOCATIONS AND SEVERITY RANKING OF DETECTED DEFECTS ON UNDERGROUND MAIN GAS PIPELINES

Ilin G.Y.[1], *Burnashev A.V.*[1]
[1]The Institution of Russian Academy of Sciences the V.P. Larionov's Institut of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS

Abstract*. The article addresses the challenge of rapid on-site determination of natural gas leak locations from a transmission gas pipeline under field conditions. The difficulty lies in the frequent absence of visual indicators, while gas plumes disperse in the soil and the atmosphere. A practice-oriented approach is proposed, based on along-line surveying with a portable gas analyzer and local assessment of the gas release rate through a defect. The study comprises two stages. First, the pipeline axis is staked out, and methane anomalies are identified using thresholds in ppm and %LEL. An algorithm is presented for ranking leaks by flux density. Experimental data were obtained for eight defects on an in-service pipeline segment. It is shown that the method provides localization accuracy of 0.5–1.5 m and yields a quantitative estimate of the release rate. Ranking by efflux density enables prioritization of repair work and improves monitoring planning. The limitations of the approach and the requirements for measurement conditions are discussed.*

Keywords: *main gas pipeline, gas leak, gas detector, leak localization, gas emission density, concentration measurement.*

Одной из актуальных проблем в газовой отрасли на сегодняшний день остается проблема своевременного обнаружения мест малых утечек газа в магистральных газопроводах на местах зарождения дефектов. При этом, как показал проведенный анализ, наиболее распространенными местами утечек газа являются сварные, фланцевые и резьбовые соединения, поврежденные коррозией; участки, пораженные блуждающими токами; места механических повреждений; присоединения контрольно-измерительных приборов (КИП) и газовой арматуры.

Своевременное выявление утечек на малых стадиях развития дефектов является актуальнейшей задачей, которая может предотвратить крупные катастрофические аварии и угрозы безопасности людей.

Существующие методы обнаружения утечек имеют свои преимущества и недостатки, и требуют улучшений, дополнительных исследований и разработок новых методов обнаружения утечек.

Нарушение герметичности газопроводов происходит по различным причинам. На рисунке 1 показана диаграмма, иллюстрирующая статистику по основным причинам возникновения нештатных ситуаций в работе газопроводов за 10 последних лет.

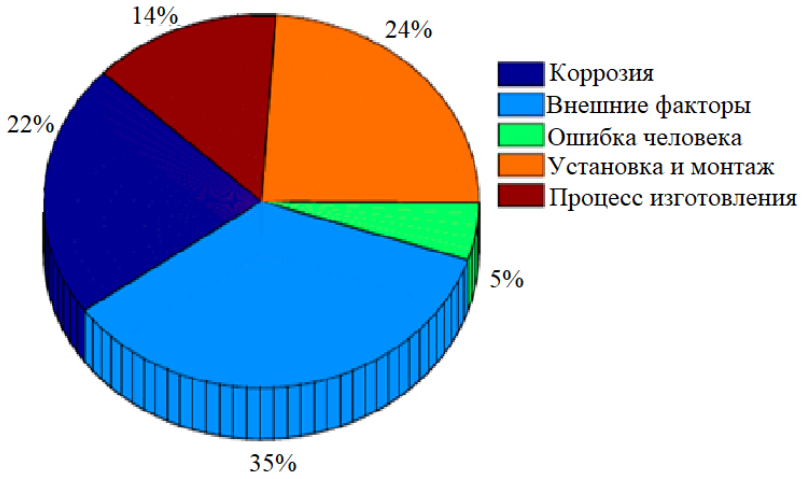


Рис. 1. Круговая диаграмма статистики по источникам отказов газопроводов (составлено авторами [1])

Исходя из вышесказанного становится очевидно, что важным фактором является обеспечение контроля состояния магистрального газопровода для своевременного обнаружения утечек, что позволит принять надлежащие меры с целью снижения последствий.

Цель данной работы – бесконтактное оперативное определение мест малых утечек природного газа на подземном магистральном газопроводе Павловск-Майя с применением портативного газоанализатора.

Объектом обследования является магистральный газопровод Павловск – Майя, который предназначен для транспортировки природного газа населению под давлением до 5,93 Мпа. Труба диаметром 530 мм и толщиной 7 мм, материал 09Г2С. Срок эксплуатации с 2006 г. Протяженность газопровода составляет 30 км, глубина залегания от 1,1 до 1,5 м. Рельеф местности в основном сосновый и лиственничный лес, пастбища. Грунт суглинок с песком, камнями, большое уплотнение грунта.

В сентябре 2020 года было проведено техническое диагностирование магистрального газопровода, которая включала в себя следующие виды работ: проведение рекогносцировки, визуальное обследование состояние трассы газопровода, отбор проб грунта для проведения коррозионных исследований, инструментальное исследование материала трубы в открытых участках и в контрольных шурфах.

Методика исследования. При диагностировании без вскрытия грунта определяется:

– трассировка магистрального газопровода, глубина заложения магистрального газопровода.

– проверка состояния изоляции и наличие переездов и других сооружений.

– линейный проход вдоль оси газопровода на герметичность путем поиска утечек газосигнализатором горючих газов. Отклонение от оси не более 2–5 метров.

– во время обхода зонд газосигнализатора с ручным щупом прижимается как можно ближе к земле, скорость прохождения – малый шаг (указать в м/с или км/ч).

– фиксация пиковых показаний и градиентов (рост/падение) и их геопривязка с помощью GPS-приемника.

–определение мест шурфового диагностирования.

Локализация места дефекта

– Критерий максимумов: на обследуемой трассе потоков найти значение с наибольшим градиентом – это приближенно указывает местонахождение эпицентра дефекта.

– Профиль вдоль трассы: выполнить серию измерений по оси трубопровода с шагом 2–5 м, место резкого скачка – индикатор близости источника утечки газа.

Портативный газоанализатор – это высокоточное измерительное устройство, используемое при непрерывном контроле количества содержащихся в воздухе газов, и реагирует на изменение концентрации природного газа. При повышении уровня загазованности датчик подает звуковой сигнал об опасности. Данная модель оснащена жидкокристаллическим дисплеем, на котором отображаются измеряемые показатели.

Таблица 1. Диапазоны измерений

Единица измерения	Диапазон	Разрешение
ppm	0–100 ppm	5 ppm
ppm	>100–2000 ppm	50 ppm
Объемный процент (1 Vol.-% 10,000 ppm)	CH 4, C3H8 > 2 000–22 000 ppm (0,2–2,2 Vol.-%)	0,2 Vol.-%

Пересчет концентрации в объемную долю

Определение: 1 ppm = 1×10^{-6} по объему.

Формула: $C_Г = C_{ppm}/10^6*100\%$,

где $C_Г$ – объемная доля (об. доля),

C_{ppm} – концентрация в ppm.

НКПР – нижний концентрационный предел распространения пламени – минимальное содержание газа в 1 $м^3$ воздуха, при котором возможно воспламенение газовоздушной среды.

Согласно ГОСТ [2] НКПР метана составляет 5 об.%.

Ранжирование по плотности выхода природного газа

Предлагаемая шкала для выбора приоритизации:

– Класс A (аварийный, немедленно): $C_Г >= 2,2$ об. %.

Признаки: сильные аномалии, быстрый рост C_{ppm} в камере (>2500 ppm за 10–20 с), запах, возможно повреждение растительности вокруг. Действия: оперативное ограждение, понижение давления, вскрытие и ремонт.

– Класс B (высокий приоритет): $0,2 \le C_Г < 2,2$ об. %.

Признаки: устойчивые аномалии, детектируемые на высоте 10–20 см, высокие градиенты. Действия: уточняющая диагностика, подготовка к ремонту.

– Класс C (средний приоритет, плановый ремонт): $0,1 \le C_Г < 0,2$ об. %.

Признаки: локальные аномалии, зависящие от погоды/влажности; возможна миграция по коммуникациям. Действия: наблюдение, дополнительная съемка при иных условиях, планирование ремонта.

– Класс D (низкий/фон): $C_Г < 0,1$ об. %.

Признаки: слабые, нестабильные сигналы на уровне фона, отсутствует устойчивый градиент. Действия: периодический мониторинг.

Результаты исследований

На участке газопровода протяженностью 30 км выявлены восемь устойчивых аномалий. По каждой обнаруженной аномалии выполнены измерения и оценена плотность выхода газа.

Первая аномалия (глубина заложения 1,6 м).

C_{PPM} : 550 ppm; $C_Г$: 0,055 % об. – категория «низкая».

Особенности: болото, склон, суглинок песчаный, отмечено медленное нарастание концентрации.

Вторая аномалия (глубина заложения 1,75 м).

C_{PPM} : 4000 ppm; $C_Г$: 0,4 % об. – категория «высокий приоритет».

Особенности: поляна, трава, дерновый покров влажный, отмечено быстрое нарастание концентрации.

Третья аномалия (глубина заложения 1,0 м).

C_{PPM} : 600 ppm; $C_Г$: 0,06 % об. – категория «низкая».

Особенности: лес, лиственница, почва суглинок песчаный, отмечено медленное нарастание концентрации.

Четвертая аномалия (глубина заложения 2,5 м).

C_{PPM} : 550 ppm; $C_Г$: 0,055 % об. – категория «низкая».

Особенности: лес, лиственница, почва суглинок песчаный, отмечено медленное нарастание концентрации.

Пятая аномалия (глубина заложения 1,8 м).

C_{PPM} : 600 ppm; $C_Г$: 0,06 % об. – категория «низкая».

Особенности: лес, лиственница, покатый склон, почва суглинок, отмечено медленное нарастание концентрации.

Шестая аномалия (глубина заложения 1,75 м).

C_{PPM} : 12 000 ppm; $C_Г$:1,2 % об. – категория «высокий приоритет».

Особенности: лес, сосна, почва суглинок, отмечено быстрое нарастание концентрации.

Седьмая аномалия (глубина заложения 1,9 м).

C_{PPM} : 4000 ppm; $C_Г$: 0,4 % об. – категория «высокий приоритет».

Особенности: лес, сосна, почва суглинок песчаный, отмечено быстрое нарастание концентрации.

Восьмая аномалия (глубина заложения 1,25 м).

C_{PPM} : 4000 ppm; $C_Г$: 0,4 % об. – категория «высокий приоритет».

Особенности: лес, береза, почва суглинок, отмечено быстрое нарастание концентрации.

Таблица 2. Результаты по выполненным измерениям

№	Объемная доля (об.доля)	Динамика концентрации	Категория приоритета	Глубина заложения, м	Ландшафт/почва
1	0,055	медленное нарастание	низкая	1,60	болото; склон; суглинок песчаный
2	0,40	быстрое нарастание	высокий приоритет	1,75	поляна; трава; дерновый покров влажный
3	0,06	медленное нарастание	низкая	1,00	лес; лиственница; суглинок песчаный
4	0,055	медленное нарастание	низкая	2,50	лес; лиственница; суглинок песчаный
5	0,06	медленное нарастание	низкая	1,80	лес; лиственница; покатый склон; суглинок
6	1,20	быстрое нарастание	высокий приоритет	1,75	лес; сосна; суглинок
7	0,40	быстрое нарастание	высокий приоритет	1,90	лес; сосна; суглинок песчаный
8	0,40	быстрое нарастание	высокий приоритет	1,25	лес; береза; суглинок

По местам выявленных аномалий было вскрытие газопровода методом шурфования. Газопровод уложен на глубине от 1,0 до 1,9 м, что соответствует проекту строительства. Были обнаружены следующие дефекты: защитная изоляция нарушена, по аномалиям категории «высокий приоритет» – трещины по продольному сварному шву длинами от 9 до 20 мм, категории «низкая» – пора диаметром 2 мм (рис. 2).

Рис. 2. Шурф, подземный газопровод на глубине 1,75 м

Заключение. В представленной работе предлагается применение данной методики для оперативного выявления местных аномалий в виде малых утечек природного газа из магистрального газопровода и их ранжирование в зависимости от плотности потока. Особенно важна точность определения местонахождения утечки для максимально эффективной локализации малой утечки, а также своевременного устранения последствий.

Список литературы

1. Дудин Р.В., Дербичев В.С., Роман К.С., Липатова А.В., Гулая Ю.В., Шульгин В.Е. Последние достижения в области обнаружения утечек в газопроводах // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, https://esj.today/PDF/27SAVN120.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
2. ГОСТ 31610.20-1-2020 «Взрывоопасные среды. Часть 20-1. Характеристики веществ для классификации газа и пара. Методы испытаний и данные», 2020 г.

УДК 57.012:569.614
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-168-171

МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРА ИСКОПАЕМОЙ МАМОНТОВОЙ КОСТИ

Исакова Т.А., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Аргунова А.Г., Соловьев Т.М., Чириков А.А., Петров В.В., Платонов Б.Р.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: tatyana_issakova@mail.ru

Аннотация. *Данное исследование посвящено анализу макро- и микроструктуры ископаемой мамонтовой кости. На макроскопическом уровне ископаемая мамонтовая кость представлена дентином, внешне покрытым цементным веществом. Как и все костные ткани, бивень мамонта состоит из гидроксиапатита, коллагена и воды. ИК-спектроскопия, термогравиметрический анализ (ТГА), рентгенофазовый анализ (РФА) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) позволили провести комплексный анализ образцов бивня мамонта и определить их структурные особенности. Полученные данные способствуют лучшему пониманию процессов минерализации и структурных изменений в костной ткани, а также дают представление об условиях сохранения древнего биоматериала.*

Ключевые слова: *ископаемая мамонтовая кость, бивень мамонта, Якутия, условия хранения, структура бивня мамонта*

MACRO- AND MICROSTRUCTURE OF FOSSIL MAMMOTH IVORY

Isakova T.A., Petukhova E.S., Botvin G.V., Argunova A.G., Solov'ev T.M., Chirikov A.A., Petrov V.V., Platonov B.R.
Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the SB RAS»

Abstract. *This study analyzes the macro- and microstructure of fossil mammoth ivory. At the macroscopic level, fossil mammoth ivory consists of dentin externally coated with cementum. Like all bone tissues, mammoth ivory consists of hydroxyapatite, collagen, and water. Infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis (TGA), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) enabled a comprehensive analysis of mammoth ivory samples and the determination of their structural features. The data obtained contribute to a better understanding of mineralization processes and structural changes in bone tissue and provide insight into the preservation conditions of ancient biomaterial.*

Keywords: *Fossil mammoth ivory, mammoth tusk, Yakutia, storage conditions, mammoth tusk structure*

Большая часть действующих лицензий на добычу ископаемой мамонтовой кости (ИМК) – бивней мамонта (БМ) в Республике Саха (Якутия) приходится на прибрежные арктические районы: Абыйский, Усть-Янский, Аллаиховский, Нижнеколымский районы, а также на Новосибирские острова, где сложились суровые климатические условия, обусловившие и экстремальные способы добычи данного сырья [1]. ИМК является уникальным, редким материалом, применение которого охватывает широкий спектр областей: от искусства и ремесел до науки и коллекционирования [2]. Костные остатки содержат ценную информацию о развитии и эволюции вымерших животных, о характеристиках их питания, физиологических особенностях и условиях окружающей среды в период их обитания [3].

Расширение круга палеонтологических исследований привело к использованию аналитических методов для решения самых разных палеонтологических проблем: от вопросов морфологии, систематики, онтогенеза и филогении древних организмов до общих вопросов палеоэкологии, палеобиономии, палеобиогеохимии и эволюции биосферы в геологическом прошлом [4]. Выбор конкретных приборов для проведения исследований определяется поставленными задачами. Для определения состава и структуры ископаемой мамонтовой кости были задействованы такие инструментальные методы как ИК-спектроскопия, термогравиметрический анализ (ТГА), рентгенофазовый анализ (РФА) и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ).

На макроскопическом уровне ИМК взрослой особи состоит из двух частей – цементное вещество и дентин. На рисунке 1 показан фрагмент поперечного среза бивня мамонта (БМ). Внешняя оболочка, представляющая собой цемент, отделена от дентина четко выраженным переходным кольцом. На поперечном срезе БМ дентин демонстрирует характерный графический рисунок, который проявляется в чередовании светлых и темных зон. В научной литературе этот феномен назван Узором Шрегера в

честь немецкого анатома Бернхарда Натанаэля Готтлоба Шрегера [5]. Данная особенность БМ помогает отличать её от других костных тканей и изделий, изготовленных из них.

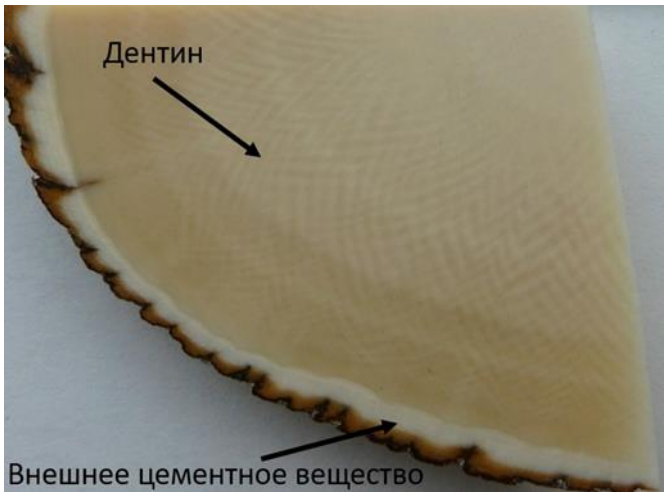
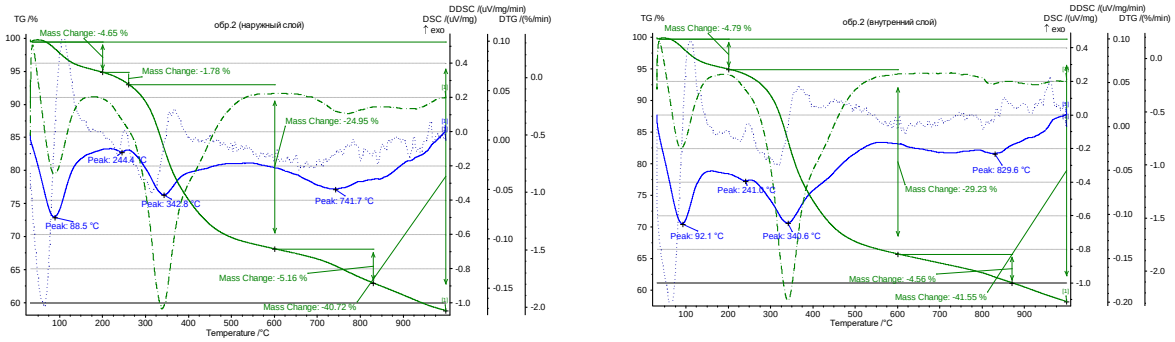


Рис. 1. Поперечный спил бивня мамонта

Состав дентина и цементного вещества схож. Как и другие костные ткани, БМ представляет собой сложноструктурированный композитный материал, состоящий из гидроксиапатита (ГАП), коллагена и воды. Тем не менее, соотношение этих компонентов в цементе и дентине значительно различается, что связано как с условиями их формирования при жизни животного, так и с условиями их залегания в природной среде после его смерти.

На рисунке 2 представлены характерные термограммы дентина и цементного вещества БМ. Анализ термограмм позволил выделить 5 стадий термического разложения костных тканей БМ: 25–180 °C – потеря адсорбированной влаги; 180–300 °C – испарению структурной (связанной) молекулярной воды и удалению низкомолекулярных органических веществ, представленных неколлагеновыми белками с малой молекулярной массой; 300–600 °C – разложение высокомолекулярных органических соединений (коллаген); 600–750 °C – разложение вторичных карбонатных минералов, которые в больших количествах присутствуют в фазах более минерализованной кости; 750–900 °C – разложение карбонат-иона, присутствующего в кристаллической решетке апатита (карбонатзамещенного гидроксиапатита) [6].

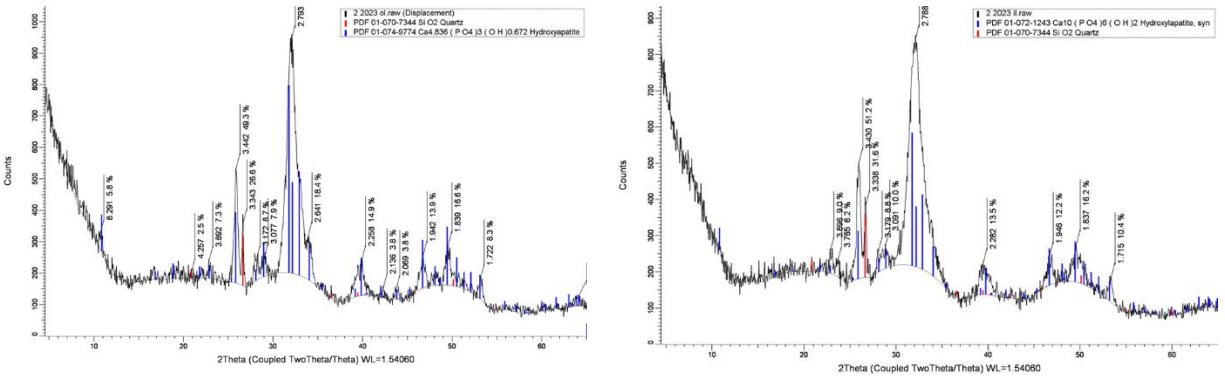


а б

Рис. 2. Результаты ТГА образца БМ: а) цементного вещества; б) дентина

На основании ТГА было установлено, что цементное вещество БМ более минерализовано и содержит большее количество низкомолекулярных органических веществ, а дентин содержит больше влаги и высокомолекулярных органических соединений [7]. Причиной полученного результата может являться то, что в процессе залегания, цементное вещество непосредственно взаимодействует с минеральными составляющими вмещающих пород, в связи с чем, цемент значительно более минерализован. После высвобождения из вмещающих пород, костные ткани постепенно разрушаются, а образовавшиеся трещины и другие дефекты обеспечивают доступ минеральных веществ из окружающей среды к дентину, вызывая его минерализацию.

На рисунке 3 представлены характерные дифрактограммы дентина и цементного вещества БМ. Установлено, что в составе проб присутствует кварц. РФА показал, что ГАП в БМ находится в нестандартном стехиометрическом соотношении, что может быть обусловлено протеканием процессов ионного замещения в процессе залегания и хранения БМ. Также было показано, что зачастую в составе содержатся инородные минеральные включения, к примеру, минерал ньюберит [8], образование которого происходит в условиях кислой среды и высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния [9]. Кроме ньюберита, наиболее часто в составе костных тканей возможно выявить вивианит, метавивианит, сантабарбареит, струвит и др.



а б

Рис. 3. Дифрактограммы образца БМ: а) цементное вещество; б) дентин

Результаты ИК-спектроскопического исследования показали, что ГАП в БМ находится в карбонатзамещенном виде [10]. Наличие кварца в исследуемых образцах может быть обусловлено как протеканием процессов окремнения при фоссилизации, а также механически привнесено в образец из грунтовых отложений.

ИК-спектроскопия позволяет выделить весь комплекс функциональных группировок компонентов БМ. Так, коллаген представлен характеристическими полосами поглощения амидных группировок [11]. Колебаниям амида I соответствует полоса при 1652 см$^{-1}$, амида II – 1544 см$^{-1}$, амида III – 1241 см$^{-1}$. Колебания амидов А и В частично перекрываются с полосами поглощения гидроксид-аниона и на спектре представлены полосой при 3747 см$^{-1}$. Алифатическая часть представлена валентными колебаниями С-Н в группах CH_2 и CH_3 при 2853 и 2924 см$^{-1}$. ГАП на ИК-спектре представлен колебаниями фосфатной группировки (PO_4^{3-}): наиболее интенсивная полоса получена для антисимметричного валентного колебания Р-О при 1032 см$^{-1}$, для дважды вырожденных колебаний О-Р-О выявлена полоса при 470 см$^{-1}$ и трижды вырожденных колебаний при 562 и 602 см$^{-1}$. О том, что ГАП в БМ находится в карбонатзамещенном виде свидетельствуют полосы поглощения валентных колебаний С-О (CO_3^{2-}→OH-) при 1455 см$^{-1}$ и деформационных колебаний О-С-О полосами при 879 см$^{-1}$ и при 873 см$^{-1}$ характерных при замещении CO_3^{2-}→PO_4^{3-}. Гидроксид-анионы на спектре проявляются в виде деформационных колебаний при 1652 см$^{-1}$ и валентных колебаний при 3339 и 3747 см$^{-1}$. Вода проявляется на спектре широкой диффузной полосой при 3339 см$^{-1}$.

Методом СЭМ было установлено, что ткани бивня имеют минерализованные участки, элементный состав которых характеризуется более высоким содержанием кислорода, углерода и магния, что свидетельствует о том, что минерализация БМ может протекать не только при длительном контакте БМ с минералами окружающей среды, но и при преобразовании гидроксиапатита при длительном залегании, сопровождающемся образованием магнийсодержащих минералов. Наличие инородных включений также может нести информацию об условиях залегания БМ в природной среде, а также о процессах, имевших место при жизни животного [12].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 125030403135-5 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Потравный И.М. Обеспечение безопасности и комфортности жизнедеятельности коренных народов севера при добыче мамонтовой кости в арктической зоне страны // Материалы Международной научно-практической конференции (в рамках деловой программы межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации («Безопасная Арктика-2025»)). Москва, 2025. С. 57–64.
2. Смирнов А.Н., Кириллин Н.Д., Иванова Ю.В., Журилова М.А. Забытое полезное ископаемое российской арктики – мамонтовая кость // Арктика: экология и экономика. 2016. № 1 (21). С. 66-75.
3. Schweitzer M.H. (2023) Paleontology in the 21st Century. *Biology*, vol. 12, no. 3, pp. 487. DOI:10.3390/biology12030487
4. Физические и химические методы исследования в палеонтологии / Под ред. А.Ю. Розанова. М.: Наука, 1988, 189 с.
5. Alberic M., Dean M. N., Gourrier A., Wagermaier W., Dunlop J. W. C., Staude A., Fratzl P., Reiche I. (2017) Relation between the Macroscopic Pattern of Elephant Ivory and Its Three-Dimensional Micro-Tubular Network. PloS One. vol. 12. no. 1. DOI: 10.1371/journal.pone.0166671
6. Durga R., Jimenez N., Ramanathan S., Suraneni P., Pestle W.J. (2022) Use of thermogravimetric analysis to estimate collagen and hydroxyapatite contents in archaeological bone. Journal of Archaeological Science, vol. 145, no. 4, p. 105644. DOI: 10.1016/j.jas.2022.105644
7. Исакова Т.А., Петухова Е.С., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Петров В.В., Павлова В.В., Чириков А.А. Исследование бивней мамонта с применением рентгенофазового анализа, термогравиметрического анализа и ИК-спектроскопии // Материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и 100-летию золотодобывающей промышленности Республики Саха (Якутия) «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России». Новосибирск: СО РАН, 2024. С. 114-118.
8. Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С. Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 3. С. 495-506. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506.
9. Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. (2002) On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory. Studies in Conservation. vol. 47, no. 3. pp. 155-160.
10. Pavlova, V.V., Petukhova, E.S., Isakova, T.A., Kolesova E.S., Chirikov A.A., Protopopov F.F. (2022) Study of the Structure of Mammoth Tusk by IR Spectroscopy. *Optics and Spectroscopy*. vol. 130, no. 3. pp. 207–213. DOI: 10.1134/S0030400X22030110
11. Золотарев В.М., Хлопачев Г.А. Особенности применения методов спектроскопии ИК отражения для исследований в археологии // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114. № 6. С. 1036–1050.
12. Петухова Е.С., Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В. Исследование микроструктуры бивня мамонта методом сканирующей электронной микроскопии // Записки Российского минералогического общества. 2025. Т. 154. № 3. С. 123–136. DOI: 10.31857/S0869605525030085

УДК 693.548.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-172-174

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ДОБАВКИ, КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА И ДЕРЕВА

Кузьмин С.А., Красильников Д.А., Егорова А.Д., Максимов А.А., Петров А.М.
Северо-Восточный федеральный университет

Аннотация. *На сегодняшний день основными материалами для строительства зданий и сооружений выступают бетон, кирпич, дерево и металл. Повышение эксплуатационных характеристик этих материалов, является приоритетной задачей современных научных исследований. В работе представлен опыт модификации тяжелого бетона М200, бетонов М 75, и М 125 полимерной пропиткой «Амокор» получены данные о повышении прочностных характеристик исследуемых материалов. Были проведены испытания на изгиб в широком диапазоне климатических температур +20 °С…–60 °С. Выявлено, снижение прочности немодифицированных образцов при температуре испытаний –30 °С, что объясняется ростом внутренних напряжений. Модификация образцов позволила снять внутренние напряжения.*

Ключевые слова: *бетон, прочность, сжатие, изгиб, долговечность, низкие температуры, композит, полимерная добавка, модификация.*

USING A POLYMER ADDITIVE AS A WAY TO IMPROVE THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AND WOOD PRODUCTS

Kuzmin S.A., Krasilnikov D.A., Egorova A.D., Maksimov A.A., Petrov A.M.
North-Eastern Federal University

Abstract. *Today, the main materials for constructing buildings and structures are concrete, brick, wood, and metal. Improving the performance characteristics of these materials is a priority task of modern scientific research. The paper presents the experience of modifying heavy concrete M200, M75, and M125 using polymer impregnation «Amocor». Data on the increase in the strength characteristics of the materials under study have been obtained. Tests were conducted on bending within a wide range of climatic temperatures from +20 °C to –60 °C. It was revealed that the strength of unmodified samples decreased at a test temperature of –30 °C, which is explained by the growth of internal stresses. Modification of the samples allowed for the removal of internal stresses.*

Keywords: *concrete, strength, composite, compression, polymeric additive.*

Актуальность этой темы обусловлена тем, что в настоящее время бетоны используются в народном хозяйстве, являясь одним из основных строительных материалов. Бетоны изучаются давно, но несмотря на это, поведение их при низких температурах изучено недостаточно. Исследования механического поведения материалов при низких (–60 °С) температурах является первоочередной задачей при изучении вопроса о работоспособности данного класса материалов в условиях холодного климата.

В работе исследованы прочностные характеристики при сжатии и изгибе тяжелого бетона М-200 и сжатия при низких температурах бетонов М125 и М75 модифицированных полимерной добавкой Амокор [1]. Прочностные характеристики при сжатии снимались после термоциклирования, которое проводилось по методике, изложенной в ГОСТ 10060-2012.

В работе использовались стандартные методы определения эксплуатационных свойств бетонов с применением современных методик и оборудования.

БЕТОН М200. Проводились ускоренные климатические испытания (УКИ) по методике, изложенной в ГОСТ 10060-2012. После УКИ определялась прочность на сжатие. Изменения прочности на сжатие после УКИ фиксировались через 10, 30 и 50 циклов.

Экспериментальные результаты проведенных испытаний представлены на рисунке 1.

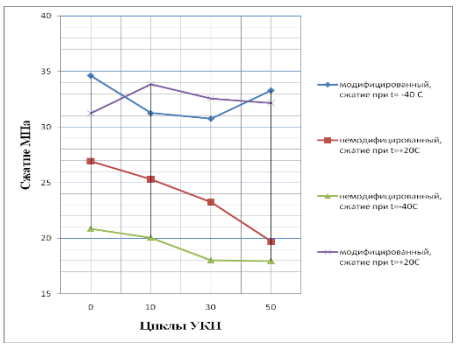


Рис. 1. Прочность на сжатие модифицированного и исходного тяжелого бетона М200 после проведения УКИ

Из рисунка 1 видно, что прочность на сжатие модифицированного тяжелого бетона М200 по отношению к прочности немодифицированного при температуре испытания –40 °С, повышается примерно на 60% на нулевом цикле. Прочность после 50 циклов УКИ у немодифицированного бетона снижается на 36%. Исходная прочность модифицированных образцов возрастает в 1,14 раз при температуре испытания +20 °С при нулевом цикле. Это может быть объяснено упрочняющим действием поверхностного слоя, который представляет собой полимербетон с уменьшенной пористостью. Снижение температуры при испытании модифицированных образцов, не оказывает влияния на прочность материала. После 50 циклов УКИ, прочность модифицированного бетона М200 не изменяется [2].

Кроме того, УКИ (Термоциклирование) были проведены на бетоне марок М 75и М125. Из них испытанию подверглись 24 образца марки М 75 и 24 образца марки М125. Половина из которых была модифицирована полимерной композицией Амокор КМ. При этом немодифицированные образцы обеих марок разрушились в процессе испытаний, причем М 75 полностью разрушились после 9 циклов УКИ, а М125 после 14. Отмечается, что небольшие изменения сплошности у испытуемых образцов начали появляться после 4-го цикла. Модифицированные образцы, не разрушаются после 25 циклов испытаний.

Для проверки прочности при различных температурах проводились испытания на изгиб бетона М200в диапазоне температур +20 °С…–60 °С. Полученные результаты приведены на рисунке 2.

Рис. 2. Испытания на изгиб бетона М 200 при различных температурах

Из рисунка 2 видно, что при температуре –60 °С наблюдается повышение прочности у модифицированных на 26% по отношению к прочности при температуре испытаний +20 °С; не произошло повышения прочности при испытании –60 °С по отношению прочности при температуре +20 °С для немодифицированных образцов; при температуре –30 °С, наблюдается падение прочности у немодифицированных образцов по сравнению с прочностью при температуре испытаний +20 °С на 32%. Это можно объяснить ростом внутренних напряжений. В то же время, наблюдается повышение прочности на 22,5% у модифицированных образцов при этих же параметрах испытаний. Поэтому, введение модификатора Амокор нивелирует влияние внутренних напряжений при низких температурах. Модификация материала, повышает пластичность поверхностного слоя, что положительно сказывается на прочности при этом виде испытаний; изменения прочности при дальнейшем снижении температуры (–40 °С…–60 °С) не наблюдается у немодифицированных образцов.

Выводы: 1) Модификация бетона М200 повышает его прочность при всех исследуемых температурах; 2) термоциклирование немодифицированных бетонов М75 и М125 приводит к разрушению образцов без влияния механических нагрузок; 3) модифицирование бетонов М125 и М75 позволяет сохранить целостность материалов при термоциклировании; 4) при температуре испытаний –30 °С немодифицированных образцов бетона М200 на изгиб, наблюдается падение прочности на 32%, что по-видимому вызвано ростом внутренних напряжений; 5) Применение модифицирования при температуре испытаний –30 °С позволяет нивелировать влияние внутренних напряжений.

Список литературы

1. Кузьмин С.А., Красильников Д.А., Петрова Д.С., Слепцова М.Е., Хон З.Н., Никитина Т. И., Николаева А.А., Эверстова А.А. Исследование прочности конструкционных материалов, модифицированного полимерной добавкой «Силор-ультра». //Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Инженерно-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К.Аммосова. Якутск, 27-28 октября 2016 г. [Электронный ресурс] / под ред. доц. А.Е.Саввиной. РАЗДЕЛ 3. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. Киров: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2016. С 228-324.
2. Kuzmin[1,a], A.A. Argunova[2,b], D.A. Krasilnikov[3,c], Z.V. Emelianova[4,d] Research of Durability and Structure of the Heavy Concrete Modified by Polymeric Impregnation in the Frigid Climate «Materials Science Forum», Trans Tech Publications Ltd., Materials Science Forum (Volume 945) February 2019 Pages:250-256. S.A.)

УДК 539.42
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-175-178

ЗАВИСИМОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА БИАКСИАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Прокопьев Л.А.[1], *Лукин Е.С.*[1], *Максимова Е.М.*[1]
[1]ФИЦ «ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СО РАН»
E-mail: l.prokopyev@yandex.ru

Аннотация. *В работе проведено исследование распределения коэффициента триаксиальности в окрестности вершины трещины. Установлено, что значения коэффициента триаксиальности принимают конечные значения у вершины трещины при наличии сингулярности поля напряжений. Показано, что положительные значения Т-напряжений приводят к более резкому снижению коэффициента триаксиальности при удалении от вершины трещины по сравнению с отрицательными значениями. Установлено существенное различие в уровнях триаксиальности для плоского напряженного состояния и плоской деформации. В последнем случае коэффициент триаксиальности в три раза превышает значения для плоского напряженного состояния, что объясняет повышенную склонность к хрупкому разрушению при ограничении деформации в направлении толщины.*

Ключевые слова: *коэффициент жесткости напряжений, Т-напряжения, коэффициент биаксиальности напряженного состояния, поле напряжений, трещина.*

DEPENDENCE OF STRESS TRIAXILITY DISTRIBUTION ON THE BIAXIALITY RATIO AT THE CRACK TIP

Prokopyev L.A.[1], *Lukin E.S.*[1]
[1]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”

Abstract. *The paper presents an investigation of the stress triaxiality distribution in the vicinity of a crack tip. It has been established that the stress triaxiality values remain finite at the crack tip despite the presence of stress field singularity. The study demonstrates that positive T-stresses lead to a more pronounced decrease in stress triaxiality with increasing distance from the crack tip compared to negative T-stresses. A significant difference in triaxiality levels between plane stress and plane strain conditions has been identified. Under plane strain conditions, the stress triaxiality exceeds that of plane stress conditions by a factor of three, which explains the increased susceptibility to brittle fracture when deformation is constrained in the thickness direction.*

Keywords: *stress triaxility, T-stress, biaxiality ratio, stress field, crack.*

Введение. Эксплуатация конструкций и техники, работающих в условиях климатически низких температур, представляет собой важную научно-техническую проблему, требующую разработки надежных критериев оценки хладостойкости материалов [1]. Для обеспечения надежности ответственных конструкций требуется понимание механизмов хрупкого разрушения, инициируемого дефектами типа трещин, развивающихся в условиях низких температур [2]. В настоящее время установлено, что сопротивление хрупкому разрушению существенно зависит от жесткости напряженного состояния, которая характеризуется коэффициентом триаксиальности [3, 4]. Данный параметр определяет соотношение между гидростатической и девиаторной составляющими тензора напряжений и оказывает решающее влияние на процессы пластического течения и зарождения разрушения. Однако существующие методы оценки хладостойкости часто не учитывают особенности распределения коэффициента жесткости в окрестности концентраторов напряжений.

Особую роль в формировании поля напряжений у вершины трещины играет коэффициент биаксиальности, определяемый через Т-напряжения [5, 6]. Данный параметр характеризует степень двухосности напряженного состояния и может существенно влиять на распределение коэффициента жесткости в окрестности вершины трещины. Недостаточная изученность данной зависимости ограничивает возможности точного прогнозирования сопротивления хрупкому разрушению при низких температурах.

Целью настоящей работы является исследование зависимости распределения коэффициента жесткости в окрестности вершины трещины от коэффициента биаксиальности напряженного состояния. В задачи исследования входит: анализ асимптотического поля напряжений с учетом Т-напряжений, установление закономерностей влияния Т-напряжений на распределение жесткости напряженного состояния.

Жесткость напряженного состояния. Известно, что склонность к хрупкому разрушению материала проявляется в условиях сочетания низкой температуры, скорости нагружения и концентратора напряжений [7]. Наличие концентратора напряжений приводит к формированию в его окрестности напряженного состояния, приближающегося по своему характеру к всестороннему растяжению. Данное состояние характеризуется доминированием гидростатической компоненты тензора напряжений над девиаторной. Такое соотношение компонент напряжений создает неблагоприятные условия для протекания процессов пластической деформации, поскольку пластическое течение является следствием сдвиговых напряжений, которые в условиях, приближенных к всестороннему растяжению, существенно подавлены. Таким образом, концентратор напряжений выступает как фактор, лимитирующий возможность релаксации напряжений посредством пластического течения, что в конечном итоге способствует реализации хрупких механизмов разрушения. Количественной мерой склонности материала к хрупкому разрушению, с точки зрения механики, служит параметр, известный как жесткость напряженного состояния. В отечественной научной литературе данный параметр характеризуется коэффициентом жесткости П, определяемым соотношением (1) [3]. В международных исследованиях аналогичную функцию выполняет коэффициент триаксиальности η, представленный формулой (2) [4].

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}}{\sqrt{0.5((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}} \tag{2}$$

где σ_1, σ_2, σ_3 – компоненты главных напряжений.

С целью анализа влияния параметров механики разрушения на жесткость напряженного состояния, рассмотрим распределение коэффициента триаксиальности в окрестности вершины трещины.

Коэффициент биаксиальности напряжений. Коэффициент биаксиальности напряжений B определяется в следующем виде (3): [5, 6]

$$B = \frac{T_x\sqrt{\pi l}}{K_1} \tag{3}$$

Данный параметр существенно влияет на условия пластического течения. При значениях B, близких к 1, создаются условия, благоприятствующие ограничению пластической деформации, поскольку доминирующая гидростатическая составляющая напряжений подавляет сдвиговые компоненты, ответственные за пластическое течение.

Компоненты напряжений у вершины трещины σ_x, σ_y, τ_{xy} выводятся из асимптотического разложения Уильямса в ряд функции напряжений [8, 9] и для случая трещины нормального отрыва описываются следующими уравнениями (4):

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) + T_x \\ \sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1 + \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2} \end{cases} \tag{4}$$

где r, θ – координаты в полярной системе координат с началом в вершине трещины, K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, T_x – Т-напряжения.

Если уравнения компонент напряжений подставить в выражения для жесткости напряженного состояния (1) или (2), получится уравнение, описывающее жесткость напряженного состояния в каждой точке с координатами r и θ. Данное действие целесообразно выполнить на линии продолжения трещины, так как в этом случае выражения (4) упрощаются. Касательные напряжения равны нулю, и следовательно, σ_x, σ_y являются главными напряжениями. Для условия плоского напряженного состояния (ПНС) σ_z равны нулю, а для условия плоской деформации (ПДС) σ_z выражаются как произведение коэффициента Пуассона на сумму σ_x и σ_y.

С использованием средств автоматизированного расчета на специализированном программном обеспечении построены графики распределения компонент поля напряжений и коэффициента триаксиальности по линии продолжения трещины (θ = 0°) при различных значениях Т-напряжений (Рисунок 1, Рисунок 2) для условий ПНС и ПДС.

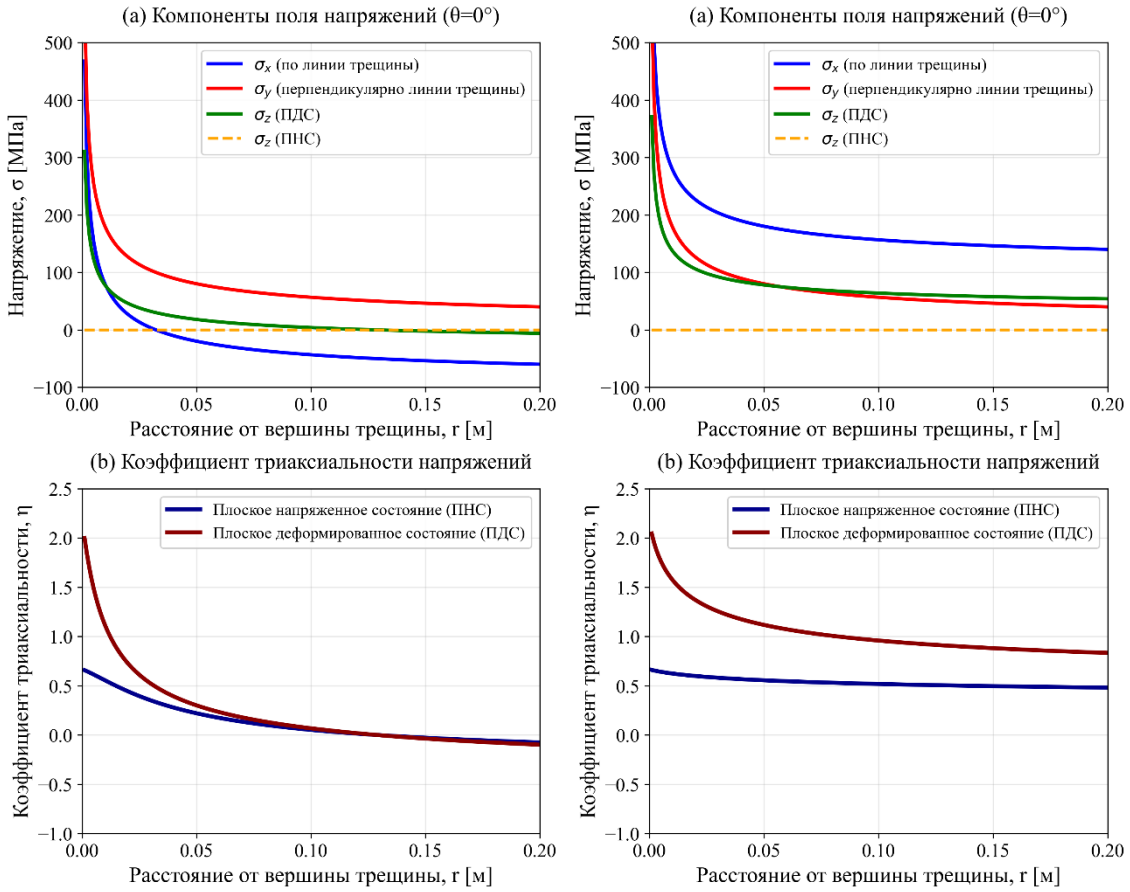


Рис. 1. Распределение компонент поля напряжений (а) и коэффициента триаксиальности (б) по линии продолжения трещины (θ = 0°) при Т=100 МПа (слева), и при Т=-100МПа (справа)

Обсуждение результатов. Из анализа рисунков 1 и 2 следует, что, несмотря на наличие сингулярности поля напряжений на вершине трещины, проявляющейся в неограниченном росте компонент тензора напряжений при r стремящемся к нулю, значения коэффициента триаксиальности остаются конечными величинами во всей исследуемой области. Данный факт свидетельствует о том, что сингулярные компоненты в выражениях для компонент напряжений сокращаются при вычислении безразмерного отношения гидростатического напряжения к эквивалентному напряжению по Мизесу.

Непосредственно в окрестности вершины трещины значения коэффициента триаксиальности демонстрируют асимптотическое поведение, стремясь к постоянным величинам, которые определяются исключительно типом напряженно-деформированного состояния (плоское напряженное состояние или плоская деформация) и коэффициентом Пуассона материала. Это позволяет утверждать, что характер распределения коэффициента триаксиальности в непосредственной близости от вершины трещины является универсальным и не зависит от приложенной нагрузки, которая влияет лишь на интенсивность сингулярности, но не на соотношение между компонентами тензора напряжений.

Наблюдаемое расхождение в значениях коэффициента триаксиальности для ПНС и ПДС объясняется наличием дополнительной компоненты напряжений σ_z в последнем случае. Эта компонента,

возникающая вследствие ограничения деформации в направлении толщины, увеличивает гидростатическое давление, что и приводит к повышению коэффициента триаксиальности.

Выводы. Установлено, что коэффициент триаксиальности в окрестности вершины трещины сохраняет конечные значения, несмотря на сингулярный характер поля напряжений.

Проведенный анализ выявил существенную зависимость характера распределения коэффициента триаксиальности от знака и величины Т-напряжения. Установлено, что при положительных значениях Т-напряжений наблюдается более резкое снижение коэффициента триаксиальности по мере удаления от вершины трещины, по сравнению с расчетом при отрицательных значениях Т-напряжений.

В условиях плоской деформации наблюдается повышенный уровень триаксиальности (в 3 раза выше по сравнению с плоским напряженным состоянием), что объясняет повышенную склонность к хрупкому разрушению при ограничении деформации в направлении толщины.

Список литературы

1. Санников И.И., Голиков Н.И., Семёнов С.В. Исследование ударной вязкости сварного соединения стали 10хснд при сварке в условиях низких климатических температур // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. №1. С. 114-115
2. Гурин М. А., Шафрай К. А. Особенности увеличения хладностойкости металлических сооружений // E-Scio. 2019. №8 (35). С. 186-194
3. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию, 3-е изд., Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1978. 368 с.
4. Kazutake K. Ductile Fracture in Metal Forming, Academic Press, 2020, P.286. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814772-6.00002-3.
5. А.А. Тырымов. Численное моделирование t-напряжений и коэффициента биаксиальности напряжений для образца с центральной трещиной при смешанных граничных условиях // Вычислительная механика сплошных сред. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 393-401
6. Степанова Л. В., Белова О. Н. Идентификация коэффициентов интенсивности напряжений, Т-напряжений и коэффициентов регулярных слагаемых высокого порядка в разложении Уильямса с помощью молекулярно-динамического моделирования // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. №2. С. 47-77
7. Ужик Г.В. Прочность и пластичность металлов при низких температурах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 192 с.
8. Низомов Д. Н., Ходжибоев А. А., Ходжибоев О. А. Поля напряжений и перемещений вблизи вершины трещины в линейной теории упругости // ДАН РТ. 2010. №11. С. 856-864.
9. Астапов Н.С., Кургузов В.Д. Моделирование упругопластического разрушения компактного образца // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2024. №87. С. 44-58. DOI: 10.17223/19988621/87/5

СЕКЦИЯ 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СЕВЕРА И АРКТИКИ (МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ)

УДК 548.4:661.666.2:620.186
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-179-182

СТРОЕНИЕ И ДЕФЕКТЫ НАНОАЛМАЗОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА И МЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ

Акимова М.П.[1], Сивцева А.В.[2], Шарин П.П.[2], Яковлева С.П.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: mar1ya_ak1mova@mail.ru

Аннотация. *Проведен сравнительный анализ морфологии и структурных характеристик первичных частиц порошков природного (ПНА) и детонационного наноалмаза (ДНА), полученных методами механического измельчения и детонационного синтеза соответственно. Исследования проводились с использованием методов растровой и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Установлены различия в размерах, формах и дефектах упаковок наночастиц обоих типов порошков. Определены межплоскостные расстояния и структурные параметры нанокристаллов. Показано, что нанокристаллы ПНА характеризуются большим разнообразием форм и размеров, тогда как частицы ДНА обладают большей однородностью, однако дефекты структуры в ядре частиц ДНА встречаются чаще.*

Ключевые слова: *наноалмазы, детонационный синтез, механическое измельчение, электронная микроскопия, структура нанокристаллов*

STRUCTURE AND DEFECTS OF NANO-DIAMONDS OBTAINED BY DETONATION SYNTHESIS AND MECHANICAL GRINDING

Akimova M.P.[1], Sivtseva A.V.[2], Sharin P.P.[2], Yakovleva S.P.[2]
[1]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS
[2]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS

Abstract. *A comparative analysis was conducted on the morphology and structural characteristics of primary particles in powders of natural nanodiamonds (NND) and detonation-synthesized nanodiamonds (DND), obtained by mechanical grinding and detonation synthesis methods respectively. The study employed high-resolution scanning electron microscopy techniques. Differences were observed in particle size, shape, and density defect between both types of powder. Interplanar distances and structural parameters of nanoparticles were determined. It was shown that NND nanocrystals are characterized by a wide variety of shapes and sizes, whereas DND particles demonstrate greater uniformity, although structural defects in the core of DNA particles occur more frequently.*

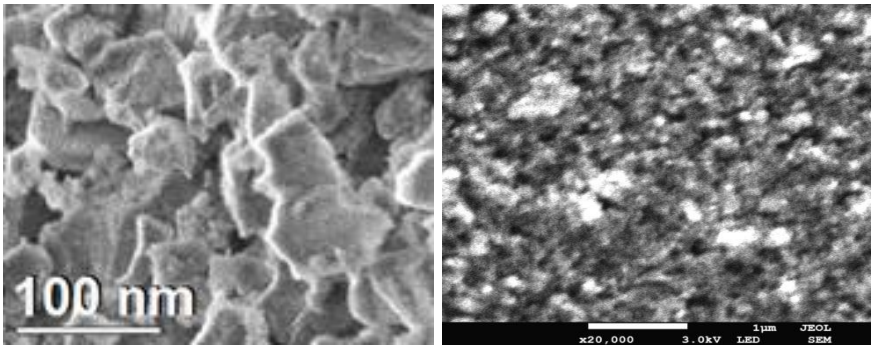
Keywords: *nanodiamonds, detonation synthesis, mechanical grinding, electron microscopy, structure of nanoparticles*

Исследование особенностей морфологии и структурных характеристик первичных частиц порошков природного (ПНА) и детонационного наноалмаза (ДНА) проводились на растровом электронном микроскопе JSM-6480LV (Jeol, Япония) и на просвечивающем электронном микроскопе Titan 80-300 (FEI, USA) с разрешающей способностью ~0,08 нм. Данные электронные микроскопы позволяют проводить прямое наблюдение и визуальную идентификацию различных частиц углеродных образований по морфологическим и структурным характеристикам [1]. Цифровая обработка изображений, полученных на ПЭМ (Фурье–преобразование, Фурье-фильтрация, определение межплоскостных расстояний по FFT-спектрам), проведена с помощью пакета программ GMS-2.3.2 (GATAN, USA). Приготовление образцов заключалось в следующем:

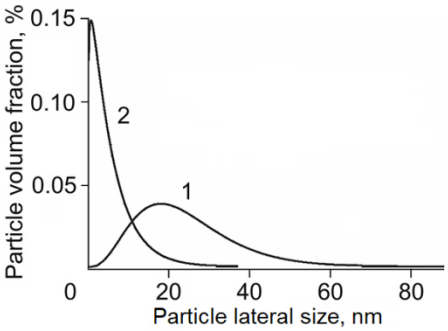
1) Нанесение углеродной плёнки толщиной 10–15 нм на поверхность медной сеточки-держателя прибора диаметром 3 мм с ячейками размером 50–100 мкм;

2) Напыление суспензии в спирте исследуемого образца нанопорошка при помощи ультразвукового диспергатора на поверхность углеродной плёнки.

На рис. 1 приведены изображения наночастиц порошков ПНА *(а)* и ДНА *(б),* полученные при помощи РЭМ, и график распределения наночастиц указанных порошков по размерам *(в)*, полученный методом рентгеновского малоуглового рассеяния. В табл. 1 приведены характерные формы частиц ПНА, классифицированные на основе данных анализа прямых изображений, полученных при помощи электронных микроскопов. Как показывают результаты анализа изображений, полученных электронным микроскопом, и график распределения наночастиц указанных порошков по размерам, кристаллиты ПНА имеют более широкий разброс, как по размеру, так и по форме.



а) *б)*



в)

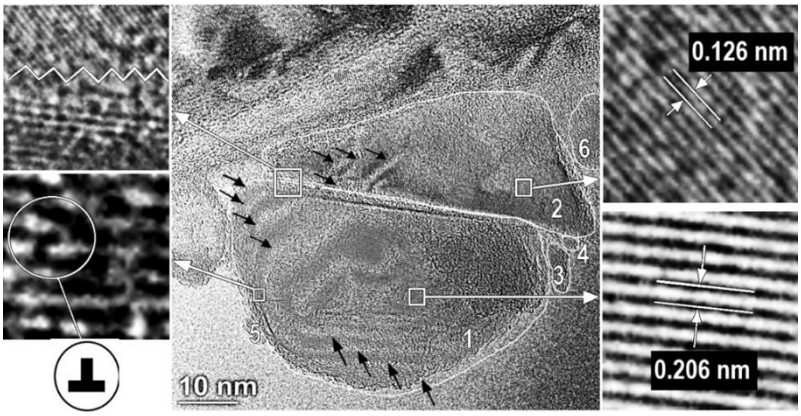
Рис. 1. Изображения наночастиц порошка ПНА *а)* и ДНА *б)*, полученные при помощи РЭМ, и график распределения наночастиц по размерам (в), полученный методом рентгеновского малоуглового рассеяния: 1 – ПНА, 2 – ДНА

Частицы порошка ПНА имеют преимущественно пластинчатую форму (чешуйки), то есть размеры по главным двум осям существенно превышают размеры по третьей оси, которые лежат в интервале 1,5–10 нм. Такая форма частиц ПНА, видимо, обусловлена тем, что в процессе измельчения под действием динамических нагрузок, оказываемыми мелющими шариками, кристаллы алмаза преимущественно раскалываются по плоскостям, параллельным граням октаэдра, образуя осколки или отколы частиц пластинчатых форм. В то время как, порошок ДНА содержит близкие по размеру и одинаковые по форме наночастицы, что согласуется с результатами многих работ, как например в [2]. В порошке ДНА практически отсутствуют частицы вытянутых форм.

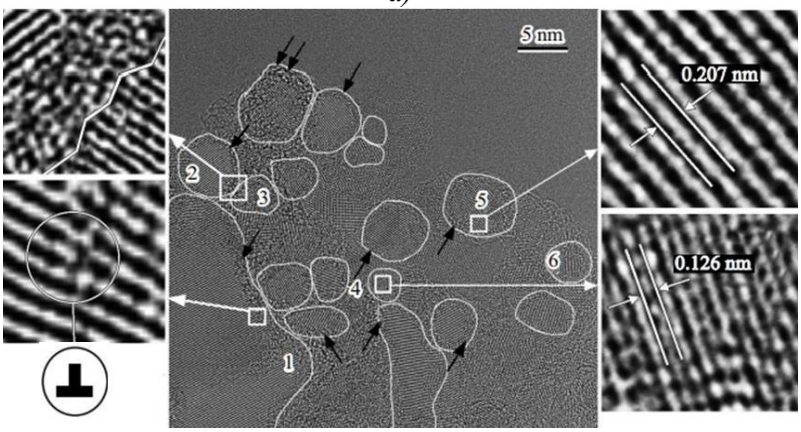
Таблица 3. Классификация форм наночастиц порошков ПНА и ДНА по двум взаимно-перпендикулярным проекциям по изображениям ПЭМ

Форма (облик) частиц	Формы частиц в образце порошка, %	
	ПНА	ДНА
Изометрические	7	84
Промежуточные	19	16
Пластинчатые	74	-

На рис. 2 показаны изображения тонкой структуры частиц порошка ПНА *(а)* и ДНА *(б)*, полученные с помощью высокоразрешающей ПЭМ при разных увеличениях в режиме светлого поля. Видно, что четко различаются ряды атомных плоскостей, являющимися составными элементами системы плоскостей, формирующими кубическую кристаллическую решетку алмаза, а также видны их дефекты упаковки.



а)



б)

Рис. 2. Изображения атомной структуры частиц порошков ПНА *а)* и ДНА *б)*, полученные с помощью высокоразрешающей ПЭМ. Цифрами обозначены нанокристаллы, для которых определены межплоскостные расстояния, количество атомных плоскостей и индексы Миллера (табл. 2)

На ПЭМ-изображениях ряды атомных плоскостей углерода в решетке алмаза видны в виде темных полос, а светлым полосам соответствуют пустые промежутки между плоскостями атомов углерода. Помимо ядер кристаллических решеток алмазов по их краям видны оболочки, окружающие алмазные ядра по всей площади их поверхности, и которые являются неотъемлемой структурной частью наноалмазов. Качественные ПЭМ изображения позволяют определить структурные характеристики нанодисперсных кристаллитов, такие как межплоскостные расстояния d_{hkl}, пространственную ориентацию, выявить и идентифицировать наличие дефектов упаковки кристаллической решетки. Межплоскостные расстояния d_{hkl} в нанокристаллитах по ПЭМ-изображениям определялись по формуле:

$$d_{hkl} = L_i / N_i \quad (1)$$

где N_i – количество атомных плоскостей в нанокристаллите, L_i – расстояние, в пределах которого укладывается это количество атомных плоскостей, определенное с учетом масштабной линейной шкалы ПЭМ-изображения. Структурные параметры нанокристаллов ПНА и ДНА, определенные по формуле (1) приведены в табл.2.

Таблица 2. Структурные параметры нанопорошков ПНА и ДНА

Порядковый номер кристалла	ПНА			ДНА		
	d_{hkl}, Å	Количество атомных плоскостей N_i	Индексы Миллера	d_{hkl}, Å	Количество атомных плоскостей N_i	Индексы Миллера
1	2.062	154	(111)	2.071	107	(111)
2	1.262	191	(220)		25	(111)
3		41	(220)		16	(111)
4	2.062	10	(111)	1.262	8	(220)
5		14	(111)	2.071	21	(111)
6		20	(111)		10	(111)

Из табл. 2 следует, что средние значения d_{hkl} нанокристаллов ПНА и ДНА, определенные по ПЭМ-изображениям, хорошо согласуются с данными, полученными из анализа их дифракционных спектров. Средние значения d_{hkl} между рядами атомов углерода, а, следовательно, и параметры решетки нанокристаллов ДНА заметно больше, чем у образца нанокристаллитов порошка ПНА. В свою очередь параметры решетки ПНА также заметно превышают структурные параметры решетки крупного кристалла алмаза, что указывает на заметное увеличение d_{hkl} в решетках наноалмазов по сравнению d_{hkl} для массивного кристалла алмаза и экспериментально подтверждает результаты, полученные в работах [3, 4]. Эффект увеличения d_{hkl} наноалмазов, вероятно, вносит определенный вклад в наблюдаемое снижение плотности нанопорошков ПНА и ДНА по сравнению с плотностью крупных кристаллов алмаза [5]. Однако снижение плотности нанопорошков по сравнению с плотностью массивного кристалла алмаза в основном обусловлено наличием оболочек, неизбежно образующихся на поверхности частиц наноалмазов при их получении и имеющих плотность более низкую, чем кристаллическое алмазное ядро частиц нанопорошков [2]. Как видно из рис. 2, нанокристаллы ПНА и ДНА покрыты оболочками (некоторые из них выделены на рисунке черными стрелками), состоящими преимущественно из атомов углерода с sp^2-гибридизацией. Во вставках на рис. 2 *(а, б)* приведены дефекты упаковки алмазных решеток нанокристаллитов. Наиболее характерными дефектами упаковки в нанокристаллитах исходных порошков ПНА и ДНА являются дислокации, вызывающие деформацию их кристаллических решеток. Предварительный анализ ПЭМ-изображений показал, что в нанокристаллитах исходных образцов порошка ДНА дислокации встречаются почти 2 раза чаще, чем в исходных образцах порошка ПНА, что требует более подробного анализа большего количества ПЭМ-изображений.

Таким образом, частицы порошка ПНА, полученного измельчением алмаза природного происхождения, так же, как и частицы порошка детонационного синтеза, состоят из алмазных ядер, имеющих кубические кристаллические решетки, окруженные оболочками со сложными структурами, образованными из атомов углерода в sp^2- и sp^3-состоянии и различных функциональных групп, в основном кислородсодержащих. Методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием методики, позволяющей значительно повысить его разрешение, установлено заметное увеличение межатомных расстояний в нанокристаллах порошка алмазов с уменьшением их размеров по сравнению с таковыми для массивного монокристалла алмаза.

Список литературы

1. Промышленный катализ в лекциях №7/2007/ Под ред. А.С. Носкова. М.: Калвис, 2007. 128 с.
2. Байтингер Е.М., Беленков Е.А., Брежинская М.М., Грешняков В.А. Особенности строения детонационных наноалмазов по результатам электронно-микроскопических исследований // Физика твердого тела. 2012. Т. 54. №8. С. 1606-1623.
3. Яловега Г.Э., Солдатов М.А., Солдатов А.В. Электронная и локальная структура свободных алмазных кластеров как функция размера кластера // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2009. № 7. С. 80–83.
4. Байдакова М.В., Кукушкина Ю.А., Ситникова А.А., Яговкина М.А., Кириленко Д.А., Соколов В.В., Шестаков М.С., Вуль А.Я., Zousman B., Levinson O. Структура наноалмазов, полученных методом лазерного синтеза // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. В. 8. С. 1633–1639.
5. Шарин П.П., Сивцева А.В., Яковлева С.П., Копырин М.М., Кузьмин С.А., Попов В.И., Никифоров Л.А. Сравнение морфологических и структурных характеристик частиц нанопорошков, полученных измельчением природного алмаза и методом детонационного синтеза // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. № 4. С. 55-67. DOI: 10.17073/1997-308X-2019-4-55-67

УДК 661.666.2: 535.37
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-183-186

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ

Акимова М.П.[1], Сивцева А.В.[2], Шарин П.П.[2], Яковлева С.П.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: mar1ya_ak1mova@mail.ru

Аннотация. *Проведено исследование влияния термической обработки на спектры комбинационного рассеяния света (КРС) детонационных наноалмазов в сравнении со спектрами природного наноалмаза. Показано, что отжиг порошка на воздухе при температуре 430–550 °С способствует появлению характерного пика алмаза на частоте 1328 см$^{-1}$ и снижению интенсивности полос низкоупорядоченного углерода. Установлено, что термообработка уменьшает содержание атомов углерода в sp^2-гибридизации и повышает стабильность наночастиц в водных суспензиях.*

Ключевые слова: *детонационные наноалмазы, рамановская спектроскопия, термическая обработка, структура углерода, отжиг.*

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON THE RAMAN SPECTRA OF DETONATION NANODIAMONDS

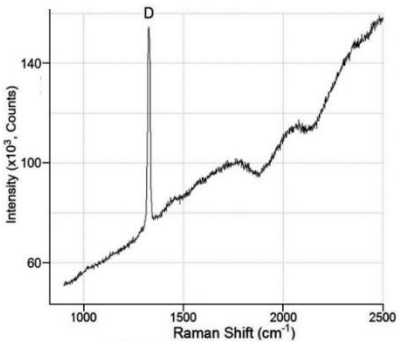
Akimova M.P.[1], Sivtseva A.V.[2], Sharin P.P.[2], Yakovleva S.P.[2]
[1]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS
[2]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS

Abstract. *The effect of thermal treatment on the Raman spectra of detonation nanodiamonds was investigated in comparison with those of natural nanodiamonds. It was found that annealing in air at 430–550 °C leads to the appearance of a distinct diamond peak at 1328 cm^{-1} and a decrease in the intensity of disordered carbon bands. Thermal treatment reduces the fraction of sp^2-hybridized carbon atoms and improves the stability of nanodiamond particles in aqueous suspensions.*

Keywords: *detonation nanodiamonds, Raman spectroscopy, thermal treatment, carbon structure, annealing.*

Спектры комбинационного рассеяния порошков природного (ПНА) и детонационного (ДНА) наноалмаза исследовались с помощью рамановского спектрометра Solar TII, входящим в состав измерительного комплекса ИНТЕГРА СПЕКТРА (ЗАО NT-MDT, Россия, г. Зеленоград). Спектрометр оснащен микроскопом с конфокальным объективом 100x с числовой апертурой NA = 0,7, TV камерой и охлаждаемым (-70°С) CCD детектором. Для возбуждения спектров КР в рамановском спектрометре применяются 3 лазера: газовый He-Ne лазер (Model 31425, Research Electro-Optics Inc, США) с длиной волны излучения 632,8 нм и мощностью до 3,5 мВт, твердотельный лазер с длиной волны 532 нм (производство Integrated Optics Литва) и мощностью в пучке ~3 мВт и твердотельный лазер с длиной волны 473 нм (Cobalt Blues 0473-04-01-0050-300, Швеция), мощностью ~3 мВт.

Для регистрации спектров КР в спектрометре использовали дифракционные решетки с плотностью 600 и 1200 штр./мм. Размер сфокусированного лазерного пучка в рамановском спектрометре составляет 1–1,5 мкм, что позволяет считать собранную информацию статистически репрезентативной для образца наночастиц. Для увеличения отношения сигнал-шум измерения рамановских спектров исследуемых образцов порошков проводили в режиме накопления сигнала (до 100 сек) при комнатной температуре.



а)

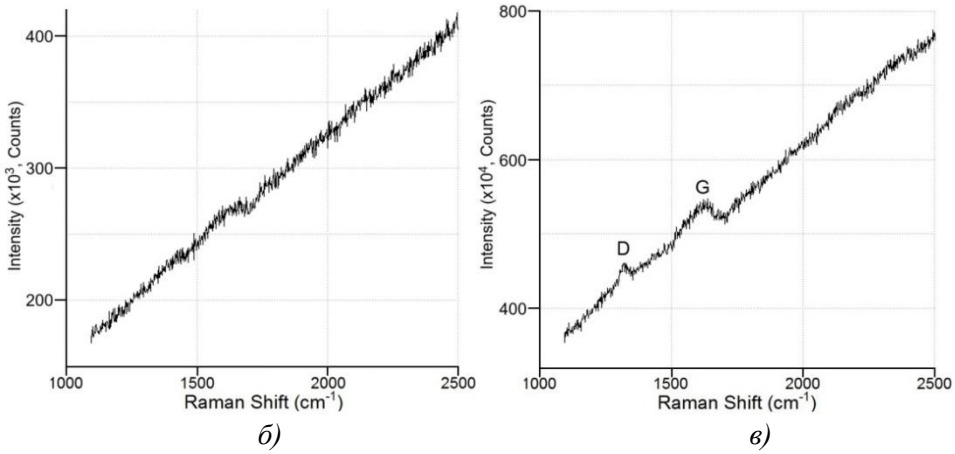


Рис. 1. Типичный рамановский спектр исходного сухого образца порошка ПНА *а)* и типичный спектр сухого образца порошка ДНА до *б)* и после отжига на воздухе *в)*. Длина волны возбуждения рамановского рассеяния 473 нм

Как видно на рис. 1 *(а)*, в рамановском спектре порошка ПНА со средним размером частиц более 20 нм, на фоне фотолюминесценции в рассматриваемом диапазоне частот отчетливо выделяется D-линия алмаза, обусловленная колебаниями атомов углерода в sp^3-состоянии на частоте 1324 $см^{-1}$ и широкая G-полоса графита, которая занимает интервал частот 1400–1700 $см^{-1}$. Тогда как рамановский спектр порошков ДНА, со средним размером частиц менее 5 нм, имеет вид возрастающей кривой, где отсутствуют отчетливые пики и полосы (рис. 1 *(б)*), что обусловлено наличием у кристаллитов ДНА многочисленных дефектов и вакансий различной природы по сравнению с кристаллитами порошка ПНА, приводящие к широкополосной фотолюминесценции, что согласуется с результатами работ [8, 9]. Это затрудняет идентификацию различных аллотропных модификаций углерода по их характерным пикам и полосам. Кроме того, дополнительным фактором, усложняющим регистрацию и идентификацию алмазного и других модификаций углерода по их характерному виду спектра комбинационного рассеяния, является высокое значение сечения комбинационного рассеяния графита, которое почти в 60 раз превышает сечение комбинационного рассеяния алмаза, то есть sp^3- связанного углерода [25, 26]. В связи с упомянутыми трудностями в рамановской спектроскопии для получения спектров с характерными пиками и полосами, по которым производится идентификация аллотропных модификаций в углеродных материалах и наноструктурах (алмаз, графит, графен, нанотрубки, фуллерены и сажа), предложены и применяются различные методики регистрации спектров порошка ДНА. Так для возбуждения спектра комбинационного рассеяния используют лазер с короткой длиной волны, который приводит к увеличению рамановского отклика, но высокоэнергичные фотоны даже при умеренной плотности лазерного излучения могут повредить образец порошка ДНА и изменить его состав из-за лазерного выгорания. Во избежание повреждений, обусловленных интенсивным лазерным пучком, в работе [25] впервые предложено измерения спектра комбинационного рассеяния проводить в воде и с тех пор многие группы исследователей из разных стран используют эту методику для регистрации рамановских спектров.

Как видно из рис. 1 *(в)*, после отжига исходного сухого порошка ДНА на воздухе при температуре выше 430 ^{0}C в течение более 2 часов в рамановском спектре, на фоне полосы низко упорядоченного углерода с sp^2-гибридизацией, обозначаемой в научной литературе, как D-пик графита (от англ. disorder), четко выделяется пик алмаза на частоте около 1328 $см^{-1}$ и широкая G полоса графита. Таким образом, отжиг сухого порошка ДНА на воздухе при температуре ниже его графитизации упрощает и облегчает получение рамановских спектров с характерными пиками и полосами, по которым производится идентификация модификаций углерода без использования различных методик регистрации и обработки спектров.

На рис. 2 представлены скорректированные путем вычитания фотолюминесцентного фона и нормированные на единицу рамановские спектры нанопорошков ПНА и ДНА в исходном состоянии и после отжига на воздухе при температуре 550 °C. Видно, что рамановские спектры образцов нанопорошков ПНА и ДНА в исходном состоянии и после отжига значительно различаются. Так, в рамановском спектре нанопорошка ПНА полоса D, низкоупорядоченного углерода с sp^2-гибридизацией, из которого на частоте 1331 $см^{-1}$ выделяется пик алмаза, обусловленный колебаниями атомов углерода с sp^3-гибридизацией и полоса G графита в интервале частот 1400–1700 $см^{-1}$, после отжига заметно умень-

шились. В спектре нанопорошка ДНА до отжига пик алмаза практически не выделяется на фоне интенсивной полосы D низкоупорядоченного углерода в sp^3 состоянии, тогда как после отжига пик алмаза четко выделяется на частоте 1328 $см^{-2}$. Эти изменения в спектрах указывают на то, что в процессе отжига на воздухе доли атомов неалмазного углерода с sp^2-гибридизациями в результате их окисления кислородом воздуха заметно снизились. В работах [27, 28] показано, что при отжиге на воздухе порошка ДНА при температурах 440–600 °С до потери массы порошка на 5,0–85,0 % не менее чем 1,5 раза повышает сендиментационную устойчивость суспензий в воде, этиловом спирте и других растворителях по сравнению с суспензиями наночастиц алмаза, полученными другими способами.

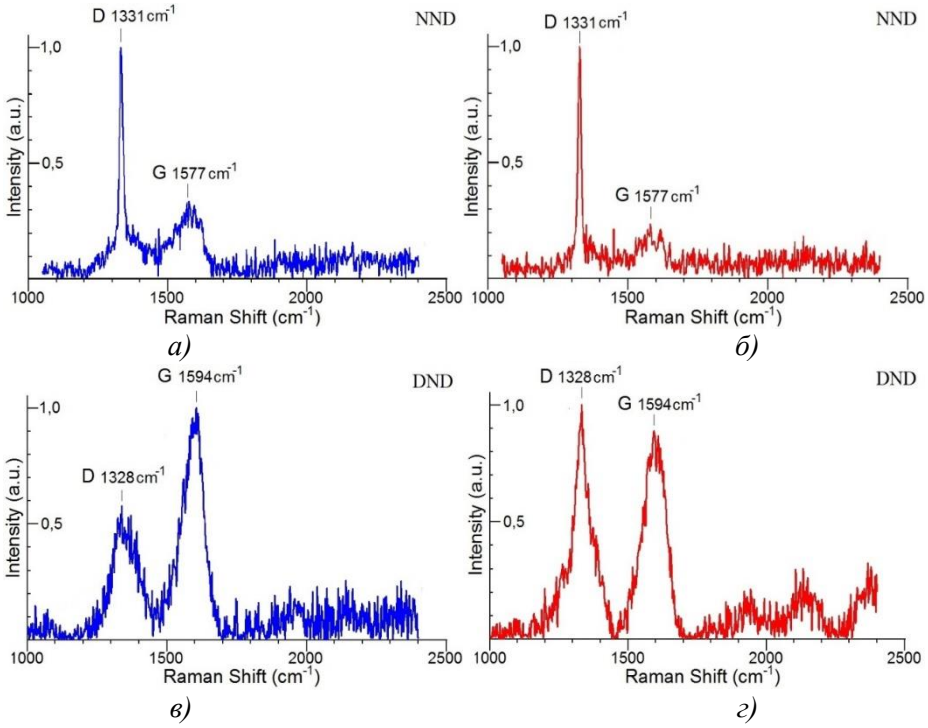
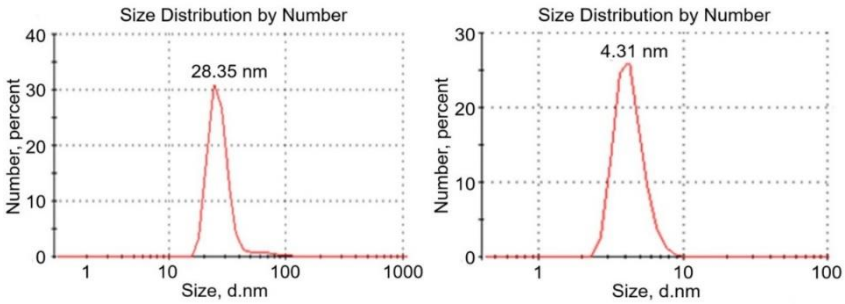


Рис. 2. Рамановские спектры нанопорошков ПНА и ДНА в исходном состоянии *(а, в)* и после отжига на воздухе при температуре 550 °С *(б, г)*, соответственно

На рис. 3 приведены графики распределения наночастиц порошков ПНА *(а)* и ДНА *(б)* после их отжига на воздухе при температуре 430 °С в течение 2 часов. Эти графики распределения наночастиц получены методом динамического рассеяния света пучка гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм на приборе Malvern Zetasizer Nano.

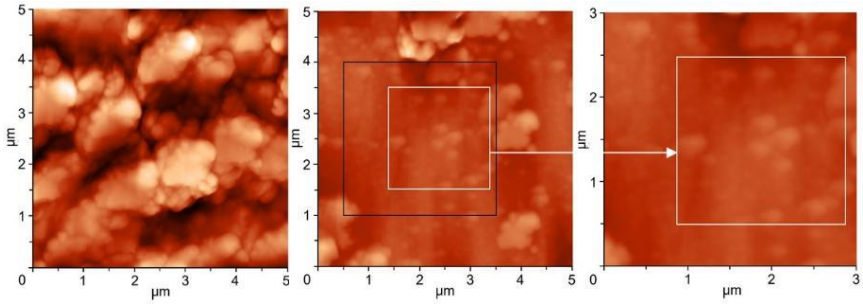


(а) *(б)*

Рис. 3. Графики распределения наночастиц порошков ПНА *а)* и ДНА *б)* после их отжига на воздухе, измеренные в водной суспензии методом динамического рассеяния света

Обычно наночастицы порошка ДНА из-за их высокой удельной поверхности и высокой поверхностной активности оболочек склонны к агломерации в воде и других органических жидкостях и подвержены к образованию агломератов, как это показано на рис. 4 *(а)*. При этом увеличение размера агломератов до микрона и выше приводит к их сендиментации в жидкой среде: дистиллированной воде, спирте и т. п. После отжига порошка ДНА на воздухе его частицы в водной среде становятся сендиментационно устойчивыми в водяной суспензии, теряют склонность к образованию агломератов на что

указывают относительно узкие распределения наночастиц по размерам и АСМ-изображения наночастиц ДНА (рис. 3 и рис. 4).



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Изображения наночастиц порошка ДНА, полученные при помощи атомно-силового микроскопа: агломераты, образованные из наночастиц исходного порошка ДНА *а),* наночастицы исходного порошка ДНА после отжига на воздухе *б)* и увеличенный фрагмент, выделенного черным квадратом участка *в)*

Динамическое рассеяние света, используемое для измерения размера частиц порошков, не может дать надежных данных из-за склонности наночастиц к агломерации. В этом случае измеряется размер агломератов, а не отдельных кристаллитов. Высокоразрешающая ПЭМ (HRTEM) способна определить фактический размер кристаллитов, но требует больших затрат и не обладает статистической надежностью из-за подсчета ограниченного количества частиц. Рентгеновская дифракция позволяет определить размеры кристаллитов с использованием уравнения Шеррера, однако она может быть неточной для образцов, содержащих как большие, так и мелкие кристаллы.

Список литературы

1. Osswald S., Yuchin G., Mochalin V., Kucheyev S.O., Gogotsi Y. (2006) Control of sp^2/sp^3 carbon ratio and surface chemistry of nanodiamond powders by selective oxidation in air. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 128, no. 35, pp. 11635–11642. DOI: 10.1021/ja063303n.
2. Stehlik S., Varga M., Ledinsky M., Jirasek V., Artemenko A., Kozak H, Ondic L., Skakalova V., Argentero G., Pennycook T., Meyer J.C., Fejfar A., Kromka A., Rezek B. (2015) Size and purity control of HPHT nanodiamonds down to 1 nm. Journal of Physical Chemistry C, vol. 119, no. 49, pp. 27708-27720. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05259
3. Wang G., Wan G., Hao C. (2009) Structure and magnetic properties of carbon-encapsulated Fe nanoparticles obtained by a modified arc plasma method. *Modern Physics Letters B*, vol. 23, no. 17, pp. 2149-2153. DOI: 10.1142/S0217984909020291
4. Zhang Z., Zhou F., Laverina E.J. (2003) On the analysis of grain size in bulk nanocrystalline materials via x-ray diffraction. *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 34, no. 6, pp. 1349-1355. DOI: 10.1007/s11661-003-0246-2
5. Gordeev S.K., Korchagina S.B. (2007) On the stability of small-sized nanodiamonds. *Journal of Superhard Materials,* vol. 29, no. 2, pp. 124-125. DOI: 10.3103/S1063457607020098
6. Гордеев С.К., Корчагина С.Б. Способ подготовки порошков наноалмаза для получения устойчивых суспензий. Патент РФ №2302994, опубликовано 20.07.2007, бюл. №20.

УДК 544.4:661.666.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-187-191

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СОСТАВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГРУПП ДЕТОНАЦИОННЫХ И ПРИРОДНЫХ НАНОАЛМАЗОВ

Акимова М.П.[1], Сивцева А.В.[2], Шарин П.П.[2], Яковлева С.П.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: mar1ya_ak1mova@mail.ru

Аннотация. *Исследовано влияние термической обработки на состав функциональных групп детонационных и природных наноалмазов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Показано, что при отжиге на воздухе при температурах 400–550 °С происходит уменьшение доли атомов углерода в sp^2-гибридизации и увеличение содержания sp^3-компоненты. Установлено изменение распределения кислородсодержащих и азотсодержащих функциональных групп, что связано с процессами окисления и перестройки химических связей на поверхности наночастиц.*

Ключевые слова: *наноалмазы, термическая обработка, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, функциональные группы, структура поверхности, sp^2/sp^3-состояния.*

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON THE COMPOSITION OF FUNCTIONAL GROUPS IN DETONATION AND NATURAL NANODIAMONDS

Akimova M.P.[1], Sivtseva A.V.[2], Sharin P.P.[2], Yakovleva S.P.[2]
[1]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS
[2]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS

Abstract. *The effect of thermal treatment on the composition of functional groups in detonation and natural nanodiamonds was studied using X-ray photoelectron spectroscopy. It was shown that annealing in air at 400–550 °C leads to a decrease in the fraction of sp^2-hybridized carbon atoms and an increase in the sp^3 component. Changes in oxygen- and nitrogen-containing functional groups were revealed, indicating oxidation processes and restructuring of surface chemical bonds in nanodiamond particles.*

Keyword: *nanodiamonds, thermal treatment, X-ray photoelectron spectroscopy, functional groups, surface structure, sp^2/sp^3 states.*

Метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии является одним из мощных инструментов для исследования элементного состава и химического состояния компонентов мелкодисперсных углеродных материалов по химическим сдвигам фотоэлектронных линий, которые обусловлены различием в молекулярном окружении атомов [1]. Измерения проводились на фотоэлектронном спектрометре SPECS (Германия) с использованием полусферического анализатора PHOIBOS-150-MCD-9 и рентгеновского монохроматора FOCUS-500 (излучение AlK_α, $h\nu$ = 1486,74 эВ, 200 Вт). Шкала энергий связи ($E_{св}$) была предварительно откалибрована по положению пиков остовных уровней $Au4f_{7/2}$ (84,00 эВ) и $Cu2p_{3/2}$ (932,67 эВ). Образцы в виде нанодисперсного порошка наносились на двухсторонний медный проводящий скотч 3M (США).

Обзорные спектры записывались при энергии пропускания анализатора – 50 эВ, отдельные спектральные районы – 20 эВ. Определение относительного содержания элементов на поверхности образцов и их атомные отношения осуществлялось по интегральным интенсивностям фотоэлектронных линий, откорректированных на соответствующие коэффициенты атомной чувствительности [2].

На рис. 1 приведены обзорные рентгеновские фотоэлектронные спектры образцов порошков природного наноалмаза (ПНА) и детонационного наноалмаза (ДНА) до (а, в) и после отжига при температуре 550 °С *(б, г)*, из которых следует, что в образцах спектров исходных образцов обоих нанопорошков присутствуют линии, характерные для углерода (C1s и C KVV), кислорода (O1s и O KLL).

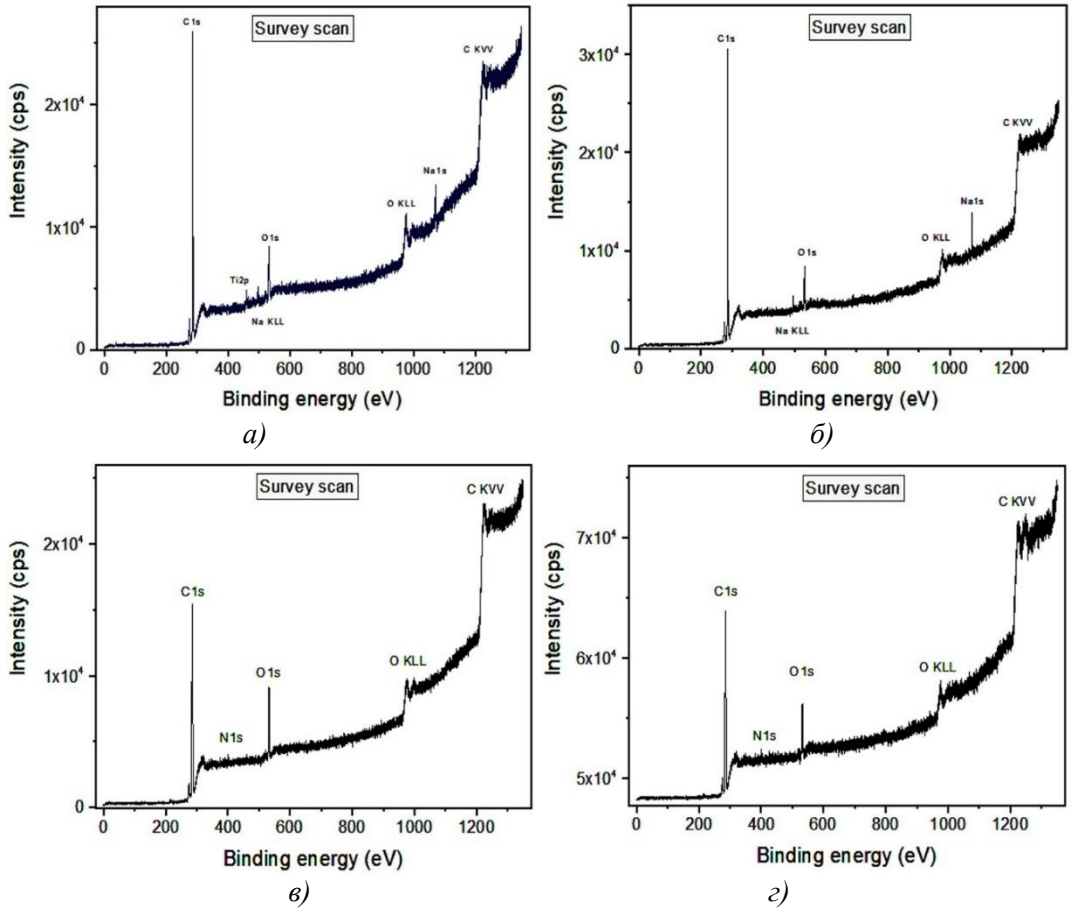


Рис. 1. Обзорные спектры ПНА и ДНА до *(а, в)* и после отжига *(в, г)* при температуре 550 °С, соответственно

В спектре образца ДНА помимо указанных линий проявляется линия азота (N1s), а спектр образца ПНА содержит слабые линии титана и натрия. Других элементов в исследованных образцах нанопорошков в пределах чувствительности метода РФЭС не обнаружены. Фотоэлектронные спектры образцов ПНА и ДНА, подвергнутых отжигу на воздухе при температуре 550 °С, содержат те же линии, что соответствующие исходные образцы нанопорошков.

В табл.1 приведены результаты измерений относительного содержание элементов (C, O и N) в образцах нанопорошков ДНА и ПНА и их соотношения. Относительное содержание элементов в образцах нанопорошков и их атомные отношения определялись по интегральным интенсивностям фотоэлектронных линий, откорректированных на соответствующие коэффициенты атомной чувствительности [2]. Как видно из табл.1, соотношение количества атомов кислорода и атомов углерода для частиц нанопорошков ПНА и ДНА незначительно отличаются. Для детального анализа остовные линии углерода C1s, кислорода O1s и азота N1s были разложены на отдельные спектральные компоненты.

Таблица 1. Относительное содержание элементов в образцах ПНА и ДНА и атомные отношения элементов к углероду

Элемент	ПНА				ДНА			
	Исх.	400°С	500°С	550°С	Исх.	400°С	500°С	550°С
C	90,6	90,8	91,2	90,8	89,4	89,0	89,4	90,6
O	9,4	9,2	8,8	9,2	9,1	9,5	9,0	7,8
N	-	-	-	-	1,5	1,5	1,6	1,6
O/C	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,09
N/C	-	-	-	-	0,02	0,02	0,02	0,02

На рис. 2 приведен спектр углерода C1s для образцов ПНА и ДНА до и после их отжига на воздухе при температуре 550 °С, из которого следует линии углерода C1s обоих образцов нанопорошков состоят из отдельных спектральных компонент, указывающих, что в образцах углерод находится в четырех различных химических состояниях. Анализ значений энергии связи отдельных компонент в

спектрах C1s обоих образцов ДНА и ПНА позволяет заключить, что наиболее интенсивные пики со значениями энергии связи 285,3±0,2 эВ соответствуют sp^3-гибридизированному углероду, образующему алмазную кристаллическую решетку [3–5].

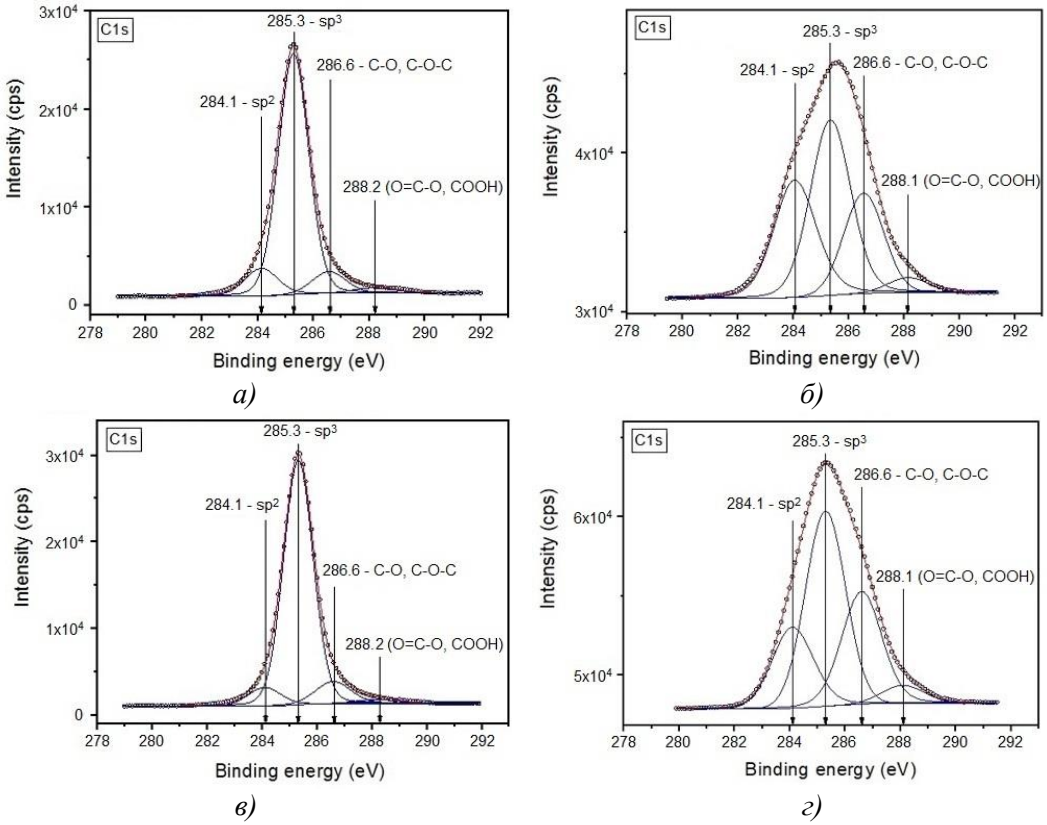


Рис. 2. Спектры остовного углерода C1s образцов ПНА и ДНА, соответственно до *(а, б)* и после отжига на воздухе *(в, г)* температуре 550 °С

Энергии связи пиков 284,1±0,1 эВ характерны для атомов углерода в sp^2-состоянии (графитоподобном) [4, 5]. Пики с энергиями связи 286,6 эВ соответствуют атомам углерода в составе гидроксильных и простых эфирных групп (С–ОН, С–О–С), Наименее интенсивные линии с энергиями связи 287,9±0,3 эВ характеризуют состояния атомов углерода в составе карбоксильных групп (О=С–О, СООН).

В табл. 2 приведены относительные вклады каждого состояния атомов углерода в суммарный спектр C1s и соотношение sp^2/sp^3 для исследуемых образцов, из которых следует, что в исходном образце нанопорошка ПНА около 79,2% атомов углерода от их общего количества находятся в sp^3-состоянии, а около 10,6 % атомов от их общего количества соответствуют состоянию графитоподобного углерода с sp^2-гибридизацией, а остальные атомы углерода находятся в составе гидроксильных (или эфирных) (~8,0 %) и карбоксильных (~2,2 %) групп, Тогда как в исходном же образце нанопорошка ДНА около 33,2 % атомов углерода от их общего количества находятся в (графитоподобном) состоянии с sp^2-гибридизацией, атомам углерода в состоянии sp^3-гибридизации соответствуют ~39,8 %, а остальные атомы углерода пребывают в составе гидроксильных (или эфирных) (~24,8 %) и карбоксильных (~2,2 %) групп,

Таблица 2. Вклад состояний углерода в % в суммарный спектр C1s в образцах ПНА и ДНА до и после отжига на воздухе при разных значениях температуры

t, °C	ПНА					ДНА				
	sp^2	sp^3	С–О, С–О–С	СООН	sp^2/sp^3	sp^2	sp^3	С–О, С–О–С	СООН	sp^2/sp^3
Исх,	10,6	79,2	8,0	2,2	0,13	33,2	39,8	24,8	2,2	0,83
400	10,1	78,9	8,5	2,5	0,13	31,7	38,9	25,1	4,3	0,81
500	8,2	81,5	8,4	1,9	0,10	29,8	42,8	23,2	4,2	0,70
550	7,1	82,1	9,1	1,7	0,09	21,4	46,5	27,8	4,3	0,46

Из табл. 2 также следует, что по мере увеличения температуры и времени отжига на воздухе содержание атомов неалмазного углерода с sp^2-гибридизацией в образцах как ПНА, так и ДНА постепенно уменьшается в результате окисления кислородом воздуха, а доля атомов углерода с sp^3-гибридизацией увеличивается.

На рис. 3 представлены спектры кислорода O1s образцов нанопорошков, измеренных до и после их отжига на воздухе. Видно, что в спектрах O1s образцов ДНА и ПНА присутствуют различные кислородсодержащие функциональные группы, которые обычно локализуются на поверхности углеродных материалов, в том числе нанопорошков алмаза. Согласно литературным данным, в области значений энергии связи ~531,3–531,5 эВ находятся пики от атомов кислорода в составе карбонильных групп кетонов, альдегидов и хинонов. Энергия связи 532,6 эВ характеризует пик кислорода в составе фенольных и гидроксильных групп, а также карбонильного кислорода в сложных эфирах и карбоксильных ангидридах [5].

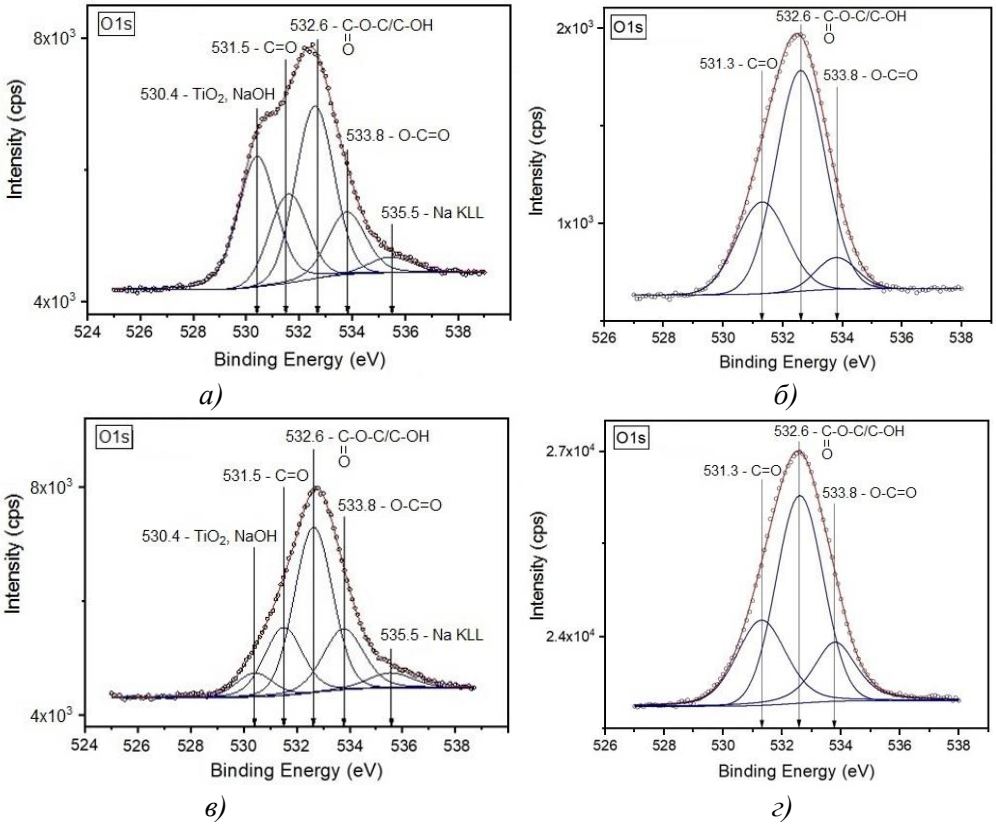


Рис. 3. Спектры остовного кислорода O1s образцов ПНА и ДНА, соответственно до *(а, б)* и после отжига на воздухе *(в, г)* температуре 550 °С

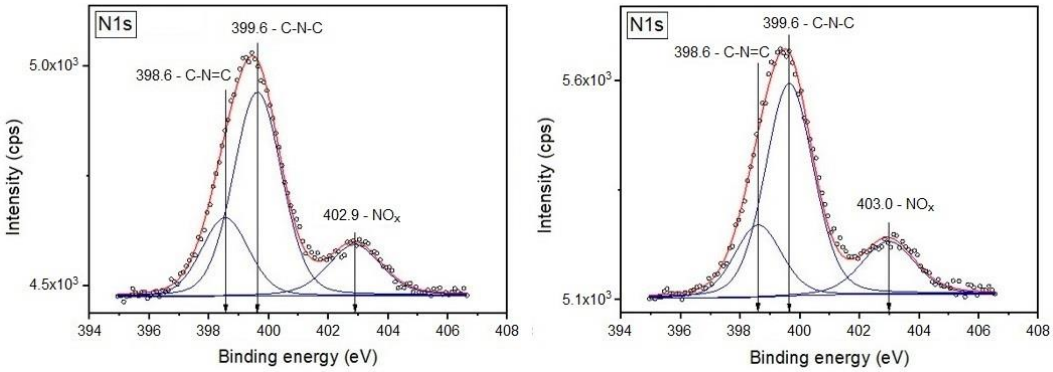
Пики кислорода с энергией связи 533,8 эВ соответствуют некарбонильному атому кислорода в сложных эфирах или ангидридах и карбоксильной группе. Пики кислорода с энергией связи 530 эВ можно приписать к кислороду в составе неорганических соединений [5, 6]. В табл. 3 приведены относительные вклады разных состояний атомов кислорода в суммарный спектр O1s во всех измеренных образцах ПНА и ДНА.

Таблица 3. Вклад состояний атомов кислорода в %, в суммарный спектр O1s

t, °С	ПНА				ДНА			
	O=C–O–C, –C–OH	–C=O	–O–C=O	NaOH + TiO_2	O=C–O–C, –C–OH	–C=O	–O–C=O	NaOH + TiO_2
Исх,	36,7	18,6	14,2	30,5	64,6	27,7	7,7	–
400	46,8	21,6	16,7	14,9	58,6	31,0	10,4	–
500	49,3	21,9	16,6	12,2	57,6	29,4	12,9	–
550	49,9	21,7	21,1	7,3	55,2	27,0	17,8	–

Из табл. 3 следует, что, по сравнению с исходным состоянием, в образцах ПНА, прошедших отжиг на воздухе, заметна тенденция к увеличению доли атомов кислорода в составе сложноэфирных, карбонильных и карбоксильных функциональных групп. В образцах ДНА, прошедших отжиг на воздухе, доля атомов кислорода гидроксильной и карбонильной групп в составе сложноэфирных, ангидридных и карбоксильных групп несколько снижается по сравнению с исходным образцом. Заметно, также некоторое повышение доли атомов кислорода некарбонильной группы только в составе карбоксильных, ангидридных и сложноэфирных групп.

На рис. 4 приведены спектры азота N1s образцов нанопорошка ДНА, измеренные до и после отжига на воздухе при температуре 550 °С. Анализ значений энергий связи спектральных компонент представленных в спектре N1s позволяет предположить, что азот на поверхности находится в составе следующих функциональных групп: 398,6 эВ – C-N=C и 399,6 эВ – C-N-C. Пик со значением энергии связи 402,8±0,1 эВ может принадлежать окисленному азоту (NO_x). Вклад состояний азота в спектрах N1s изученных образцов представлен в табл. 4.



а) *б)*

Рис. 4 Остовные линии азота N1s образцов нанопорошка ДНА до отжига *а)* и после отжига на воздухе при температуре 550 °С *б)*

Таблица 4. Вклады состояний атомов азота в суммарный спектр N1s при различных температурах отжига на воздухе

Химическое состояние азота	ДНА			
	Исх.	400°С	500°С	550°С
C-N=C	27,3	25,2	22,3	21,3
C-N-C	55,6	57,5	60,4	61,3
NO_x	17,1	17,3	17,3	17,4

Список литературы

1. Grosh P.K. Introduction to photoelectron spectroscopy. New York: Wiley-Interscience Publishers, 1983.
2. Scofield J.H. Hartree–Slater subshell photoionization cross-sections at 1254 and 1487 eV. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 1976, vol. 8, pp. 129–137.
3. Stehlik S., Varga M., Ledinsky M., Jirasek V., Artemenko A., Kozak H., Ondic L., Skakalova V., Argentero G., Pennycook T., Meyer J.C., Fejfar A., Kromka A., Rezek B. Size and purity control of HPHT nanodiamonds down to 1 nm. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, vol. 119, no. 49, pp. 27708–27720. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05259
4. Алексенский А.Е., Осипов В.Ю., Вуль А.Я., Бер Б.Я., Смирнов А.Б. Оптические свойства слоев наноалмазов. *Физика твердого тела*, 2001, т. 43, № 1, с. 140–145.
5. Qi M., Xiao J., Cheng Y., Wang Zh., Jiang A., Guo Y., Tao Z. Effect of various nitrogen flow ratios on the optical properties of (Hf:N)-DLC films prepared by reactive magnetron sputtering. *AIP Advances*, 2017, vol. 7, p. 085012.
6. Araùjo M.P., Soares O.S.G.P., Fernandes A.J.S., Pereira M.F.R., Freire C. Tuning the surface chemistry of graphene flakes: new strategies for selective oxidation. *RSC Advances*, 2017, no. 7, p. 14290. DOI: 10.1039/c6ra28868e

УДК 543.429.23:661.666.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-192-195

ЯДЕРНАЯ МАГНИТНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ И ПРИРОДНЫХ НАНОАЛМАЗОВ ДО И ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Акимова М.П.[1], Сивцева А.В.[2], Шарин П.П.[2], Корякина В.В.[3], Яковлева С.П.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[3]Институт естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова
E-mail: mar1ya_ak1mova@mail.ru

Аннотация. *Проведено исследование детонационных и природных наноалмазов методом ядерной магнитной резонансной (ЯМР) спектроскопии до и после термической обработки. Показано, что в спектрах ЯМР исходных образцов присутствуют сигналы от sp^3- и sp^2-гибридизированных атомов углерода, соответствующих алмазному ядру и неупорядоченной углеродной оболочке. Термообработка при 550 °C приводит к уменьшению доли неалмазного sp^2-углерода и изменению состава функциональных групп на поверхности частиц. Результаты подтверждают эффективность термической очистки наноалмазов.*

Ключевые слова: *наноалмазы, ядерный магнитный резонанс, спектроскопия, термообработка, структура углерода, sp^2/sp^3-гибридизация.*

NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY OF DETONATION AND NATURAL NANODIAMONDS BEFORE AND AFTER THERMAL TREATMENT

Akimova M.P.[1], Sivtseva A.V.[2], Sharin P.P.[2], Koryakina V.V.[3], Yakovleva S.P.[2]
[1]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS
[2]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS
[3]M.K. Ammosov NEFU Institute of Natural Sciences

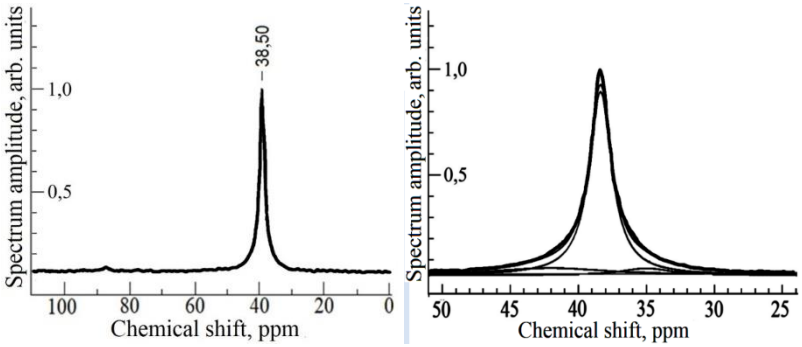
Abstract. *The detonation and natural nanodiamonds were investigated using nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy before and after thermal treatment. The NMR spectra of the initial samples revealed signals from sp^3- and sp^2-hybridized carbon atoms corresponding to the diamond core and disordered carbon shell. Thermal annealing at 550 °C leads to a decrease in non-diamond sp^2 carbon and changes in the surface functional groups. The results confirm the effectiveness of thermal purification of nanodiamonds.*

Keywords: *nanodiamonds, nuclear magnetic resonance, spectroscopy, thermal treatment, carbon structure, sp^2/sp^3 hybridization.*

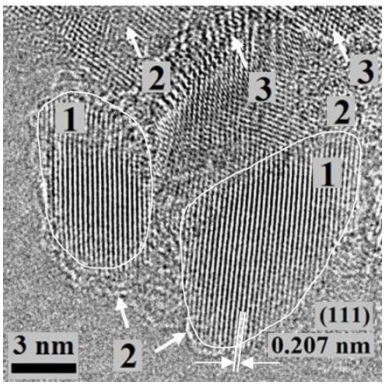
Широкие возможности для изучения наноалмаза предоставляет метод ядерной магнитной резонансной (ЯМР) спектроскопии [1–3], которая является одним из наиболее информативных эффективных методов исследования состава, структуры и химического состояния углеродсодержащих материалов на атомно-молекулярном уровне. Химический сдвиг является одной из основных характеристик спектров ЯМР и зависит от химического окружения атома и природы химической связи, то есть атомы углерода, принадлежащие к разным атомным и молекулярным группам, имеют разный химический сдвиг и могут быть идентифицированы в спектре ЯМР. В спектрах ЯМР химический сдвиг измеряется относительно положения резонансной линии некоторого эталонного вещества. В случае ядер магнитно-активного изотопа углерода ^{13}C таким эталоном является углерод в тетраметилсилане $(CH_3)_4Si$ (TMS), химический сдвиг которого принимается равным 0 ppm при любой температуре.

На рис. 1 приведен типичный спектр ЯМР ^{13}C MAS исходного порошка природного наноалмаза (ПНА) и его разложение на спектральные компоненты, а также ПЭМ-изображение высокого разрешения первичных частиц порошка ПНА до отжига на воздухе. Видно, что форма линии спектра ЯМР ^{13}C MAS исходного порошка ПНА представляет собой практически симметричную кривую с химическим сдвигом 38,50 ppm. Эту линию можно разложить на несколько спектральных компонент: узкий пик с химическим сдвигом ~38,5 ppm, соответствующий алмазному углероду с sp^3-гибридизацией, на едва заметный по высоте относительно широкую полосу с химическим сдвигом в интервале 33–36 ppm, который можно отнести к sp^2-гибридизированному углероду, локализованному в дефектной или неупорядоченной решетке. Содержание sp^2-углерода незначительно, на что указывает слабая интенсивность

линии. Далее следует широкая, едва заметная по высоте спектральная компонента с химическим сдвигом в интервале 37–46 ppm, обусловленная участием атомов углерода в хаотично локализованной оболочке, окружающей поверхность ядра наноалмаза. Относительно слабая интенсивность сигнала ЯМР в этом случае указывает на низкое по сравнению содержание sp^2-углерода в оболочке, окружающей алмазное ядро ПНА, что также свидетельствует о низкой доле различных функциональных групп в наноалмазах природного происхождения.



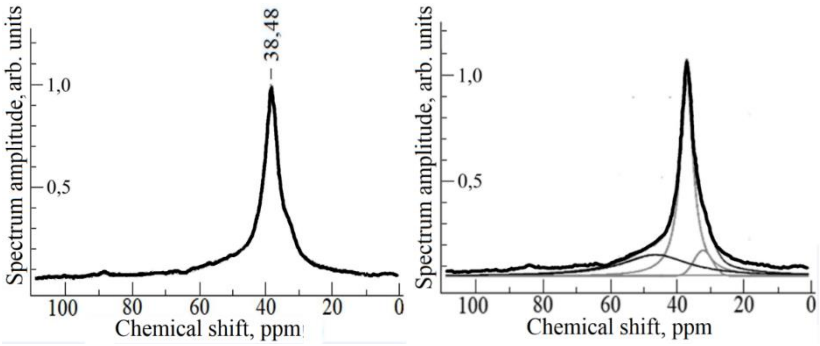
а) *б)*



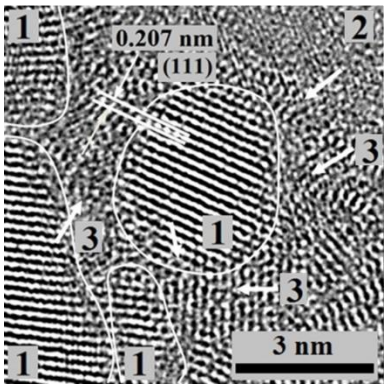
в)

Рис. 1. Спектр ЯМР ^{13}C MAS высокого разрешения исходного порошка ПНА *а)*, его разложение на компоненты *б)* и ПЭМ-изображение первичных частиц ПНА до термической обработки *в)*. Цифрами обозначены: 1 – наноалмаз (алмазное кристаллическое ядро и оболочка на основе sp^2-углерода; 2 – частицы аморфного и графитоподобного sp^2-углерода, 3 – частицы (фрагменты) неупорядоченного углерода в sp^3- гибридизации

На рис. 2 приведен спектр ЯМР высокого разрешения образца порошка наноалмаза детонационного синтеза (ДНА), его разложения на спектральные компоненты и изображение частиц порошка ДНА, полученное высокоразрешающим просвечивающим электронным микроскопом. Как следует из рисунка 15 *а)*, форма линии спектра ЯМР ^{13}C MAS образца наноалмаза детонационного синтеза при комнатной температуре имеет выраженную асимметрию в сторону высоких частот. Химический сдвиг пика линии составляет ~38,48 ppm. Линия имеет уширение, обусловленное диполь – дипольным взаимодействием. Эта линия может быть разложена на несколько спектральных компонентов (рис. 2 *б)*): на относительно узкий пик, химический сдвиг которого практически совпадает с центром ассиметричной линии, соответствующий алмазу (кристаллическое ядро наноалмаза) [1, 2]. Далее следует компонента с менее интенсивным пиком с химическим сдвигом ~30,3 ppm, меньшим, чем первый интенсивный пик, который также можно отнести к алмазному sp^3-углероду, имеющему нарушения тетрагональной sp^3-конфигурации из-за различных дефектов и деформации решетки. Широкая линия с химическим сдвигом в интервале между ~ 40 и 80 ppm обусловлена атомами углерода с sp^2-гибридизацией оболочки, покрывающей поверхность ядра наноалмаза [2].



а) *б)*



в)

Рис. 2. Спектр ЯМР ^{13}C MAS высокого разрешения исходного порошка ДНА *а)*, его разложение на компоненты *б)* и ПЭМ-изображение первичных частиц ДНА до отжига на воздухе *в)*. Цифрами обозначены: 1 – наноалмаз (алмазное кристаллическое ядро и оболочка на основе sp^2-углерода; 2 – частицы аморфного и графитоподобного sp^2-углерода, 3 – частицы (фрагменты) неупорядоченного углерода в sp^3- гибридизации

На ПЭМ-изображении на рис. 2 *в)* помимо первичных частиц наноалмаза видны частицы неалмазного углерода с sp^2-гибридизацией и разупорядоченные фрагменты атомов алмазного углерода с sp^3-гибридизацией. Неупорядоченные частицы sp^2-углерода, окружающие алмазные ядра, по мнению авторов [2], скрепляют наночастицы в агломераты, двойными связями C−C. Также на ПЭМ-изображении ДНА видны частицы (фрагменты) sp^3-углерода, имеющие нарушения тетрагональной конфигурации и скрепленные между собой и частицами sp^2-связанного углерода.

Часть атомов углерода, содержащихся в оболочке наноалмаза, образует различные функциональные (углеводородные и кислородсодержащие) группы [2, 3]. Состав функциональных групп неупорядоченной оболочки первичных частиц наноалмаза варьируется от образца к образцу, что отражается в спектре ЯМР в области 40-80 ppm в зависимости от химических реагентов, использованных при очистке нанопорошков, и от условий их обработки [4].

Данные по структуре ДНА, полученные нами методом ЯМР спектроскопии, удовлетворительно согласуются с результатами работ [4, 5]. В этих работах первичная частица наноалмаза ДНА моделируется алмазным ядром, содержащим различные дефекты кристаллической решетки, обусловленные неравновесными условиями синтеза, переходным слоем из sp^3/sp^2-связанных атомов углерода и поверхностной оболочкой, покрывающей ядро и состоящей из неупорядоченных форм углерода с sp^2-гибридизацией и различных поверхностных функциональных групп. Химический сдвиг наноалмаза детонационного синтеза достаточно широк, простирается от 20 до 85 ppm и имеет асимметричное широкое высокочастотное крыло в пределах от 40 до 85 ppm В работах [2, 3, 6] показано, что основная полоса с центром химического сдвига около 37–39 ppm обусловлена ядром наноалмаза, тогда как асимметричное широкое крыло – результат проявления неупорядоченных слоев оболочки, близких к поверхности.

На рис. 3 приведены спектры ЯМР ^{13}C MAS высокого разрешения с разложением на компоненты, зарегистрированные от образцов порошков природного *а)* и детонационного *б)* наноалмазов после их отжига в атмосфере воздуха при 550°C. В процессе термообработки на воздухе при температуре 550 °C.

Из нанопорошка алмаза в результате окисления кислородом воздуха удаляется аморфный и графитоподобный углерод в sp^2/sp^3-гибридизации и меняется состав функциональных групп [7]. Аналогичные изменения наблюдаются в компонентах спектра ЯМР ^{13}C MAS образца термообработанного

нанопорошка из природного алмаза за исключением исчезновения слабого пика в спектре линии ЯМР ^{13}C MAS исходного ПНА, обусловленного присутствием некоторого количества атомов неупорядоченного sp^3-углерода, что указывает на удаление таких атомов в процессе окисления кислородом воздуха. Указанные изменения так же отражаются в компонентах линии спектра ЯМР ^{13}C MAS наноалмаза детонационного синтеза в виде увеличения ширины пиков от неупорядоченного sp^3-углерода и неалмазного sp^2-углерода в оболочке наноалмаза, содержащей различные функциональные группы.

На ПЭМ-изображениях наноалмазов обоих типов (рис. 3 *(в, г)*) наблюдается заметное уменьшение количества как частиц неалмазного sp^2-углерода, так и неупорядоченных частиц алмазного углерода с sp^3-гибридизацией по сравнению с наноалмазами в исходном состоянии до их отжига на воздухе (рис. 1 *в)* и 2 *в)*).

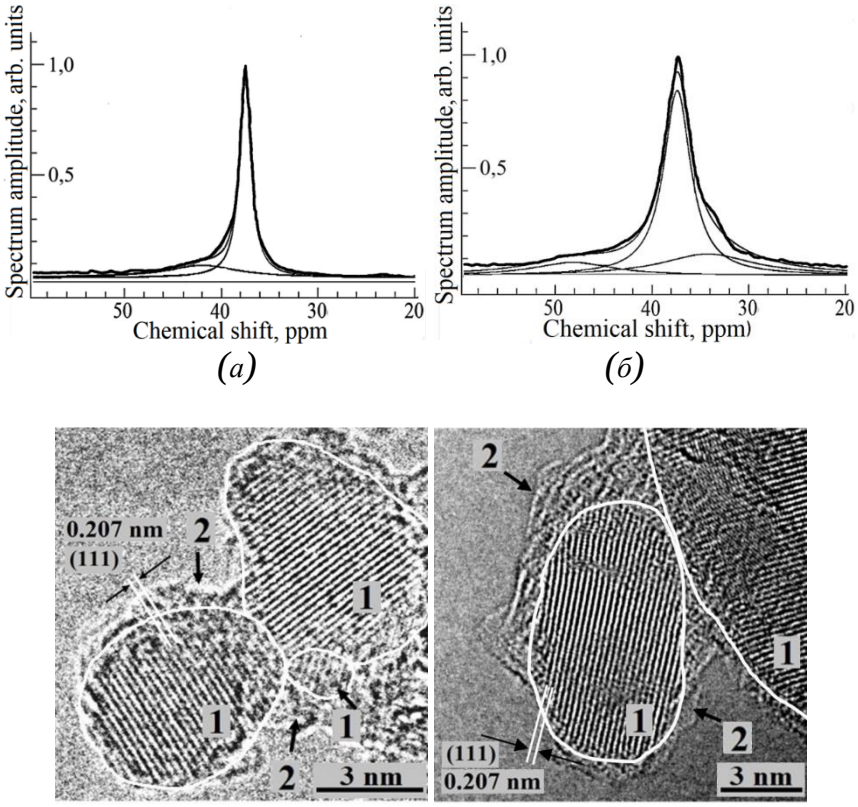


Рис. 3. Линии спектров ЯМР ^{13}C MAS высокого разрешения с их разложением на компоненты, зарегистрированные от ПНА *а)* и ДНА *б)* и их ПЭМ-изображения *(в, г)* после термической обработки, соответственно. Цифрами обозначены: 1 – наноалмаз (алмазное кристаллическое ядро и оболочка на основе sp^2-углерода; 2 – частицы аморфного и графитоподобного sp^2-углерода

Список литературы

1. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М: МГУ, 2012. 55 с.
2. Panich A.M. (2007) Solid-state nuclear magnetic resonance studies of nanocarbons. *Diamond and Related Materials*, vol. 16, no. 12, pp. 2044–2049. DOI: 10.1016/j.diamond.2007.07.014
3. Panich A.M., Shames A.I. (2015) Comment on “Quantification of C=C and C=O Surface carbons in detonation nanodiamond by NMR”. *Journal of Physical Chemistry Society*, vol. 119, no. 36, pp. 21286–21287. DOI: https://doi.org/10.1021/jp5125074
4. Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 7. С. 687–708. DOI: 10.1070/RC2001v070n07ABEH000634
5. Алексенский А.Е., Осипов В.Ю., Вуль А.Я., Бер Б.Я., Смирнов А.Б. Оптические свойства слоев наноалмазов // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. № 1. С. 140–145. DOI: 10.1134/1.1380449.
6. Stehlik S., Varga M., Ledinsky M., Jirasek V., Artemenko A., Kozak H., Ondic L., Skakalova V., Argentero G., Pennycook T., Meyer J.C., Fejfar A., Kromka A., Rezek B. (2015) Size and purity control of HPHT nanodiamonds down to 1 nm. *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no. 49, pp. 27708–27720. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05259
7. Fang X.W., Mao J.D., Levin E.M., Schmidt-Rohr K. (2009) Nonaromatic core–shell structure of nanodiamond from solid-state NMR spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 113, pp. 1426–1435. DOI: 10.1021/ja8054063

УДК 691.335
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-196-201

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРОБЕТОНА ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Андреева А.В.[1], Саввинова М.Е.[2], Николаева Л.А.[3], Буренина О.Н.[4]
Институт проблем нефти и газа СО РАН

***Аннотация**. В данной статье представлены результаты структурных исследований серобетонных образцов на основе местного минерального сырья. Установлено, что для производства серобетонов повышенной прочности могут быть использованы тонкодисперсные наполнители с высокой удельной поверхностью, обеспечивающие заполнение поровых полостей серного вяжущего, обуславливая увеличение физико-механических свйоств, но и образование более высоких адгезионных связей серного вяжущего с поверхностью заполнителя.*

***Ключевые слова:** серобетонные образцы, структурные исследования, удельная поверхность, дифрактограмма, спектральный анализ, спектроскопический анализ.*

STRUCTURAL STUDIES OF LOCAL MINERAL CONCRETE ON SULFUR BINDER

A V Andreeva[1], M E Savvinova[2], L A Nikolaeva[3], O N Burenina[4]
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

***Abstract**. This article presents the results of structural studies of concrete on sulfur binder samples based on local minerals. It has been found that fine fillers with a high specific surface area can be used for the production of high-strength concrete on sulfur binder, which ensure filling of the pore cavities of the concrete on sulfur binder, thereby increasing the physical and mechanical properties, but also forming higher adhesion bonds of the concrete on sulfur binder with the filler surface.*

***Keywords:** concrete on sulfur binder samples, structural studies, specific surface area, diffractogram, spectral analysis, spectroscopic analysis.*

Известно, что наличие сульфидных ионов может способствовать повышению химической активации серы и получению серных композиционных материалов с высокими эксплуатационными свойствами. Решающим влиянием на их увеличение получение однородной структуры получаемого материала.

В качестве вяжущего использовали техническую серу, соответствующую ГОСТ Р 56249-2014 «Сера газовая техническая. Технические условия», где массовые доли серы составляет 99,8%, золы – 0,119%, органических соединений – 0,079%, кислот в пересчете на H_2SO_4 – 0.000194% и воды – 0,1%, что позволяют возможность ее применения для изготовления серобетонных образцов строительного назначения.

В качестве тонкодисперсного наполнителя использовали порошки из природного цеолита Кемпендяйского месторождения Республики Саха (Якутия) из наиболее освоенного пласта III (Хонгурин III), который представляет собой природный минерал, со структурой, напоминающей тонкопористую губку, содержание клиноптилолита в котором составляет 75–90%. Характерной особенностью цеолитов является наличие в плотной кристаллической решетке полостей и каналов, проходящих через весь каркас. Благодаря этому цеолиты обладают высокой удельной поверхностью, чем обуславливается их высокая реакционная способность.

В качестве заполнителя был использован известняковый отсев, представляющий собой смесь мелких фракций диаметром от 5 мм до 0,05 мм, при этом влажность составляет 0,14%, насыпная плотность – 1,19 г/см^3, истинная плотность – 2,53 г/см^3, марка по дробимости – 1000, присутствие пылевидных и глинистых частиц – 2,36%. Результаты данных показывают не соответствие требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» по содержанию пылеватых и глинистых частиц, но известно, что в случае использования серного вяжущего взамен портландцемента возможно получение бетонов с высокими экспалуатационными свойствами на мелких песках и известняковом отсеве.

Для данной работы были изготовлены серобетонные образцы из активированного в планетарной мельнице АГО-2 в течение 1, 2, 3 и 5 минут в количестве 3 мас. % природного цеолита, технической

серы – 30 мас. % и известнякового отсева – остальное, в предварительно нагретых до 140 °С металлических формах размером 70х70х70 мм.

Согласно проведенным исследованиям, природный цеолит Кемпендяйского месторождения в основном представлен клиноптилолитом. Благодаря каркасной структуре цеолиты данного типа характеризуются высокой удельной поверхностью. Для детального изучения состава и текстурных особенностей материала был выполнен комплексный анализ образцов. Анализ дифрактограммы природного цеолита (рисинок 1) показал, что исходная порода сложена преимущественно цеолитом группы гейландита-клиноптилолита с сопутствующими минералами – кварцем, полевым шпатом и слюдой.

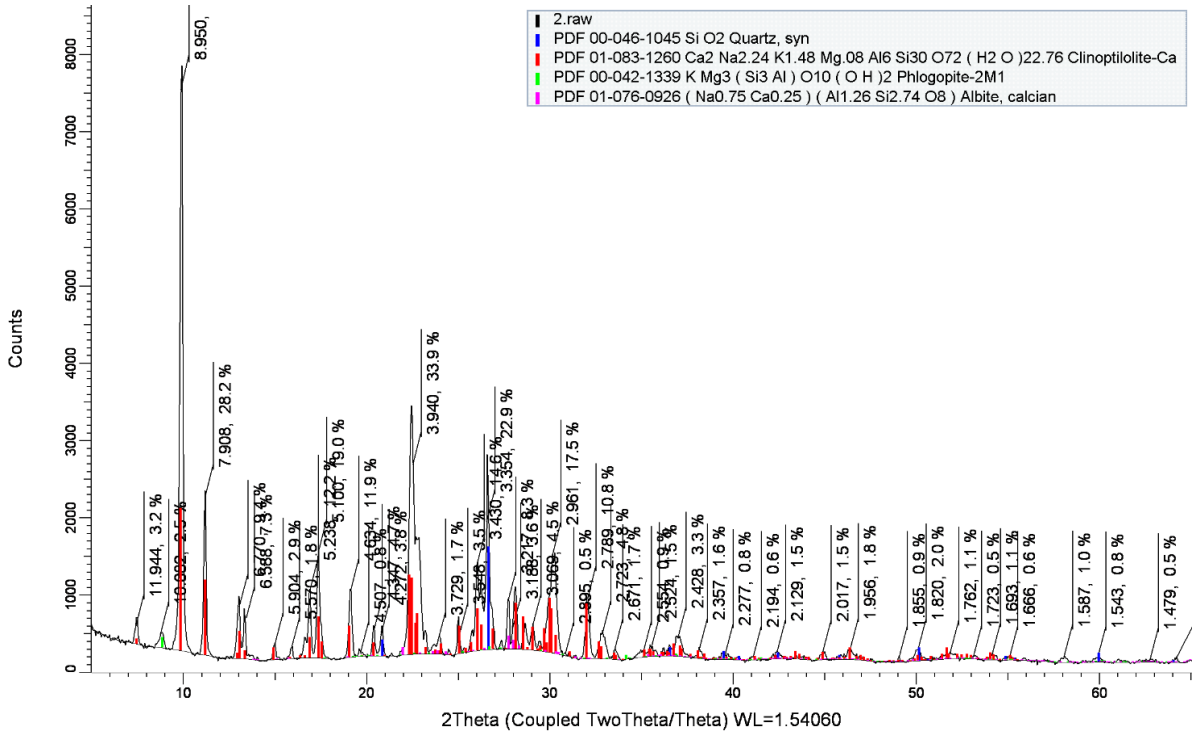


Рис. 1. Дифрактограмма минерального порошка из природного цеолита

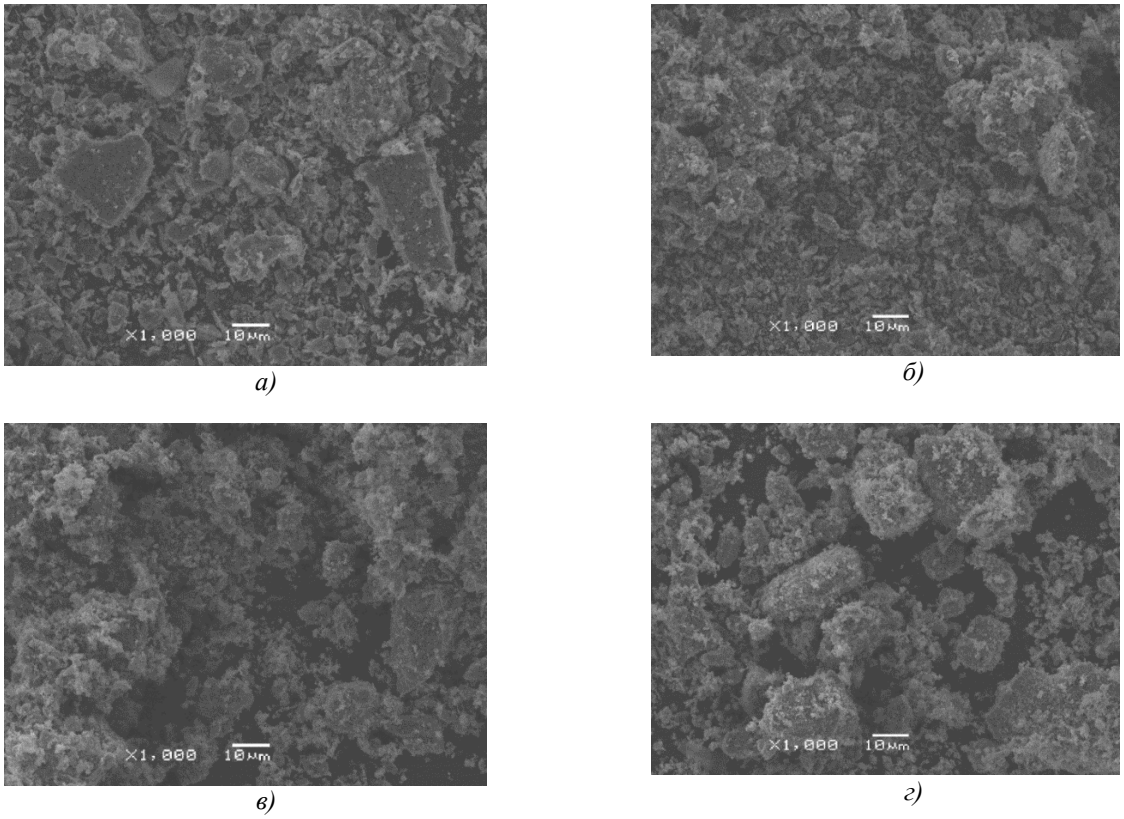
Цеолиты, используемые в качестве минеральных компонентов при производстве серобетона, содержат оксиды различных металлов, включая диоксид кремния, оксиды алюминия, железа, магния и другие. Подобный минеральный состав указывает на их принадлежность к кислым горным породам. Высокое содержание диоксида кремния, более 64 масс. % по данным спектрального анализа, позволяет классифицировать их как кислые породы нормального ряда.

Известно, что одним из перспективных методов улучшения реакционной способности минеральных порошков является их перевод в высоко активное состояние путем физического воздействия. Результаты измерений, проведенные с использованием «ПСХ-11М» продемонстрировали существенное изменение текстурных параметров природного цеолита после механической активации. Согласно данным таблицы 1, удельная поверхность механоактивированного минерального порошка увеличивается в 2 раза по сравнению с исходным образцом, средний размер частиц уменьшается в 1,5 раз, также установлена четкая корреляция между ростом удельной поверхности и уменьшением среднего размера частиц.

Таблица 1. Текстурные характеристики природного цеолита

Наименование и состояние цеолита	ПСХ-11М	
	Удельная геометрическая поверхность, см^2/г	Средний размер частиц, мкм
Природный цеолит без активации	7156	3,73
Природный цеолит, активированный 1 мин.	13005	2,44
Природный цеолит, активированный 2 мин.	13247	2,63
Природный цеолит, активированный 3 мин.	12590	2,86
Природный цеолит, активированный 5 мин.	11015	3,01

Порошки цеолитов были изучены при помощи растрового электронного микроскопа высокого разрешения JEOL JSM-6480LV. На рисунке 2 представлены микрофотографии минеральных порошков при увеличении в 1000 раз.



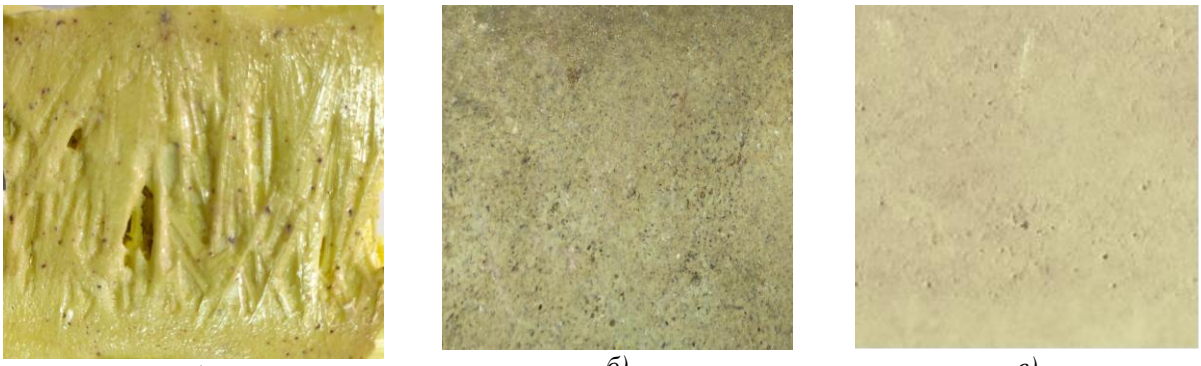
а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Минеральный порошок из природного цеолита: *а)* без активации; *б)* активация 1 мин.; *в)* активация 2 мин.; *г)* активация 3 мин

Изучение микрофотографий минерального порошка из природного цеолита показало, что частицы данного порошка имеют форму с множеством граней, частиц шаровидной формы не обнаружено.

Из анализа влияния изменения времени механоактивации на гранулометрический состав и форму частиц минеральных порошков следует, что при механоактивации порошков в течение 2 и 3 минут не наблюдается значительного изменения их гранулометрического состава, форма частиц не изменяется. Оптимальным временем активации цеолита является 1 минута.

Проведенные исследования выявили существенные различия в морфологии поверхности образцов технической серы и композитных материалов с цеолитной добавкой. Фрактографическое исследование (рисунок 3) показало, что образцы чистой серы характеризуются неоднородной поверхностью с выраженными игольчатыми кристаллическими формами и многочисленными полостями, что типично для процесса кристаллизации из расплавленного состояния.



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

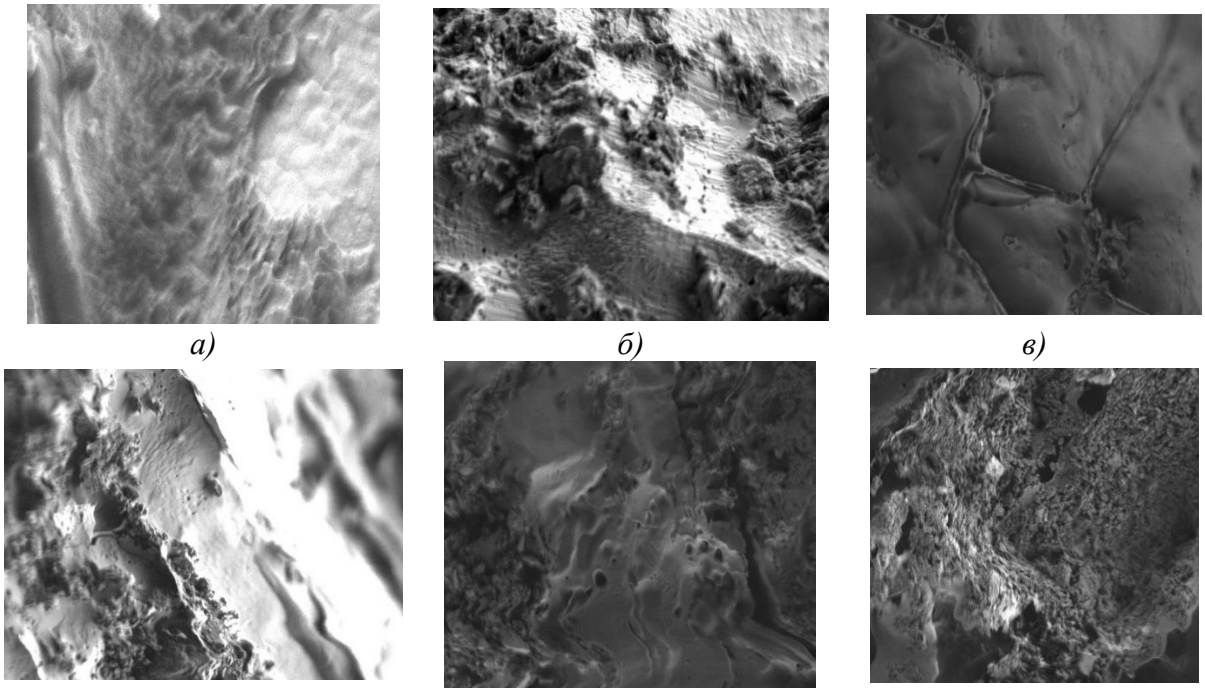
Рис. 3. Фрактографические исследования поверхности образцов (увеличение 10х): *а)* сера техническая; *б)* сера техническая с цеолитом без активации; в) сера техническая с цеолитом 1 мин.; *г)* сера техническая с цеолитом 2 мин.; *д)* сера техническая с цеолитом 3 мин.; *е)* сера техническая с цеолитом 5 мин

В отличие от этого, в образцах с добавкой цеолита наблюдается упорядоченная гомогенная структура. Это обусловлен гетерогенным механизмом кристаллизации серы на поверхности высокодисперсного цеолитного наполнителя, обладающего высокой удельной поверхностью (таблица 1). Образующиеся при этом кристаллы серы равномерно распределяются в матрице, создавая непрерывную пространственную структуру, что способствует формированию монолитного композита с улучшенными физико-механическими характеристиками.

На рисунке 4 представлены микрофотографии при 1000-кратном увеличении образцов элементной серы и композиции серы с активированным в течение различного времени природным цеолитом.

Композиция элементной серы с активированным в течение 2 мин. природным цеолитом, в отличие от элементной серы имеет упорядоченную, ориентированную мелкокристаллическую структуру, характерную для полисульфидов. Композиции с полисульфидами обладают более высокими показателями физико-механических характеристик за счет наличия в составе полимерных соединений.

С целью изучения влияния цеолита на процесс структурообразования серного вяжущего был проведен сравнительный ИК-спектроскопический анализ (рисунок 5) технической серы и серного вяжущего с добавлением цеолита.



а) *б)* *в)*

г) *д)* *е)*

Рис. 4. Микрофотографии образцов технической серы и композиции серы с природным цеолитом: *а)* техническая сера; *б)* техническая сера с цеолитом; *в)* техническая сера с цеолитом 1 мин.; *г)* техническая сера с цеолитом 2 мин.; *д)* техническая сера с цеолитом 3 мин.; *е)* техническая сера с цеолитом 5 мин

На рисунке 5 представлены ИК-спектры образцов серного вяжущего, наполненного цеолитом. Стоит отметить, что полученные спектры между собой практически не отличаются. В обоих спектрах, кроме указанных ранее полос поглощения структурных фрагментов предельных углеводородов, гидроксильной группы воды и спирта, а также связи S–S, наблюдаются характерные пики минерала клиноптилолита-Ca ($Ca_3(Si_{30}Al_6)O_{72}\cdot 20H_2O$) – основного компонента используемого природного цеолита [1]. Так, при 794 см$^{-1}$ проявились симметричные валентные колебания Si–O и Al–O, при 1047 см$^{-1}$ – асимметричные валентные колебания Si–O и Al–O, при 779 см$^{-1}$ – вибрационные колебания внутренних кислородных связей Si–O–Si, при 604 см$^{-1}$ – вибрационные колебания тетраэдрических структурных комплексов SiO_4^{2-} [2, 3]. На спектре нерастворимого в толуоле остатка стоит выделить увеличение интенсивности полосы поглощения при 1425 см$^{-1}$, которая связана с деформационными асимметрическими колебаниями CH_3 и CH_2 групп. В интервале 1250–900 см$^{-1}$ может образовываться полисульфиды из-за наличия в цеолите ионов кальция. Для подтверждения высказанного предположения можно опираться на наблюдаемый выраженный пик при 467 см$^{-1}$ (рисунок 5, *б*).

Таким образом, ИК-спектроскопические исследования образцов серного вяжущего, модифицированного природным цеолитом, позволили сделать предположение о протекании химических взаимодействий между минеральными наполнителями и технической серой с образованием полисульфидов.

Полученные спектры демонстрируют сохранение основных характеристических полос поглощения, присущих молекулярной структуре серы, ИК-спектроскопическое исследование не выявило образования новых химических связей между компонентами системы, о чем свидетельствует отсутствие принципиально новых полос поглощения в спектрах композитного материала. Полученные данные указывают на то, что модифицирующее действие цеолита обусловлено преимущественно физико-химическими взаимодействиями на границе раздела фаз, а не образованием новых химических соединений. Полученные результаты хорошо согласуются с ранее установленными данными о влиянии природного цеолита на морфологию и свойства серного вяжущего, подтверждая его структурообразующую роль в системе.

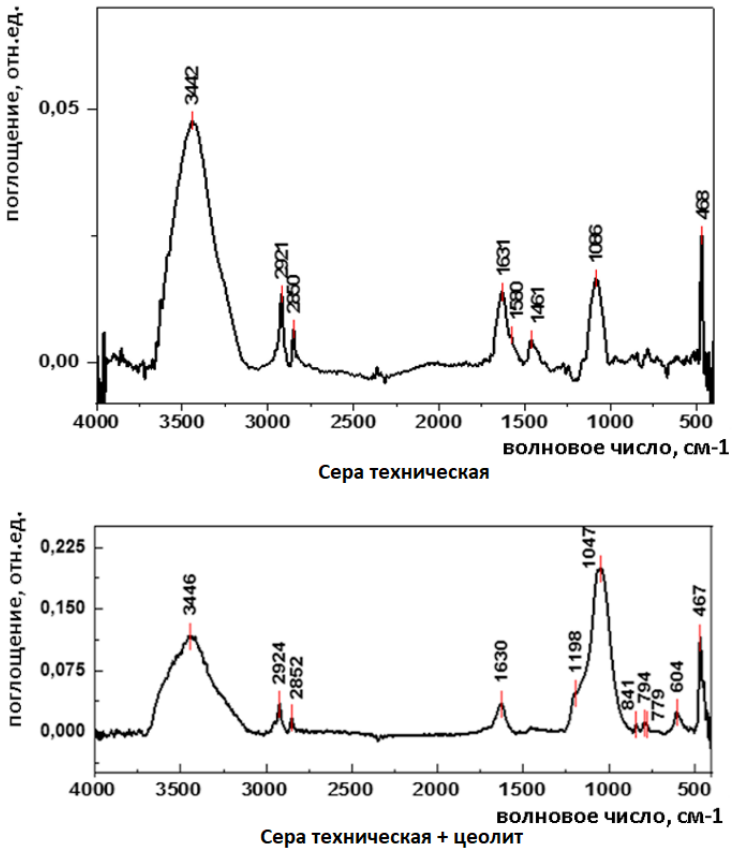


Рис. 5. ИК-спектр исходной технической серы и серы, наполненной цеолитом

Исследования подтвердили, что механическая активация цеолита увеличивает удельную поверхность в 2 раза и уменьшает размер его частиц в 1,5 раза. Оптимальное время обработки – 1 минута, при котором достигается максимальная дисперсность. Результаты микроскопии согласуются с данными текстурных характеристик и дифрактометрического исследования. А также, установлено, что модифицирующее действие цеолита обусловлено преимущественно физико-химическими взаимодействиями на границе раздела фаз, а не образованием новых химических соединений.

Работа выполнена в рамках ГЗ министерства науки и высшего образования РФ (рег. №№ 122011100162-9, FWRS-2026-0027) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Буренина О. Н., Николаева Л. А., Андреева А. В., Копылов В. Е., Саввинова М. Е. Исследование физико-химических свойств минерального сырья для модификации серобетонов // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14. № 5. С.1 – 13.
2. Mozgawa W. (2000) The influence of some heavy metals cations on the FTIR spectra of zeolites. *Journal of Molecular Structure*, vol. 555, pp. 299–304. DOI: 10.1016/0022-2860(00)00613-X.
3. Mozgawa W. (2001) The relation between structure and vibrational spectra of natural zeolites. *Journal of Molecular Structure*, vol. 596 (1-3), pp. 129 – 137. DOI: 10.1016/S0022-2860(01)00741-4.

УДК 691.335
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-202-206

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОБЕТОНОВ ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Андреева А.В.[1], Саввинова М.Е.[2], Николаева Л.А.[3], Буренина О.Н.[4]
Институт проблем нефти и газа СО РАН

***Аннотация**. Приведена возможность использования строительных материалов на основе серного вяжущего, а также краткая характеристика серы и физико-механические свойства образцов на ее основе из местного минерального сырья. Описан эксперимент и представлены данные экспериментальных исследований образцов-кубов из серобетона.*

***Ключевые слова:** строительный материал, серное вяжущее, серобетон, физико-механические свойства.*

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE ON SULFUR BINDER FROM LOCAL MINERAL RAW MATERIALS

A V Andreeva[1], M E Savvinova[2], L A Nikolaeva[3], O N Burenina[4]
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

***Abstract**. The possibility of using construction materials based on sulfur binder, as well as a brief description of sulfur and physical and mechanical properties of samples based on it from local mineral raw materials are presented. Experiment is described and data of experimental studies of samples-cubes from concrete on sulfur binder are presented.*

***Keywords:** construction material, sulphur binder, sulphur concrete, physical and mechanical properties.*

Бетон на основе гранулированной модифицированной серы имеет ряд неоспоримых преимуществ по отношению к традиционному бетону на основе портландцемента. Это проявляется прежде всего в суровых условиях Арктического региона. Серобетон характеризуется высокими прочностными показателями, имеет высокую морозостойкость и химическую стойкость. Серобетон позволяет использовать в качестве заполнителей любое минеральное сырье, в том числе и техногенные продукты. Армирование серобетонных изделий и конструкций может осуществляться композитными материалами. Бетон на основе серного вяжущего не содержит в своём составе воду, что в конечном счёте определяет его физико-механические и химические свойства [1].

В качестве вяжущего использовали техническую серу, соответствующую ГОСТ Р 56249–2014 «Сера газовая техническая. Технические условия». Физико-химические свойства серного вяжущего, определенных согласно данного ГОСТ, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели технической серы

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 56249-2014	Показатели
Внешний вид	-	Порошок желтого цвета без присутствия механических загрязнений (бумага, дерево, песок и др.)
Массовая доля серы, %, не менее	99,20	99,80
Массовая доля золы, %, не более	0,300	0,119
Массовая доля органических веществ, %, не более	0,450	0,079
Массовая доля кислот в пересчете на серную кислоту, %, не более	0,020	0,000194
Массовая доля воды, %, не более	0,5	0,1

Физико-химические показатели технической серы показывают возможность ее применения для изготовления серобетонных образцов строительного назначения.

В качестве тонкодисперсного наполнителя использовали порошки из природного цеолита Кемпендяйского месторождения Республики Саха (Якутия) из наиболее освоенного пласта III (Хонгурин III), который представляет собой природный минерал, со структурой, напоминающей тонкопористую губку, содержание клиноптилолита в котором составляет 75-90%. Кемпендяйский цеолитоносный район крупнейший на территории Якутии и имеет запасы около 3,5 млрд. тонн сырья [2, 3]. Цеолиты – это алюмосиликаты, построенные из тетраэдрических группировок AlO_4^{-5}и SiO_4^{-4}, общей формулы:

$$(R_2'R)Al_2O_3nSiO_2mH_2O, \quad (1)$$

где R' – одновалентный катион (Na^+, K^+, Li^+);
R – двухвалентный катион (Ca^{2+}, Sr^{2+}, Ba^{2+}).

Характерной особенностью цеолитов является наличие в плотной кристаллической решетке полостей и каналов, проходящих через весь каркас. Благодаря этому цеолиты обладают высокой удельной поверхностью, чем обуславливается их высокая реакционная способность.

В качестве заполнителя был использован известняковый отсев, свойства которого представлены в таблицах 2, 3. Из него можно изготавливать смеси невысоких марок, для ответственных конструкций его не используют, как и мелкие пески.

Таблица 2. Гранулометрический состав известнякового отсева

Проход	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,05
Частный, %	-	13,59	46,22	16,57	13,2	6,77	2,48	1,17
Полный, %	-	13,59	59,81	76,38	89,58	96,35	98,83	100,0

Известняковый отсев представляет собой смесь мелких фракций диаметром от 5 мм до 0,05 мм.

Таблица 3. Свойства известнякового отсева

	Влажность, %	Насыпная плотность, г/см^3	Истинная плотность, г/см^3	Пылевидные и глинистые частицы, %	Марка по дробимости
ГОСТ 8267-93, 31424-2010	-	-	-	не более 5,0	-
Фактические данные	0,14	1,19	2,53	2,36	1000

Анализ представленных данных (таблица 3) показал, что представленное сырье не соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» по содержанию пылеватых и глинистых частиц, что ограничивает возможности применения данных смесей в технологиях высокопрочных цементобетонов. Однако, анализ имеющихся научно-технических данных, представленных ранее, показал, что в случае использования серного вяжущего взамен портландцементов возможно получение бетонов с высокими физико-механическими свойствами на мелких песках и известняковом отсеве.

Исследование физико-механических свойств серобетонных образцов проведены по ГОСТ Р 59613-2021 «Смеси серобетонные и серобетон. Технические условия».

С целью определения оптимального количества технической серы в композите были изготовлены образцы в предварительно нагретых до 140°С металлических формах размером 70х70х70 мм. (рис. 1).

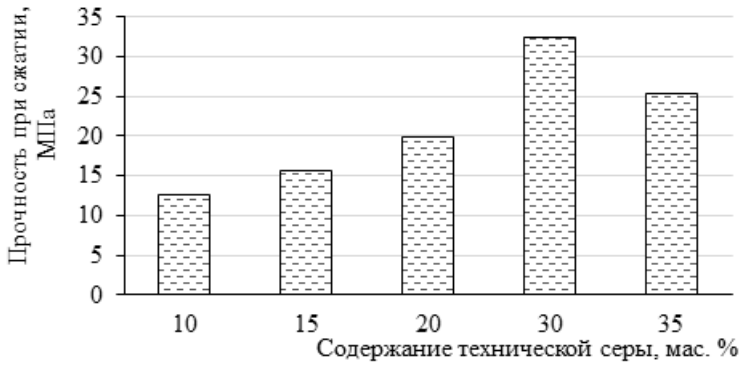


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии образцов серобетонов от содержания технической серы

Установлено (рисунок 5), что оптимальным содержанием технической серы в композите, обеспечивающим максимальное значение прочности при сжатии образцов, будет являться 30 масс. %. Ниже оптимума содержания серы получаются неработоспособные высоковязкие композиции с высокой пористостью и проницаемостью, что значительно снижает прочность при сжатии образцов – до 2,5 раз, а выше оптимума серы проявляются значительные температурные усадки с образованием дефектов, связанные с большим содержанием кристаллической серы устойчивой α-модификации, которая придает композиции высокую хрупкость.

Для исследования прочности на сжатие серобетонных образцов с различным содержанием природного цеолита были изготовлены серобетонные образцы с содержанием 30 масс. % серного вяжущего, природного цеолита 1, 2, 3 и 5 масс. % и известнякового отсева – остальное. Скорость нагрузки составляла 1,5 кН/с. (рисунок 2).

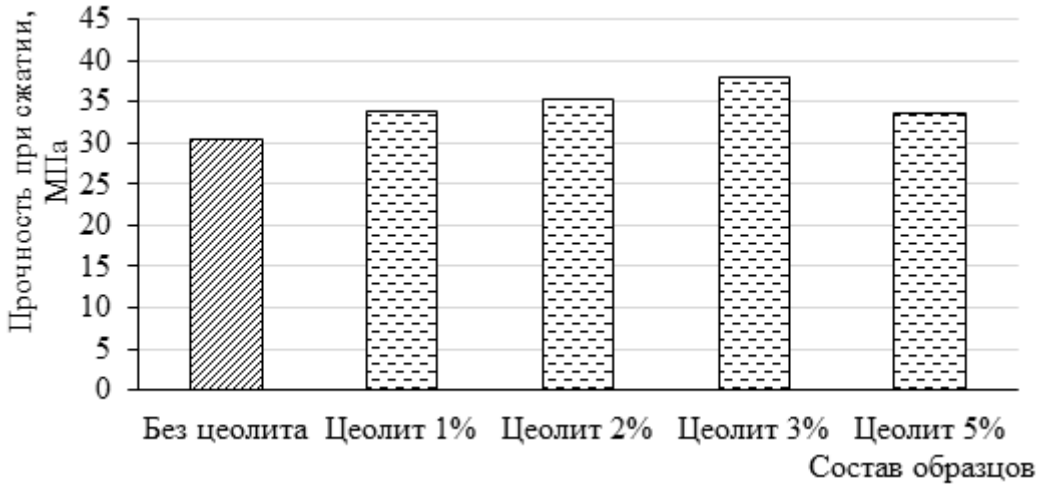


Рис. 2. Прочность на сжатие серобетонных образцов с различным содержанием природного цеолита

Установлено, что прочность при сжатии серобетонных образцов, модифицированных мелкодисперсными порошками природного цеолита, выше, чем прочность на сжатие контрольных образцов на 25–28 %. Наибольшие значения прочности при сжатии зафиксированы у образцов, содержащих 3 масс. % мелкодисперсного цеолита.

Оптимальным составом серобетонных образцов было выбрано следующее: сера техническая – 30 масс. %, природный цеолит – 3 масс. % фракции 0,315 мм и известняковый отсев – остальное. Для исследования влияния природного цеолита, активированного в планетарной мельнице АГО-2 в течение 1, 2, 3 и 5 минут в количестве 3 масс. % были изготовлены образцы серобетона с содержанием 30 масс. % серного вяжущего, и известнякового отсева – остальное.

Установлено, что прочность при сжатии серобетонных образцов (рисунок 3), модифицированных мелкодисперсными порошками механически активированного природного цеолита, выше, чем прочность при сжатии контрольных образцов за счет увеличения удельной поверхности. Так, при содержании механически активированного природного цеолита в течение 1 мин. наблюдается повышение показателя прочности при сжатии образцов на 21 % по сравнению с контрольными образцами.

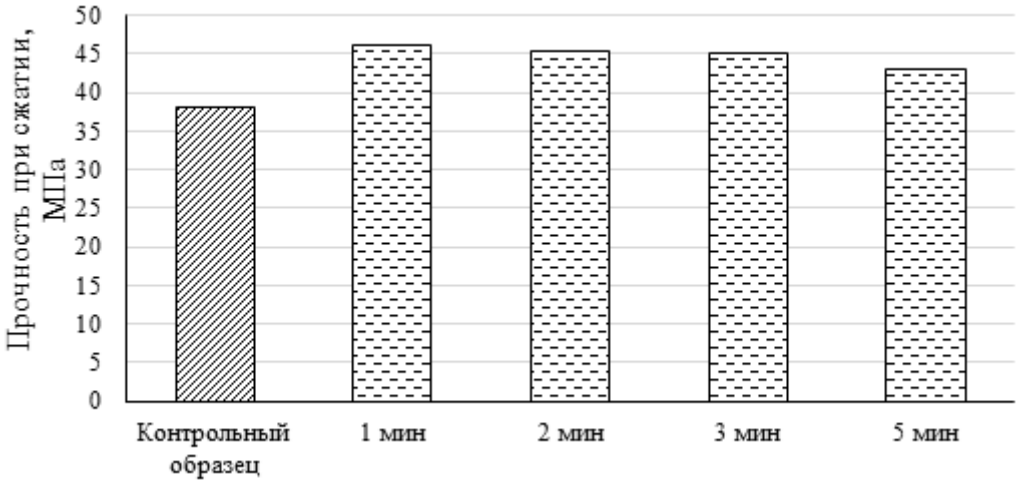


Рис. 3. Прочность при сжатии серобетонных образцов с различной длительностью активации природного цеолита

Исследование водопоглощения образцов (рисунок 4) показало, что образцы серобетона с активированным природным цеолитом в течение 1 мин. обладают более низким водопоглощением по сравнению с контрольными образцами, с увеличением времени активации цеолита водопоглощение образцов повышается. На седьмые сутки водопоглощение образцов серобетона с активированным природным цеолитом в течение 1 мин. было на 36 % ниже, чем у контрольных образцов. Кроме того, было отмечено, что они быстрее выходят на плато по набору массы.

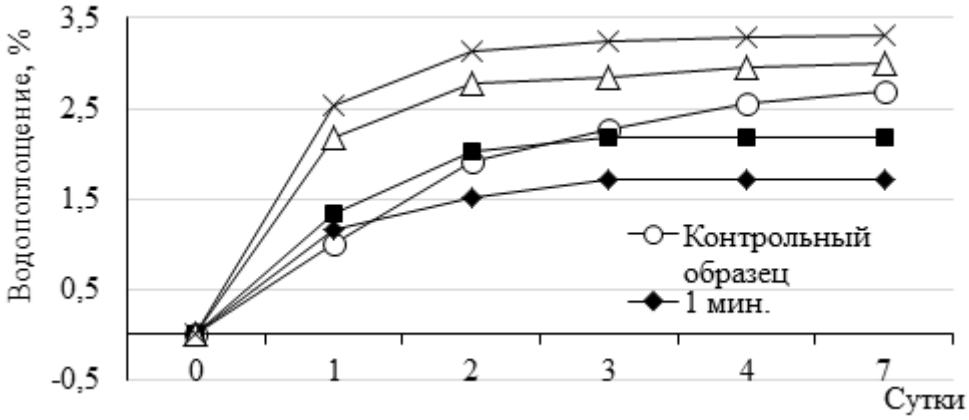


Рис. 4. Водопоглощение серобетонных образцов

Водопоглощение образцов возрастают с увеличением времени активации за счет увеличения объема пор в первые минуты механического воздействия на природный цеолит, и дальнейшее их снижение с увеличением времени воздействия. Низкие показатели водопоглощения за счет увеличения объема пор цеолита может быть из-за более однородной структуры серобетона за счет проникновения расплавленной серы в объем цеолита.

Морозостойкость материалов была оценена по изменению прочности при сжатии образцов после циклов промораживания-оттаивания. Известно, что снижение прочности влажного бетона при попеременном замораживании и оттаивании обусловлено, в основном, образованием льда в порах бетона. Термоциклирование образцов проводилось по третьему ускоренному методу испытаний согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», предусматривающему предварительное насыщение образцов 5 %-ным водным раствором хлористого натрия. После насыщения образцы помещались в испытательную камеру «Тепло-Холод» КТХ–150 при температуре 10 °С в закрытых сверху емкостях так, чтобы расстояние между стенками емкостей и камеры было не менее 50 мм. После каждого цикла промораживания-оттаивания проводился визуальный осмотр образцов. Те образцы, которые имели видимые разрушения на поверхности, испытывались на прочность при сжатии, по результатам которой назначалась марка по морозостойкости согласно данному ГОСТ. Информация по соотношению между числом циклов испытаний и маркой бетона по морозостойкости представлена в таблице 4.

Установлено, что уже после двух циклов промораживания-оттаивания у образцов бетонов, изготовленных с использованием технической серы, появились сколы и крошение на ребрах. При этом зафиксировано снижение прочности при сжатии до 20 %. Марке по морозостойкости F200 соответствуют образцы, изготовленные из технической серы, активированным цеолитом в течение 3 и 5 мин., наилучшие результаты наблюдаются у образцов серобетонов, изготовленных из технической серы, активированным цеолитом в течение 1 и 2 мин.

Таблица 4. Соотношение между числом циклов испытаний и маркой бетона по морозостойкости

Составы	Количество циклов «замораживания-оттаивания»	Марка бетона по морозостойкости
Цеолит без акт.	2	F75
Цеолит акт. 1 мин.	8	F300
Цеолит акт. 2 мин.	8	F300
Цеолит акт. 3 мин.	5	F200
Цеолит акт. 5 мин.	5	F200

Показано, что образцы выдержали без видимых разрушений 8 циклов попеременного замораживания и оттаивания, что соответствует марке по морозостойкости F300.

Таким образом, установлено, что физико-механические свойства серобетонных образцов зависят от времени механической активации природного цеолита. Прочность при сжатии серобетонных образцов, модифицированных механоактивированным, природным цеолитом, увеличивается на 21 %, механоактивация цеолита уменьшает водопоглощение серобетона на 36 % по сравнению с контрольнымы образцами, и составляет 1,71 %. Оптимальным временем активации цеолита по пройденным испытаниям является 1 минута.

Работа выполнена в рамках ГЗ министерства науки и высшего образования РФ (рег. №№ 122011100162-9, FWRS-2026-0027) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Васильев Ю.Э., Клименко Р.П., Носов С.М. Перспективные строительные материалы в Арктике // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022. №2(10). С.100-104. DOI: 10.51823/74670_2022_2_100.
2. Колодезников К.Е. Кемпендяйские цеолиты – новый вид минерального сырья в Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. 53 с.
3. Цицишвили Г.В., Андроканишвили Г.Т., Киров Г.Н. Природные цеолиты. М.: Химия, 1985. 224 с.

УДК 669.14: 531.44
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-207-209

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Борисова М.З.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: bormaria@yandex.ru

Аннотация. *Был рассмотрен механизм износа стального образца, показано, что процесс изнашивания образца из стали происходит с образованием продуктов износа. Так как формирование оксидов железа является одним из путей релаксации напряжений в поверхностном слое при трении, то упругопластические деформации при трении вызывают структурно-термическую активацию с образованием вторичных структур магнетита Fe_3O_4.*

Ключевые слова: *трение, вторичные структуры, структурно фазовые превращения, термоупругие напряжения, диффузионный массоперенос*

STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS IN STEELS BY SLIDING FRICTION

Borisova M.Z.
Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionov Siberian Branch of RAS

Abstract. *The mechanism of wear of a steel sample was considered, and it was shown that the process of wear of a steel sample occurs with the formation of wear products. Since the formation of iron oxides is one of the ways to relax stresses in the surface layer during friction, elastoplastic deformations during friction cause structural and thermal activation with the formation of secondary structures of Fe_3O_4 magnetite.*

Keywords: *friction, secondary structures, structural phase transitions, thermoelastic stress, diffusion mass transfer*

Трение – это сложный процесс, при котором материал испытывает различные виды нагрузок. Совокупность этих нагрузок приводит к катастрофическому накоплению дефектов с последующим отделением поверхностных слоёв материла. При механическом воздействии на поверхность поликристаллических металлических материалов происходит изменение прочности при деформации поверхностного слоя. Этот процесс называют деформационным упрочнением или наклепом. На рис. 1 показана схема граничного слоя после механического воздействия. Зона 1 – это слой адсорбированных молекул жидкостей, газов и поверхностно-активных веществ. Зона 2 состоит из слоя оксидов толщиной ~10 нм. Зона 3 состоит из зерен, деформированных под воздействием давления и температуры. Этот слой определяет эксплуатационные свойства и износостойкость материала. Зона 4, представляет собой основной материал, не подвергшийся изменениям. Чем глубже распространяется пластическая деформация, тем толще зона 3 [1].

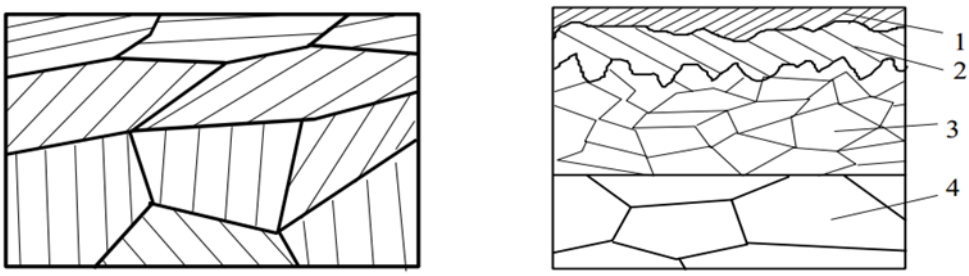


Рис. 1. Схема граничного слоя до и после механического воздействия [1].

Одним из механизмов структурной адаптации металлов при трении является образование оксидных пленок. Пластическая деформация в области пятен контакта активирует поверхность, повышая температуру и стимулируя проникновение кислорода в поверхностных слоях толщиной от 10 до 100 нм [2]. Из-за различия в плотности основного металла и оксидных пленок, между ними появляются разрывы или пучности, при попадании в них кислорода процесс окисления будет продолжаться. Так формируются слои оксидов, которые в процессе трения могут легко разрушаться и образовывать мелкие частицы износа. В зависимости от условий трения и, прежде всего, от температуры на поверхности

трения стального образца образуются пленки, содержащие FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4. Так как окисление поверхностей активируется их пластическим деформированием при трении, увеличение твердости рабочих элементов трущихся тел препятствует окислительному изнашиванию [3].

Повышение нагрузок в пятне контакта сопряженных поверхностей приводит к росту интенсивности изнашивания. После разрушения оксидных пленок, препятствующих непосредственному металлическому контакту трущихся тел, интенсивность изнашивания резко увеличивается. Затем изнашивание происходит в условиях заедания до тех пор, пока на поверхностях трения в новых условиях вновь не образуются оксидные пленки, так что изнашивание при заедании сменяется окислительным изнашиванием, происходящим главным образом в условиях упругого деформирования. При дальнейшем увеличении давления или скорости трения происходит разрушение оксидных пленок и скорость разрушения оксидных пленок будет превышать скорость их образования, после чего вновь происходит переход к изнашиванию при заедании. Таким образом, изменение условий трения приводит к изменению механизма изнашивания [3].

Высвобождающаяся в результате трения энергия выделяется в виде тепла, сконцентрированного в зоне пятна контакта. Нагрев в замкнутом объеме поверхностных слоев до температуры 200...500 °С приводит к изменению их прочности и других механических параметров, изменению геометрических форм, площади фактического контакта и дополнительным напряжениям в поверхностном слое. При повышении температуры в ходе трения происходит повышение химической активности поверхностного слоя, что изменяет характер взаимодействия тела с окружающей средой. Высокие температуры, возникающие на поверхности трения, ускоряют диффузионные процессы, приводящие порой к весьма значительному изменению атомарного состава в поверхностном слое трущихся тел, а, следовательно, и к изменению ряда свойств поверхностей трения, в том числе и свободной поверхностной энергии. Изменения, происходящие в поверхностных слоях, обусловленные диффузионными процессами, получили название трибомутации.

В ходе трения испытуемый образец подвергается длительным циклическим нагрузкам. Такие знакопеременные нагрузки приводят к постепенному зарождению и накоплению дислокаций под действием повторно-переменных напряжений[4]. Повышение плотности дислокаций способствует росту твердости и деформационному упрочнению поверхностного слоя стали. Дальнейшее повышение плотности дислокаций приводит к уменьшению средней длины свободного пробега дислокаций и повышению концентрации точечных напряжений, что, в свою очередь, ведёт к возникновению микротрещин с последующим разрушением металла [5]. Кроме того, под действием фрикционного нагрева и нагрузок происходит перераспределение атомов углерода на дефекты кристаллического строения, что блокирует продвижение дислокаций и способствует росту их плотности при трении [6].

На рентгенограмме образца стали ШХ15 после испытаний на трение (рис. 2) помимо уширения дифракционных линий из-за роста плотности дефектов кристаллической структуры, таких как дислокации, можно наблюдать отражения, относящиеся к оксидам железа (FeO, Fe_3O_4) [7], которые образовались на стальной поверхности при трении. Обнаружение оксидов на поверхности трения свидетельствует о процессе окислительного изнашивания, когда на поверхности образуются оксиды, которые в процессе трения разрушаются и вновь образуются. Такой процесс повторяется множественное количество раз и характерен для железоуглеродистых сплавов. Окислительное изнашивание активизируется при пластической деформации и при повышении температуры поверхности в ходе трения. При оптимальных условиях трения оксидная пленка может выступать защитным слоем, предотвращающим дальнейшее окисление металла. Но при чрезмерных нагрузках или высоких температурах может происходить разрушение оксидной пленки и ускорение процесса окисления.

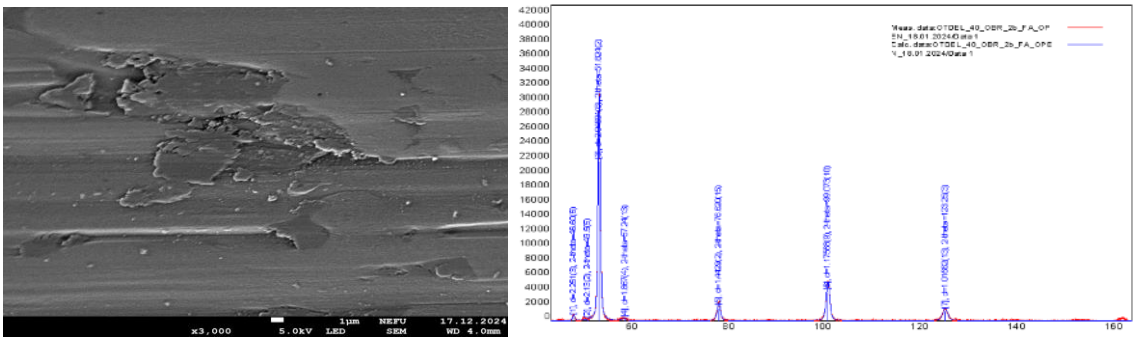


Рис. 2. Поверхность трения стали ШХ15 (×3000 РЭМ) и рентгенограмма поверхности трения

Известно, что формирование оксида FeO является одним из путей релаксации напряжений в поверхностном слое при трении [8]. Формирование FeO на поверхности трения разделяет контактные поверхности что препятствует адгезии. Упругопластические деформации при трении вызывают структурно-термическую активацию с образованием вторичных структур магнетита Fe_3O_4 [9], которые, в свою очередь, являются продуктами износа. Таким образом, показано что процесс изнашивания образца из стали ШХ15 происходит с образованием продуктов износа – оксидами FeO и Fe_3O_4.

Заключение. Был рассмотрен механизм износа – образование частиц износа, образованных оксидами железа (FeO, Fe_3O_4) с их последующим отслоением. Процесс насыщения поверхности стального образца кислородом при трении происходит, по-видимому, в зонах, испытывающих наибольшие нагрузки, и, как следствие, подвергающихся более высоким температурам. Процесс окисления начинается с образования FeO, и в ходе трения, при структурно-термической активации, происходит формирование вторичных структур магнетита Fe_3O_4 с последующим отделением оксидных плёнок от поверхности трения и образованием продуктов износа.

Список литературы

1. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского; Самар. гос. техн. ун-т.Самара, 2000. – 268 с.
2. Филиппов, М. А. Трение и антифрикционные материалы: учебное пособие / М. А. Филиппов, О. Ю. Шешуков; М-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 204 с.
3. Лужнов, Ю.М. Основы триботехники: учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. – М.: МАДИ, 2013. – 136 с.
4. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
5. Колубаев А.В., Иванов Ю.Ф., Сизова О.В., Колубаев Е.А., Алешина Е.А., Громов В.Е Влияние упругих возбуждений на формирование структуры поверхностного слоя стали Гадфильда при трении // Журнал технической физики, 2008, том 78, вып. 2 С. 63-70.
6. Фадин В.В. Структура и механизмы разрушения поверхностных слоев металлических материалов в экстремальных условиях трения и скользящего токосъема: дис. … д-ра техн. наук: 1.3.8. / Фадин Виктор Вениаминович. –Томск, 2021. –271 с.
7. Физико-химические методы исследования материалов. Состав, структура: учебное пособие / А.В. Сенин, Д.А. Винник, А.С. Чернуха, Н.С. Забейворота. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – 119 с.
8. Одинг И. А., Либеров Ю.П. Накопление дефектов и образование субмикроскопических трещин при статическом деформировании Армко-железа // Изв. АН СССР ОТН. Металлургия и топливо. – 1964. – № 1. – С. 11-13.
9. Игнатов А.А. Формирование структуры и триботехнические свойства покрытий на основе стали 10Р6М5, полученных многопроходной электронно-лучевой наплавкой: дис. …канд. техн. наук: 05.16.09 / Игнатов Андрей Алексеевич. –Томск, 2015. – 127 с.

УДК 624.138
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-210-213

СОЗДАНИЕ СОСТАВОВ РАСТВОРНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Бытыров А.П.
Инженерно-технический институт ФГАОУ ВО
«Северо-восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»
E-mail: algyisb2002@gmail.com

Аннотация. *В статье обосновывается цель и излагаются результаты предварительных исследований по укреплению оттаивающих грунтов. Наибольшая территория вечной мерзлоты в России находится в Республике Саха (Якутия), где активно ведется гражданское и промышленное строительство. Таяние криолитозоны приводит к снижению несущей способности грунтов, что делает решение данной проблемы особенно актуальной. Проведенные исследования демонстрируют возможность создания растворных смесей для цементации грунтов в условиях криолитозоны из местных материалов.*

Ключевые слова*: вечная мерзлота, криолитозона, грунты, растворная смесь, цементация.*

CREATING COMPOUNDS OF SOLUTION MIXTURES TO STRENGTHEN SOILS IN CRYOLITHOZONE CONDITIONS

Bytyrov A.P.
Engineering and Technical Institute of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

Abstract*. This article substantiates the objective and presents the results of preliminary research on stabilizing thawing soils. The largest area of permafrost in Russia is located in the Republic of Sakha (Yakutia), where civil and industrial construction is actively underway. Melting of the permafrost zone leads to a decrease in the bearing capacity of soils, making this problem particularly urgent. The conducted research demonstrates the feasibility of creating mortar mixtures for soil cementation in permafrost conditions using locally available materials.*

Keywords: *permafrost, cryolithozone, soils, mortal mixture, cementation.*

Нахождение территории Республики Саха (Якутия) в зоне сплошной криолитозоны предопределяет высокую чувствительность геотехнических систем внешним воздействиям, что проявляется в нарушении криогенного равновесия, изменении морфологии мёрзлых толщи ухудшении их прочностных характеристик. Это создаёт серьёзные ограничения для градостроительной деятельности. В целях стабилизации и усиления оснований фундаментов применяется технология цементации грунтов, что определяет актуальность проведения исследований в области разработки рецептур и изучения свойств растворных смесей, адаптированных к специфическим условиям вечной мерзлоты.

Основные методы закрепления грунтов это – силикатизация, цементация и искусственное замораживание. Силикатизация – это химический способ, проводящийся через нагнетание в грунт раствора жидкого стекла и ускорителя реакции. Цементация – это заполнение пор и трещин грунта путем инъекции специального раствора. Искусственное замораживание – это временная мера во время строительства. Через замораживающие колонки проводят хладоноситель, замораживающий воду внутрь грунта [1]. Цементация грунтов обладает рядом преимуществ, такие как: применимость, скорость и эффективность, устойчивость к деформациям, экологичность, контроль качества и отсутствие необходимости в обширных подготовительных работах, поэтому дальнейшие исследования ориентированы на данный вид закрепления грунта [3].

Исходя из этого, была поставлена цель исследования: разработать состав растворной смеси из местного сырья для усиления грунтов в условиях многолетней мерзлоты.

Поставленная цель обуславливает необходимость решения следующих задач:

1. Провести анализ инженерно-геокриологических условий и термического режима криолитозоны.

2. Исследовать существующие технологические приёмы и рецептуры растворных смесей, применяемых для закрепления дисперсных грунтов.

3. Выполнить оптимизацию составов инъекционных растворных смесей на основе местных сырьевых материалов.

4. Осуществить экспериментальное исследование реологических, физико-механических и фильтрационных характеристик разработанных составов на лабораторных моделях грунтов.

Научная новизна работы заключается в разработке методики оптимизации конструктивно-технологических решений при возведении фундаментов на многолетнемёрзлых грунтах (ММГ) путём их цементационной стабилизации.

В результате выполнения работы предполагается получить оптимизированный состав тампонажного раствора с модифицирующими добавками, обеспечивающий:

· повышение несущей способности грунтового основания;

· увеличение его прочностных и деформационных характеристик;

· снижение фильтрационной способности (водопроницаемости);

· создание армированного цементированного массива в теле основания.

Многолетнемёрзлые породы (ММП) представляют собой горные породы, характеризующиеся криогенным строением и отрицательной температурой, сохраняющейся в течение не менее трех лет подряд. Территория Республики Саха (Якутия) расположена в зоне сплошного распространения ММП. Протаивание мёрзлых толщ приводит к необратимым изменениям их структуры и свойств, вызывая опасные инженерно-геологические процессы (просадки, оползни, термоэрозию), что делает грунты оснований непригодными для строительства без применения специальных мероприятий. Эффективным методом стабилизации таких грунтов является их искусственное закрепление, в частности, цементация. Данная технология направлена на коренное улучшение физико-механических характеристик грунтовых массивов, обеспечивая существенное снижение коэффициента фильтрации и повышение прочностных и деформационных свойств, что в совокупности приводит к увеличению несущей способности основания.

Одним из современных материалов, применяемых для этих целей, является «Микродур». Первоначальная сфера его применения включает укрепление и гидроизоляцию конструкций при реставрации объектов культурного наследия, а также ремонт каменных и бетонных конструкций без изменения их внешнего облика. Ключевые технологические преимущества «Микродура» обусловлены тонкодисперсным составом и оптимизированной гранулометрией частиц [2].

Проведённый сравнительный анализ с традиционными методами закрепления грунтов, такими как одно- и двухрастворная силикатизация с применением бездисперсных материалов, а также с использованием полимерных композиций на основе эпоксидных, карбамидных и фенолформальдегидных смол, выявил ряд неоспоримых преимуществ суспензий «Микродура». К числу последних относятся: высокая пенетрирующая способность, долговечность формируемого конгломерата, технологичность приготовления и применения, экологическая безопасность, химическая инертность по отношению к цементам и высокая адгезионная прочность к бетонным и каменным поверхностям. Существенным лимитирующим фактором для широкого применения данного материала является его высокая стоимость.

Результаты рентгенофазового и химического анализа компонентного состава «Микродура» установили, что в его состав входят, мас.%: портландцементный клинкер (25–40), тонкодисперсный гранулированный доменный шлак (60–70) и гипс (3–7). Снижение себестоимости производства аналоговой растворной смеси может быть достигнуто за счёт замены импортного или привозного шлака на местные сырьевые ресурсы. Наиболее перспективным заменителем доменного шлака, исходя из сходства химико-минералогических характеристик, признан цеолит Хонгурууского месторождения (Сунтарский улус, Республика Саха (Якутия)).

Оптимизацию разрабатываемого инъекционного раствора производили согласно полнофакторного математического плана эксперимента с двумя переменными: X1 – соотношение портландцемент : цеолит, X2 – соотношение порошок : вода.

Таблица 1. Математическое планирование эксперимента

X1, Отношение помола портландцемента к помолу цеолита	X2, Отношение порошка к воде
50/50	1:1
60/40	1:1
70/30	1:1
50/50	1:1,5
60/40	1:1,5
70/30	1:1,5
50/50	1:2
60/40	1:2
70/30	1:2

Для проведения экспериментальных исследований была выполнена предварительная операция механического активирования исходных материалов– дробленого цеолита и портландцемента марки М500. Измельчение проводилось в течение 5 минут в планетарной шаровой мельнице РМ-200 с целью достижения оптимальной дисперсности компонентов.

Таблица 2. Итоговые результаты

				Предел прочности, МПа	
	X1	X2	Плотность, г/см^3	Изгиб	Сжатие
1	50/50	1:1	0,943	0,156	1,725
2	60/40	1:1	1,114	0,19	2,888
3	70/30	1:1	1,067	0	3,033
4	50/50	1:1,5	0,805	0	0
5	60/40	1:1,5	0,8184	0	0
6	70/30	1:1,5	0,8386	0	0,99
7	50/50	1:2	0,6383	0	0
8	60/40	1:2	0,6534	0	0
9	70/30	1:2	0,688	0	0

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил установить, что оптимальным комплексом физико-механических характеристик обладает состав с массовым соотношением ПЦ:Цеол = 60:40 и водо-твёрдым отношением В/Т = 1,0. Для данной рецептуры зафиксированы максимальные значения плотности и предела прочности при изгибе. Установлена обратная зависимость между величиной В/Т и прочностными характеристиками композитов: с увеличением содержания воды наблюдается снижение прочности. Прямая корреляционная связь выявлена между долей портландцемента в составе смеси и плотностью получаемых образцов. Полученные математические модели, визуализированные в виде поверхностей отклика (Рис. 1–3), статистически достоверно подтверждают сделанные выводы.

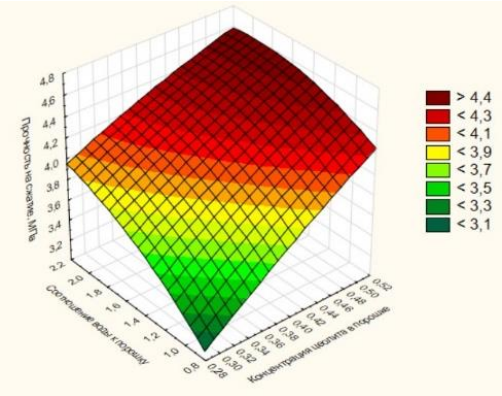


Рис. 1. Поверхность отклика зависимости предела прочности образцов на сжатие из растворной смеси от переменных факторов.

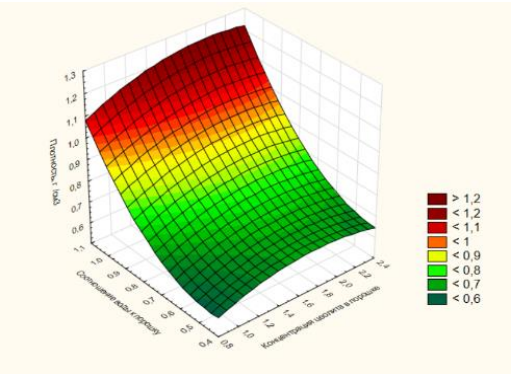


Рис. 2. Поверхность отклика зависимости плотности образцов из растворной смеси от переменных факторов

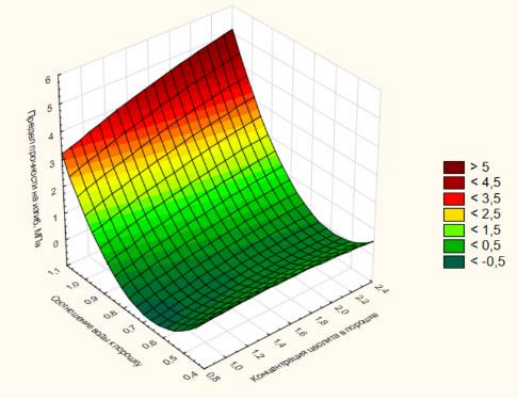


Рис. 3. Поверхность отклика зависимости предела прочности образцов на изгиб из растворной смеси от переменных факторов.

В результате проведённых исследований сформулированы следующие предварительные выводы:

1. Выполнен анализ инженерно-геокриологических условий и термического режима многолетнемёрзлых пород (ММП) региона.

2. Проведён обзор современных технологий и рецептур растворных смесей, применяемых для закрепления грунтов.

3. Разработаны составы инъекционных растворных смесей на основе местного сырьевого материала (цеолита).

4. Проведено экспериментальное исследование опытных образцов, в ходе которого определялись их плотность, предел прочности при изгибе и сжатие. Установлено, что состав № 2 с массовым соотношением портландцемента к цеолиту 60:40 и водо-твёрдым отношением (В/Т) 1,0 демонстрирует оптимальные прочностные и деформационные характеристики среди всех изученных композиций.

Внедрение разработанной ресурсосберегающей технологии, основанной на использовании местных сырьевых материалов для цементации грунтов, является перспективным направлением для оптимизации строительных процессов в криолитозоне Республики Саха (Якутия). Эффективность предлагаемого подхода подтверждается совокупностью экономических (снижение себестоимости), технических (обеспечение требуемых прочностных свойств) и экологических (сокращение логистических плеч) преимуществ.

Список литературы

1. Адамович А. Н. и Колтунов Д. В., Цементация оснований гидросооружений, М. – Л. 1953; Ржаницын Б. А., Силикатизация песчаных грунтов, М., 1949; Литвинов И. М., Термическое укрепление просадочных лёссовых и других грунтов в основании различных зданий и сооружений, К., 1955. / Интернет ресурс: https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/042/633.htm (дата обращения 10.03.25)
2. Борисов В.А., Терехов П.М. Микродур – новый материал для реконструкции зданий, ремонта бетонных и каменных конструкций, улучшения свойств грунтов оснований. / Интернет ресурс: https://book.uraic.ru/project/conf/txt/005/archvuz18_pril/23/template_article-ar=K21-40-k29.htm?ysclid=mauq5o9cet114036113 (дата обращения 19.04.2025)
3. Ерохина, Е. А. Объемная цементация грунтов / Е. А. Ерохина, А. А. Ерохина, П. А. Лисичкин // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 6(98). – С. 10. – EDN NXQHTC.

УДК 678.5
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-214-216

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПРИРОДНОГО МИНЕРАЛА ГАЛЛУАЗИТА

Кычкина Ю.В., Капитонова Ю.В.,. Тарасова П.Н, Охлопкова А.А.
Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск
E-mail: julyakkerman14@gmail.com

Аннотация: *Настоящее исследование направлено на изучение влияния двух модификаций природного минерального наполнителя галлуазита марок АНТ 811 и АНТ 1108 (алюмосиликатные нанотрубки) на структуру и механические свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ). Для оценки эффективности модифицирования были применены современные методы научного анализа. Проведённые испытания позволили выявить существенное воздействие добавок галлуазита на физико-химические и триботехнические показатели ПТФЭ-композитов. Установлено, что использование разновидности галлуазита марки АНТ 1108 способствует заметному повышению триботехнических характеристик полимерных композиций по сравнению с аналогичными материалами, содержащими галлуазит марки АНТ 811. Эти результаты открывают новые перспективы оптимизации технологических процессов производства функциональных полимерных композитов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками.*

Ключевые слова: *Полимерные композитные материалы (ПКМ), политетрафторэтилен (ПТФЭ), галлуазит.*

DEVELOPMENT OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE WITH ADDITION OF NATURAL HALLOYSITE MINERAL

Yu.V. Kychkina, Yu.V. Kapitonova, P.N. Tarasova, A.A. Okhlopkova
North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk

Abstract. *This study aims to investigate the effect of two types of natural mineral filler–halloysites of grades ANT 811 and ANT 1108 (alumino-silicate nanotubes)–on the structure and mechanical properties of polytetrafluoroethylene (PTFE). Modern scientific analytical methods have been applied to evaluate the efficiency of modification. Carried out tests demonstrated a substantial impact of halloysite additives on physicochemical and tribological characteristics of PTFE composites. It was found that utilizing halloysite grade ANT 1108 enhances significantly the tribological properties of polymeric compositions compared to analogous materials incorporating halloysite grade ANT 811. These outcomes provide new opportunities for optimization of production technologies for functional polymer composites with improved service properties.*

Keywords: *Polymer composite materials (PCMs), polytetrafluoroethylene (PTFE), halloysite.*

Среди полимерных материалов, используемых в машиностроении заметно выделяется политетрафторэтилен, который характеризуется высокой химической и термической стойкостью, обладает высокой степенью кристалличности [1]. Изделия на его основе функционируют в вакууме, агрессивных химических средах и широком температурном диапазоне от экстремально низких до высоких значений (–196 °С до +260 °С), что делает их пригодными для использования в экстремальных климатических условиях. Основным недостатком является его низкая износостойкость, которую традиционно повышают с помощью введения различных наполнителей. В данной работе в качестве наполнителей использован галлуазит, который относится к алюмосиликатам, имеет структуру в форме нанотрубок. Данный материал привлекает внимание исследователей благодаря комплексу преимуществ: экологической безопасности, доступной стоимости и ряду уникальных физико-химических характеристик. Основной целью этой работы является разработка полимерных композитных материалов (ПКМ) на основе политетрафторэтилена и наполнителей – галлуазита разных марок АНТ 811 и АНТ 1108, и сравнение их характеристик путем проведения исследований.

У марки АНТ-811 состав по данным рентгенофазового анализа следующий: около 90% галлуазита, 8% каолинита, менее 2% кварца и небольшое количество других фаз (гиббсит, бемит, алунит,

кутнохорит, кальцит, доломит). У марки АНТ-1108: около – 88.3% галлуазита, 6.7% кварца, 5.0% кристобалита. (Производство: ООО «МТиНМ», г. Зеленоград). В работе представлены результаты исследований свойств исследуемого галлуазита и ПКМ на основе ПТФЭ. Были исследованы образцы композитов на основе ПТФЭ, содержащие различные концентрации (1, 2, 5 мас. %) двух марок галлуазита.

Были проведены исследования галлуазита методом газовой адсорбции, результаты которых показали, что изотермы адсорбции АНТ 811 по классификации ИЮПАК относятся к IV типу. Характер петли гистерезиса у изотермы АНТ 811 указывает на преобладание цилиндрических пор, а у изотерм АНТ 1108 – преимущественно щелевидных пор. По данным расчета распределения пор по объему, проведенного методом равновесной модели NLDFT для цилиндрических и щелевых пор, у трех образцов наблюдается преимущественно бимодальное распределение пор с максимумами у АНТ 811 и АНТ 3810 – 5,6 и 3,2 нм.

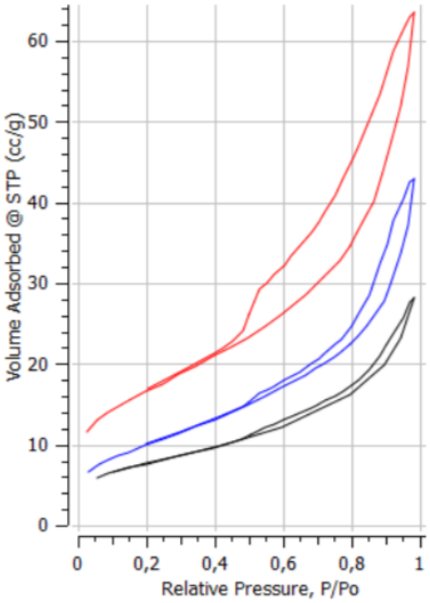


Рис. 1. Изотермы адсорбции-десорбции

Результаты исследований физико-механических характеристик ПКМ показали, что с увеличением массового содержания наполнителей деформационно-прочностные показатели композитов немного снижаются, что является следствием увеличения локальных центров напряжения в материале при введении наполнителей [2]. Были исследованы также триботехнические свойства ПКМ (скорость массового изнашивания и коэффициент трения), которые проводились с использованием трибометра «UMT-3» CETR (США) по схеме трения «палец-диск» (Рис. 1). Испытания проводились при следующих параметрах: t = 3 ч, P = 2 МПа, v = 0,2 м/с [3].

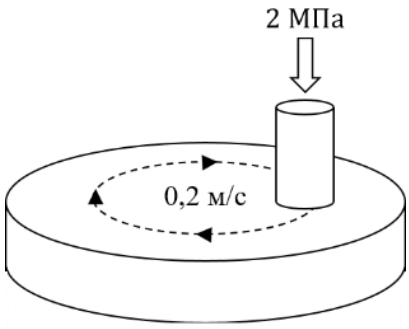


Рис. 2. Схема трения «палец-диск»

Скорость массового изнашивания оценивалась по потере массы в единицу времени согласно формуле (1):

$$I=\frac{m_2-m_1}{t}\times 100\ ,\ (1)$$

где: I – скорость массового изнашивания, мг/ч; m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; t – продолжительность испытания, ч.

Композиты, содержащие галлуазит марки АНТ 1108 характеризуются более низким показателем скорости массового изнашивания – в 416 раз (относительно исходного ПТФЭ), чем у композитов, содержащих галлуазит марки АНТ 811 (в 312 раз). Показатели коэффициента трения у композитов не превышают 0,2, что является достаточно хорошим показателем для триботехнических материалов.

Плотность ПКМ увеличивается при введении наполнителей. Это происходит за счёт введения более плотного материала в композицию, а также заполнения свободного пространства между глобулами полимера дисперсным наполнителем [4]. Также к увеличению плотности приводит термообработка ПКМ с дисперсными наполнителями, которая связана со структурированием полимера и образованием более упорядоченной, кристаллической структуры [5].

Методом сканирующей электронной микроскопии показано формирование вторичной структуры на поверхности трения ПКМ, характеризуемой повышенной износостойкостью. Вторичные структуры образуются в результате сложного комплекса физико-химических и структурных преобразований, вызванных фрикционным взаимодействием ПКМ/контртело. Формирование такой структуры включает термо- и механодеструкцию, трибоокислительные процессы. Все эти процессы ведут к созданию микрогеометрии поверхности с оптимальным рельефом.

Таким образом, в ходе работы обоснована эффективность применения галлуазита для модификации ПТФЭ, на основе чего были созданы полимерные композиты с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Список литературы

1. Машков Ю.К. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация [Текст] / Ю.К. Машков, З.Н. Овчар, В.И. Суриков, Л.Ф. Калистратова. М.: Машиностроение, 2005 – 240 с.
2. Горбацевич, Г.Н. Герметизирующие фторкомпозиты повышенной износостойкости [Текст] / Г. Н. Горбацевич, В.А. Струк, Д.В. Лышов // Учебно-методический центр «Промагромаш» ОАО «Белкард». – 2008. – С. 316
3. Охлопкова А.А. Влияние наномодификаторов на деформационно-прочностные свойства фотополимерных композитов. Москва: В трудах международных конференций. 2013. 518-520 с.
4. Пилин, М.О. Влияние гранулометрического состава наполнителей на свойства сверхвысокомолекурного полиэтилена [Текст]/ М.О. Пилин, Т.Н. Теряева, З.Р. Исмагилов. КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово. 2019 – 66 – 71 с.
5. С. А. Слепцова, Ю. В. Кириллина, Н. Н. Лазарева [и др.] // Вестник СВФУ. – 2015. – Т. 50, № 6. – С. 95-104.

УДК 669.046.5:669.018.28
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-217-220

ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ СТАЛЬНОГО ЛОМА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ ИЗ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ В ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

Петров П.П.[1], Тарасов П.П.[1,2], Данилов А.Д.[1], Степанова К.В.[1], Скрябин Т.Н.[1]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
обособленное подразделение «Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН»
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: ppp32@mail.ru

***Аннотация**. Рабочие элементы горнодобывающих машин и механизмов, эксплуатирующихся в экстремальных природно-климатических условиях Севера, при россыпной добыче алмазов, подвергаются усиленному износу. Вследствие изнашивания режущих деталей землеройной техники возрастает усилие техники на рыхление грунта, повышаются нагрузки на отдельные детали и машину в целом, снижается производительность труда, увеличиваются количество простоев и объем затрат на ремонт изношенных деталей. Внедрение научно-обоснованных эффективных технологий переработки изношенных деталей, с целью получения готовых изделий в виде коронок рыхлителей является актуальной задачей.*

***Ключевые слова:** горнодобывающая техника, добыча алмазов, импортозамещение, износ.*

PROSPECTS OF PROCESSING STEEL SCRAP OF WORKING BODIES OF MINING MACHINERY FROM WEAR-RESISTANT HIGH-STRENGTH STEELS IN AN INDUCTION FURNACE

Petrov P.P.[1], Tarasov P.P.[1,2], Danilov A.D.[1], Stepanova K.V.[1], Scriabin T.N.[1]
[1]FIC «Yakut Scientific Center SB RAS» separate division
V.P. Larionov institute of the physical-technical problems of the North
of the Siberian branch of the RAS
[2]M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

***Annotation.** The working elements of mining machines and mechanisms operating in the extreme climatic conditions of the North, during alluvial diamond mining, are subject to increased wear. Due to the wear of the cutting parts of earthmoving equipment, the effort of machinery to loosen the soil increases, the loads on individual parts and the machine as a whole increase, labor productivity decreases, the number of downtime and the cost of repairing worn parts increase. The introduction of scientifically proven effective technologies for recycling worn parts in order to obtain finished products in the form of ripper crowns is a urgent task.*

***Keywords:** mining machinery, diamond mining, import substitution, depreciation.*

Рабочие элементы горнодобывающих машин и механизмов, эксплуатирующихся в экстремальных природно-климатических условиях Севера, при россыпной добыче алмазов, подвергаются ускоренному износу и расходуются в больших масштабах [1, 2]. Вследствие изнашивания режущих деталей землеройной техники возрастает усилие техники на рыхление грунта, повышаются нагрузки на отдельные детали и машину в целом, снижается производительность труда, увеличиваются количество простоев и объем затрат на ремонт и замену изношенных деталей [3, 4]. Например, по данным специалистов АО «Алмазы Анабара» ежегодные потребности закупки наконечников (коронок) рыхлителей, только для бульдозеров Komatsu D375A составляет 12000 единиц, весом более 200 тн. После износа коронок за год остается металла ориентировочно на 160 тн, который так же требует значительных затрат для утилизации.

Исходя из вышесказанного, нами разработана технологическая схема выплавки сплавов для изготовления отдельных деталей и узлов землеройной техники, в частности для бульдозеров «Komatsu D375A».

Цель: получение методом литья материалов с заданным комплексом свойств для изготовления рабочих органов горнодобывающей техники, эксплуатируемой в условиях Крайнего Севера.

Задачи:

– отработка технологии плавки и литья скрапа рабочих органов горнодобывающей техники с использованием газовой печи;

– подбор режимов термической обработки полученных стальных отливок;

– изучение структуры и основных физико-механических свойств экспериментальных литых сплавов.

Скрап материала коронок рыхлителя производства фирмы «NBLF» (КНР) представлял собой окатыши со средним размером 50х20х90 мм.

В качестве раскисляющих, легирующих и модифицирующих добавок использовались (приложение 1):

– Марганец металлический МН95 (ГОСТ 6008-90);
– Хром металлический Х98,5 (ГОСТ 5905-2004);
– Лигатура молибден МФТА (ТУ 48-4-365-88);
– Кремний поликристаллический КПС-1 (ТУ-48-4-174-77);
– Титан губчатый ТГ-120 (ГОСТ 17746-96);
– Иттрий металлический ИтМ-1 чистый (ТУ 48-4-208-72);
– Лантан металлический ЛаМ-1 (ТУ 48-4-218-72);
– Алюминий гранулированный чистый (МРТУ-6-09-5931-69);
– Алюминий фольга;
– Концентрат РЗМ (Томторское редкометальное месторождение).

Результаты опытной плавки в индукционной печи. Плавка производилась в индукционной печи СЭЛТ-ИПУ-75/80 с основной футеровкой. Перед плавкой произведена очистка стенок тигля, ковша для разливки металла, ремонт (заделка трещин и выбоин) футеровки тигля, ковша и сливного желоба смесью огнеупорной глины с шамотом с последующей окраской антипригарной смесью (рис. 1).

Рис. 1. Ремонт тигля, желоба и ковша

Размол глины, шамота и использованной формовочной смеси производился в дисковой мельнице «Pulverisette 13» фирмы «Fritsch». Песок был просеян через сито с размером ячеи 2 мм, просушен при температуре 120 ºС.

Стержень изготовлен формовкой в восковой модели коронки (рис. 2, *а*) с деревянным разборным коробом для хвостовика (знака). Внутренняя полость опоки образована восковой моделью со стержнем. Внутренние поверхности формы и стержень были покрыты антипригарной краской (рис. 2, *б, в*).

а) *б)* *в)*

Рис. 2. Стержень в восковой модели *а)* и нижняя опока со стержнем *(б, в)*

Масса скрапа составила 32,6 кг. Разделка производилась углошлифовальной машиной.

Время плавки до кипения металла – 52 мин. В момент расплавления металла производилось предварительное раскисление Mn и Al. Окончательное раскисление Al, Ti и добавка концентрата РЗМ производилось в ковше перед заливкой металла в форму.

Масса отливки после удаления литниковой системы – 16,950 кг. Химический состав полученной стали приведен в таблице 1.

Отлитая коронка (рис. 3, *а*) была подвергнута термомеханической обработке: ковка наконечника со степенью обжатия 50 % (рис. 3, *б*), закалка рабочей части с температуры 880 ºС в воду, самоотпуск при температуре около 250 ºС с охлаждением на воздухе.

а) *б)*

Рис. 3. Отлитая коронка *а)* и кованый наконечник *б)*

Для исследования влияния термической обработки на структуру и свойства полученной стали из стояка литниковой системы были вырезаны образцы, которые подвергались ТО по трем режимам:

– закалка и низкий отпуск;

– закалка и средний отпуск;

– закалка и высокий отпуск.

Твердость после литья составила 270 НВ (25 HRC). Закалка приводит к повышению твердости до 450–540 НВ (43–56 HRC). После низкого отпуска твердость незначительно снижается до 450–520 НВ (45–50 HRC). Повышение температуры отпуска до 400 ºС (средний отпуск) приводит к понижению твердости до 450-470 НВ (44–46 HRC). После высокого отпуска твердость образцов снизилась до значений 320–390 НВ (32–37 HRC).

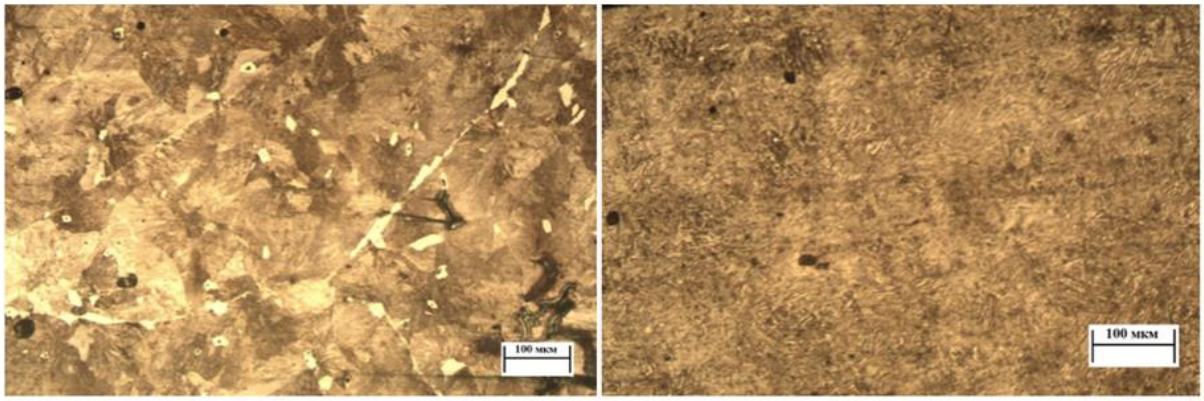
Произведенные измерения твердости коронки после термомеханической обработки коррелируются с данными по твердости образцов после ТО:

– в верхней части коронки (в районе посадочного отверстия) 230 НВ (20–23 HRC);

– в средней части 250–270 НВ (22–27 HRC);

– в нижней части (кованый наконечник) 430–540 НВ (45–55 HRC).

Результаты исследования микроструктуры образцов показали, что в состоянии после литья структура металла крупнозернистая, неоднородная, феррито-перлитная (рисунок 4, а). Ферритные скопления расположены в виде сетки, пересекающей крупные перлитные колонии.



а) *б)*

Рис. 4. Микроструктура образцов: *а)* после литья, *б)* после закалки и среднего отпуска

После закалки с последующим средним отпуском образуется равномерная игольчатая структура троостита отпуска – эвтектоидной смеси феррита и цементита, высокодисперсной разновидности перлита (рис. 4, *б*).

Выводы. Разработана рецептура шихты из скрапа изношенных элементов рабочего органа тяжелой горнодобывающей техники, произведен расчет состава раскисляющих добавок, микролегирующих РЗМ – модификаторов из местного минерального сырья. Произведен переплав элементов рабочих органов горнодобывающей техники, в частности коронок стойки рыхлителя бульдозера Komatsu D375A в индукционной плавильной печи.

Список литературы

1. Куприянова О.А. Высокопрочные хладостойкие стали нового поколения: история, современное состояние и перспективы развития // Сталь, 2023. №5. С. 45 – 51.
2. Ермаков Б.С., Слепцов О.И., Петров П.П. Перспективы развития металлургии в Якутии в связи и созданием новых поколений сталей Северного исполнения // Наука и образование. 2015. №3. С. 59 – 63.
3. Werner M.L., Pursche F. Modern high strength low alloyed steels: Proceedings of the lst International Conference about Recent Trends in Structural Materials. 2010. С. 13 – 18.
4. Филиппов Г.А., Морозов Ю.Д., Шлямнев А.П., Эфрон Л.И. Конструкционные материалы будущего // Сталь. 2004. №8. С. 69 – 78.

УДК 620.173.22/.187.22
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-221-223

ПОЛУЧЕНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ СЛОИСТОГО СТАЛЬНОГО КОМПОЗИТА

Сибиряков М.М.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: sibiryak.m88@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрено получение слоистого стального композита сваркой давлением (кузнечной сваркой) и его упрочнение равноканальным угловым прессованием (РКУП). Слоистый стальной композиционный материал получен кузнечной сваркой пластин из низколегированной стали 09Г2С и легированной углеродистой стали 40Х. Кроме того, кузнечной сварке подвергались пластины из 09Г2С. В результате РКУП получено повышение прочности слоистых сталей. Проведено РКУ-прессование объемной заготовки, полученной кузнечной сваркой 8-ми стальных пластин (09Г2С + 09Г2С) и (09Г2С + 40Х). Представлены данные по микроструктуре и пределу пропорциональности при испытаниях одноосным сжатием до и после РКУП. В результате воздействия РКУП предел пропорциональности слоистой стали 09Г2С увеличился в 1,7 раз в сравнении с материалом матрицы 09Г2С, а слоистого стального композита в 1,8 раз.*

Ключевые слова: *сталь, сварка давлением, кузнечная сварка, слоистый стальной композит, равноканальное угловое прессование, предел пропорциональности.*

PRODUCTION AND STRENGTHENING OF A LAMINATED STEEL COMPOSITE

Sibiryakov M.M.
Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *The paper considers the production of a layered steel composite by pressure welding (forge welding) and its strengthening by equal-channel angular pressing (ECAP). The layered steel composite material was obtained by forge welding of plates of low-alloy steel 09G2S and alloyed carbon steel 40H. In addition, plates of 09G2S were subjected to forge welding. ECAP resulted in an increase in the strength of the layered steels. ECA pressing was carried out on a bulk blank obtained by forge welding of 8 steel plates (09G2S + 09G2S) and (09G2S + 40H). Data on the microstructure and proportionality limit in uniaxial compression tests before and after ECAP are presented. As a result of the ECAP effect, the proportionality limit of the 09G2S layered steel increased by 1.7 times compared to the 09G2S matrix material, and the layered steel composite by 1.8 times.*

Keywords: *steel, pressure welding, forge welding, laminated steel composite, equal-channel angular pressing, proportional limit.*

Введение. Развитие техники и строительства сооружений требует применения современных материалов и технологий производства. В решении данного вопроса свою нишу нашли металломатричные композиционные материалы (ММКМ).

Преимущества ММКМ заключаются в возможности достижения определенных функциональных и служебных характеристик (прочность, пластичность, твердость, вязкость разрушения, износостойкость, электро- и теплопроводность, долговечность и др.) управлением структурой входящих в их состав компонентов.

Разработка и развитие методов получения ММКМ, обеспечивающих прочное соединение деталей, является актуальной научно-технической задачей. Кроме того, вопрос улучшения свойств ММКМ требует дальнейших исследований.

Существуют различные методы получения ММКМ. Армированные волокнами, слоистые, и дисперсно-упрочненные ММКМ позволяют им придавать специальные свойства [1]. Разработка и развитие методов получения ММКМ, в том числе сварки давлением (кузнечной сварки), обеспечивающих прочное соединение частей, требуют дальнейшего их усовершенствования. Как известно, соединение сталей в твердом состоянии сваркой давлением происходит в результате образования металлической связи между атомами контактирующих поверхностей. В вопросе повышения прочности ММКМ могут

получить применение методы интенсивной пластической деформации (ИПД) с формированием субмикро- и нанокристаллической структуры в составляющих ММКМ компонентах [2–5]. В [6] исследованы особенности получения многослойного ММК по схеме «фольга алюминиевого сплава 1565ч системы Al-Mg-Mn-Zn-Zr + волокно (бор) + фольга 1565ч» изотермическим прессованием в режиме низкотемпературной сверхпластичности. Отмечено его положительное влияние на механические свойства композита (предел прочности, ударная вязкость). Получение многослойного композита «сталь 08Х17Т + ванадиевый сплав V-10Ti-5Cr + сталь 08Х17Т» посредством кручения под высоким давлением (КВД) обеспечило к упрочнение слоев композита в 2–3,5 раза [7]. Для многослойного композита Al/Cu/Mg/Ni в [8] установлено, что удельная прочность композита возросла в 3,25 раз в сравнении с металлом матрицы (Al).

Целью работы является получение многослойных стальных систем 09Г2С + 09Г2С и 09Г2С + 40Х, их упрочнение и сравнение прочностных свойств.

Материал и методика исследования. Анализ химического состава сталей, составляющих композит, показал следующее: низколегированная сталь 09Г2С (в % – 0,12 C; 0,008 N; 0,5-0,8 Si; 0,035 P; 0,04 S; 0,3 Cr; 1,3-1,7 Mn; 0,3 Ni; 0,3 Cu; 0,08 As и остальное Fe) и коррозионно-стойкая легированная сталь 40Х (в % – 0,36 C; 0,27 Si; 0,02 P; 0,02 S; 0,97 Cr; 0,65 Mn; 0,03 Ni; 0,02 Cu и остальное Fe). Химический анализ проведен на оптико-эмиссионном спектрометре «Foundry-Master» фирмы «Worldwide Analytical Systems AG (WAS AG)» (Германия) в соответствии с ГОСТ 18895-97 (Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа).

Методика получения слоистого стального композита посредством кузнечной сварки заготовок из низколегированной стали 09Г2С и легированной углеродистой стали 40Х в соотношении 55:45 показана в [9]. Низколегированная сталь 09Г2С играет роль матрицы, в свою очередь, коррозионно-стойкая легированная сталь 40Х как армирующая компонента. Кроме того, кузнечной сварке подвергались пакеты пластин, составленные из 09Г2С. Для получения соединений 09Г2С + 09Г2С и 09Г2С + 40Х выполнялся нагрев пакета из 8-ми пластин (в случае композита с чередованием 09Г2С + 40Х) в кузнечном горне, с дальнейшей ковкой с помощью пневматического молота модели МВ4127 с температурой начала ковки 1523 К и окончания 1123 К. При этом температуру начала и конца ковки контролировали с помощью инфракрасного термометра модели DT-8859 с интервалом измеряемой температуры 223–1873 К, разрешением 0,1 градуса и спектральной чувствительностью 8~14 мкм.

РКУП слоистых заготовок выполнялось в специальной оснастке с углом пересечения каналов 120° с помощью гидравлического пресса «ПСУ 125» типа 3ИМ с максимальным усилием 1250 кН. РКУ-прессование слоистых соединений в один проход выполнялось параллельно плоскости слоев при температуре 823 К.

Для определения предела пропорциональности выполняли одноосное сжатие цилиндрических образцов размером ∅10×12 мм из стальных соединений на универсальной испытательной машине Zwick/Roell-Z600 (Германия) с максимальным усилием 60 кН при скорости движения траверсы $8{,}33 \cdot 10^{-6}$ м·с$^{-1}$. При этом сжатие образцов выполняли в направлении параллельном слоям слоистого стального материала до 25 % деформации. Для уменьшения силы трения между образцом и опорами испытательной машины торцы образцов смазывали.

Результаты исследований и их обсуждение. Значения предела пропорциональности для соединений представлены в таблице.

Таблица Предел пропорциональности слоистых стальных соединений

Состояние	$\sigma_{пц}$, МПа
1. 09Г2С (d = 7,8 ± 0,8 мкм)	364 ± 40
2. Соединение 09Г2С + 40Х после кузнечной сварки (09Г2С: d = 5,2 ± 0,5 мкм, 40Х: d = 4,1 ± 0,4 мкм, граница шириной 10,2 ± 1,0 мкм: d = 4,1 ± 0,4 мкм)	454 ± 45
3. Соединение 09Г2С + 09Г2С после кузнечной сварки и РКУП. (d = 4,9 ± 0,5 мкм)	631 ± 62
4. Соединение 09Г2С + 40Х после кузнечной сварки и РКУП (09Г2С: d = 3,5 ± 0,3 мкм, 40Х: d = 4,2 ± 0,4 мкм, граница шириной 4,3 ± 0,4 мкм: d = 5,0 ± 0,5 мкм)	657 ± 65

Как видно из таблицы, кузнечная сварка различных марок сталей 09Г2С и 40Х обеспечивает повышение предела пропорциональности $\sigma_{пц}$ в 1,25 раз относительно 09Г2С за счет более прочной составляющей – стали 40Х. РКУП в один проход при температуре 823 К обеспечило повышение $\sigma_{пц}$ для соединения 09Г2С + 09Г2С в 1,7 раз в сравнении с материалом матрицы 09Г2С, а для слоистого стального композита 09Г2С + 40Х в 1,8 раз относительно 09Г2С и в 1,4 раза в сравнении с состоянием после кузнечной сварки.

Заключение. Таким образом, разработанная методика показала возможность получения слоистых стальных соединений из одной марки сталей (09Г2С + 09Г2С) и из сталей различных марок с разным количеством содержания углерода – 09Г2С (0,12 % С) + 40Х (0,36 % С) сваркой давлением (кузнечной сваркой) с сохранением целостности заготовок. Результаты проведенных исследований показали, что повышение предела пропорциональности соединений 09Г2С + 09Г2С и композита 09Г2С + 40Х в результате больших пластических деформаций, достигнутых равноканальным угловым прессованием, обусловлено, по-видимому, измельчением зерен, повышением плотности дислокаций и уменьшением параметра кристаллической решетки, в основном, в низколегированной стали 09Г2С.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0035 Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова ФИЦ ЯНЦ СО РАН Программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Крейдер К.Г. Введение в композиционные материалы с металлической матрицей / В книге Композиционные материалы под ред. Браутмана Л., Крока Р. Том 4. Композиционные материалы с металлической матрицей / Под ред. Крейдера К. Пер. с анг. М.: Машиностроение, 1978. 504 с. С. 11-47.
2. Бриджмен П.У. Исследование больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. Пер. с англ. Изд. 2. М.: Изд-во иностранной литературы, 1955. 448 с.
3. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И., Павлик Д.А., Малышев В. Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
4. Валиев Р.З., Жиляев А.П., Лэнгдон Т.Дж. Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы и применения. СПб.: Эко-Вектор, 2017. 479 с.
5. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов. С-Пб.: Наукоемкие технологии, 2020. 185 с.
6. Бобрук Е.В., Рамазанов И.А., Астанин А.А. Эволюция микроструктуры и механические свойства металломатричного композита Al-B с ультрамелкозернистой алюминиевой матрицей // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27. № 4. С. 22-33.
7. Никулин С.А., Рогачев С.О., Рожнов А.Б., Хаткевич В.М., Нечайкина Т.А. Структура и свойства слоистого композита сталь / ванадиевый сплав / сталь, полученного кручением под высоким давлением // Деформация и разрушение материалов. 2015. №2. С. 6-9.
8. Шакури С., Эгхбали Б. Характеристика микроструктуры и механических свойств многослойного композита Al/Cu/Mg/Ni, полученного аккумулируемой прокаткой с соединением // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120. №8. С. 867-877.
9. Сибиряков М.М., Иванов А.М., Сыромятникова А.С., Ващенко С.С., Степанова К.В. Получение стального слоистого композиционного материала. С. 125 / Перспективные материалы и технологии: материалы международного симпозиума, Витебск, 25-29 августа 2025 г. / Под ред. Рубаника В.В. Минск: ИВЦ Минфина, 2025. 299 с.

УДК 543.422.25:661.666.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-224-227

ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ НАНОАЛМАЗОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ ДЕТОНАЦИОННОГО СИНТЕЗА И МЕХАНИЧЕСКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ, ДО И ПОСЛЕ ИХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Сивцева А.В.[1], Акимова М.П.[2], Шарин П.П.[1], Яковлева С.П.[1], Протопопов Ф.Ф.[3], Корякина В.В.[4]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[3]Физико-технический институт СВФУ им. М.К. Аммосова
[4]Институт естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова
E-mail: sianva@yandex.ru

Аннотация. *Проведено исследование влияния термической обработки на состав кислородсодержащих функциональных групп природных (ПНА) и детонационных (ДНА) наноалмазов методами ИК-Фурье-спектроскопии и обратного титрования по Боэму. Установлено, что отжиг на воздухе при температуре 550 °С приводит к изменению соотношения гидроксильных и карбонильных групп, частичному удалению неалмазных форм углерода и повышению степени упорядоченности структуры поверхности. Полученные результаты согласуются с данными РФЭС и подтверждают эффективность термообработки для очистки наноалмазов.*

Ключевые слова: *наноалмазы, ИК-спектроскопия, детонационный синтез, механическое измельчение, функциональные группы, термообработка.*

IR SPECTROSCOPY OF NANODIAMONDS OBTAINED BY DETONATION SYNTHESIS AND MECHANICAL MILLING BEFORE AND AFTER THERMAL TREATMENT

Sivtseva A.V.[1], Akimova M.P.[2], Sharin P.P.[1], Yakovleva S.P.[1], Protopopov F.F.[3], Koryakina V.V.[4]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS
[2]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS
[3]M.K. Ammosov NEFU Institute of Physics and Technologies
[4]M.K. Ammosov NEFU Institute of Natural Sciences

Abstract. *The effect of thermal treatment on the composition of oxygen-containing functional groups in natural (NND) and detonation (DND) nanodiamonds was studied using FTIR spectroscopy and Boehm titration. It was found that annealing in air at 550 °C alters the ratio of hydroxyl and carbonyl groups, removes non-diamond carbon forms, and improves the ordering of the surface structure. The results are consistent with XPS data and confirm the effectiveness of thermal treatment for nanodiamond purification.*

Keywords: *nanodiamonds, FTIR spectroscopy, detonation synthesis, functional groups, thermal treatment, surface structure.*

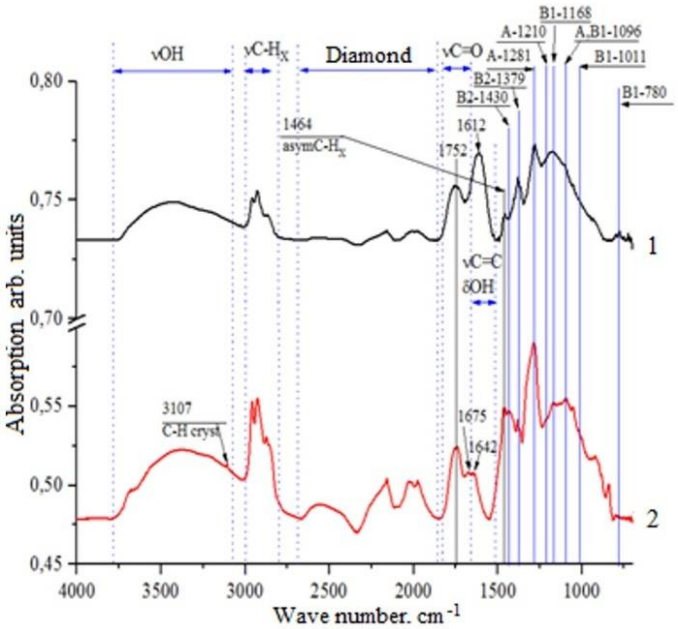
Для изучения состава и содержания различных кислородсодержащих функциональных групп образцов природного (ПНА) и детонационного (ДНА) наноалмаза проводились исследования с использованием методов ИК Фурье спектроскопии с помощью Фурье-спектрометра Perkin Elmer Spectrum Two (Perkin Elmer inc., США) в спектральном диапазоне 4000 – 650 см$^{-1}$ с усреднением не менее 4-х спектров и с разрешением 4 см$^{-1}$ и методом обратного титрования по Боэму [1-3]. При обратном титрировании количество ионогенных функциональных групп (U) рассчитывалось по формуле [3]:

$$U = V_{base\ 0} \cdot C_{base\ fg} / m, \quad (1)$$

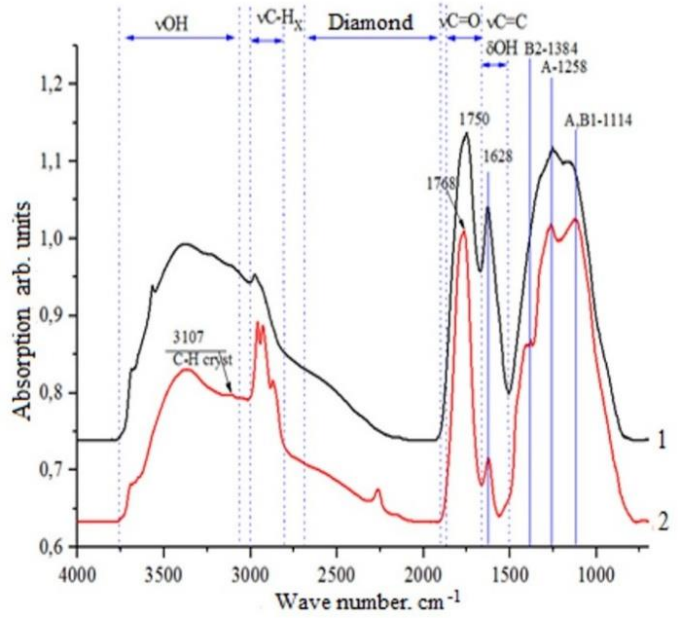
где m – масса взятой навески порошка наноалмаза, $V_{base\ 0}$ – объем основания, добавленного к навеске, $C_{base\ 0}$ – исходная концентрация основания, $C_{base\ fg}$ – концентрация основания по достижении равновесного состояния.

ИК-спектры поглощения образцов порошков ПНА и ДНА до и после их термической обработки приведены на рис. 1. В диапазоне 1800-2700 см$^{-1}$ находится область поглощения, соответствующая алмазной кристаллической решетке. В ИК спектрах ПНА и ДНА, полученных после отжига на воздухе,

полосы поглощения в области 1800-2700 см$^{-1}$ становятся более четкими и различимыми, что, видимо, обусловлено частичным удалением оболочки алмазного кристаллического ядра, состоящей в основном из неалмазных форм углерода [4, 5]. Валентные колебания связей С-Н при насыщенном (sp^3-гибридизованном) атоме углерода в области 2800-3000 см$^{-1}$ [6] четко проявляются после отжига в спектрах образцов нанопорошков как ПНА, так и ДНА.



а)



б)

Рис. 1. ИК спектры поглощения нанопорошков ПНА *а)* и ДНА *б)* до (кривая 1) и после (кривая 2) отжига при температуре 550 °С

Наблюдается увеличение интенсивности полос поглощения при 1464, 1430, 1384, 1379 см$^{-1}$, которые относят к деформационным колебаниям связи С-Н при насыщенном атоме углерода [7–9]. Полосы валентных и деформационных колебаний С-Н связи при алифатическом (sp^3-гибридизованном) углероде также могут указывать на то, что алмазное кристаллическое ядро частично очистилось от неалмазной и аморфной форм углерода. Об этом также указывает малоинтенсивный острый пик при частоте 3107 см$^{-1}$, появившийся после термообработки порошков ПНА и ДНА, и который обусловлен колебаниями связи С-Н алмазной кристаллической решетки.

Поглощение в области 1650–1850 см$^{-1}$ в ИК спектре ультрадисперсного алмаза относят, как правило, к валентным колебаниям карбонильной группы, которая может входить в состав альдегидных,

кетонных, карбоксильных, сложноэфирных, лактонных и ангидридных групп [7–9]. При этом пик при 1735–1750 см$^{-1}$, наблюдаемый в спектрах нанопорошков ПНА и ДНА, относят к поглощению карбонила карбоксильной группы. Полосы поглощения в области 1750-1810 см$^{-1}$, относят к колебаниям карбонильной группы, входящей в состав лактонов и ангидридов. О присутствии лактонов, ангидридов и эфирной группировки также может свидетельствовать полоса поглощения в области 1100–1140 см$^{-1}$ (антисимметричные колебания группы С-О-С) и в области 1254–1270 см$^{-1}$ (колебания С-О группы эфиров, эпоксидов) [6]. Однако, в случае ангидридной группы на ИК спектре в области 1750–1810 см$^{-1}$ должен всегда наблюдаться двойной пик [9], что не проявилось в спектрах ни ПНА, ни ДНА. Таким образом, можно сделать вывод, что определенное титрометрическим методом количество лактонных и ангидридных групп фактически принадлежит к лактонным группам.

Полосы поглощения в области 1500–1650 см$^{-1}$ относят к валентным колебаниям связи С=N, С=С (sp^2-гибридизованного углерода), а также к деформационным колебаниям ОН-группы. Как видно из ИК спектров нанопорошков ПНА и ДНА до и после отжига на воздухе, интенсивность полосы поглощения в этой области по сравнению с интенсивностью полосы поглощения в области карбонильной группы С=О (1650–1850 см$^{-1}$), заметно уменьшились, согласуется с результатами, полученными при титровании, и данными РФЭС. Таким образом, при термообработке происходит уменьшение оболочки алмазного ядра, содержащей в основном неалмазные формы углерода (sp^2-гибридизованного углерода) и гидроксильных функциональных групп, что отражается на уменьшении интенсивности полос поглощения в ИК области 1500–1650 см$^{-1}$.

Таблица 1. Содержание кислородсодержащих групп в образцах ДНА и ПНА, определенное по интенсивности полос поглощения ИК-спектров

Функциональные группы	А, отн.ед.			
	ПНА		ДНА	
	Исх.	550°С	Исх.	550°С
Гидроксильные (1612-1640 см$^{-1}$)	1	0,39	0,63	0,22
Лактонные Карбоксильные Карбонильные (1675–1768 см$^{-1}$)	0,62	1*	1	1

Следует отметить, что смещение максимума полосы поглощения карбонильной группировки с 1750 до 1768 см$^{-1}$ в ИК спектре ДНА после термической обработки также может быть обусловлено уменьшением оболочки алмазного ядра. Некоторое количество карбонильной группировки в составе карбоксильных, лактонных и кетоновых функциональных групп была сопряжена с кратными связями углерода (т. е. с sp^2-гибридизованными атомами углерода, принадлежащими оболочке алмазного кристаллического ядра), что способствует понижению частоты валентных колебаний связи С=О [8, 9]. При уменьшении количества sp^2-гибридизованных атомов углерода, уменьшилось и их воздействие на связь С=О, что объясняет, почему при уменьшении количества лактонных групп (увеличивающих частоту колебания связи С=О) в образце ДНА после термообработки полоса поглощения карбонильной группы в ИК-спектре сдвигается в сторону увеличения частот колебания, хотя должно быть наоборот.

Соотношение ОН- и СОО- групп в исходном ПНА по результатам титрования 16:10 = 1:0,63, что фактически соответствует данным, приведенным в табл.1, и соотношению 1:0,62, полученным из ИК спектра. Это указывает на то, что в исходном образце ПНА кислородсодержащие группы представлены гидроксильными и карбоксильными с полученным соотношением. После термической обработки соотношение ОН- и СОО- групп в образце ПНА по результатам титрования 9:20 = 0,45:1, и хотя в целом эта инверсия подтверждается данными ИК спектра с соотношением 0,39:1, но такое малое соотношение говорит о том, что С=О группа находится не только в составе карбоксильной, но и в карбонильной форме. Об этом указывает появление пика при 1675 см$^{-1}$.

В исходном образце ДНА содержание гидроксильных и суммы лактонных и карбоксильных групп по результатам титрования соотносятся, как 124:127 = 0,98:1, что на качественном уровне подтверждается данными из табл.1. Однако, соотношение 0,63:1, полученное из данных полос поглощения в ИК спектре, указывает на то, что в образце ДНА содержатся и другие кислородсодержащие группы, которые не определяются титрованием по методу Боэма. Это могут быть карбонильные группы, не входящие в состав других функциональных групп. После термической обработки соотношение гидроксильных- и суммы карбоксильных и лактонных групп в образце ДНА по результатам титрования

составляет как 45:218 = 0,21:1, и подтверждается данными ИК-спектра с соотношением 0,22:1. Это может указывать на то, что в образце ДНА после термообработки кислородсодержащие группы представлены в основном, гидроксильными и карбоксильными группами с приблизительным соотношением 0,2:1.

Список литературы

1. Peristyy A., Paull B., Nesterenko P.N. (2016) Ion-exchange properties of microdispersed sintered detonation nanodiamond. *Adsorption*, vol. 22, pp. 371–383. DOI: https://doi.org/10.1007/s10450-016-9786-9
2. Shakun A., Anyszka R., Essi S., Anke B., Vuorinen J. (2019) Influence of surface modified nanodiamonds on dielectric and mechanical properties of silicone composites. *Polymers*, vol. 11, no. 7, p. 1104. DOI: https://doi.org/10.3390/polym11071104
3. Полянская Е.М., Таран О.П. Исследование функциональных групп на поверхности окисленного углеродного материала Сибунит методами кислотно-основного титрования и РФЭС // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2017. № 10. С. 6–26. DOI: 10.17223/24135599/10/3.
4. Osswald S., Yuchin G., Mochalin V., Kucheyev S.O., Gogotsi Y. (2006) Control of sp^2/sp^3 carbon ratio and surface chemistry of nanodiamond powders by selective oxidation in air. *Journal of the American Chemical Society*, vol. 128, no. 35, pp. 11635–11642. DOI: 10.1021/ja063303n.
5. Stehlik S., Varga M., Ledinsky M., Jirasek V., Artemenko A., Kozak H., Ondic L., Skakalova V., Argentero G., Pennycook T., Meyer J.C., Fejfar A., Kromka A., Rezek B. (2015) Size and purity control of HPHT nanodiamonds down to 1 nm. *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no. 49, pp. 27708–27720. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b05259
6. Scofield J.H. (1976) Hartree–Slater subshell photoionization cross-sections at 1254 and 1487 eV. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, vol. 8, pp. 129–137. DOI: 10.1016/0368-2048(76)80015-1
7. Tsapyuk G.G., Diyuk V.E., Mariychuk R., Panova A.N., Loginova O.B., Grishchenko L.M., Dyachenko A.G., Linnik R.P., Zaderko A.N., Lisnyak V.V. (2020) Effect of ultrasonic treatment on the thermal oxidation of detonation nanodiamonds. *Applied Nanoscience*, no. 10, pp. 4991–5001. DOI: 10.1007/s13204-020-01277-2
8. Сильверстейн Р., Вебстер Ф., Кимл Д. Спектрометрическая идентификация органических соединений: пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 557 с.
9. Volkov D.S., Krivoshein P.K., Proskurnin M.A. (2020) Detonation nanodiamonds: a comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection FTIR spectroscopies. *Nanomaterials*, vol. 10, no. 12, p. 2501. DOI: https://doi.org/10.3390/nano10122501

УДК 621.891:669.35’5:661.666.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-228-232

ЗАВИСИМОСТЬ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЛОВЯННОЙ БРОНЗЫ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ЧАСТИЦ НАНОАЛМАЗА

Сивцева А.В.[1], Акимова М.П.[2], Шарин П.П.[1], Яковлева С.П.[1], Стручков Н.Ф.[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: sianva@yandex.ru

Аннотация. *Исследовано влияние содержания детонационных наноалмазов (ДНА) на трибологические характеристики оловянной бронзы состава 80% Cu – 20% Sn. Композиты с добавками 0,5–3,0 мас.% ДНА получены методом горячего прессования. Установлено, что введение 1,5 мас.% ДНА обеспечивает оптимальное сочетание характеристик: коэффициент трения снижается на 18%, массовый износ – на 26%, линейный – на 21%. Показано, что наноалмазы распредлены равномерно в объеме матрицы и способствуют повышению износостойкости бронзовых композитов.*

Ключевые слова: *оловянная бронза, наноалмазы, ультразвуковое диспергирование, трибологические свойства, композиционные материалы, износостойкость.*

DEPENDENCE OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF TIN BRONZE ON THE CONTENT OF NANODIAMOND PARTICLES

Sivtseva A.V.[1], Akimova M.P.[2], Sharin P.P.[1], Yakovleva S.P.[1], Struchkov N.F.[1]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of North SB RAS
[2]Federal Research Centre “Yakutsk Scientific Centre” SB RAS

Abstract. *The effect of detonation nanodiamond (DND) content on the tribological characteristics of tin bronze (80% Cu – 20% Sn) was investigated. Composites containing 0.5–3.0 wt.% DND were fabricated by hot pressing. It was found that the addition of 1.5 wt.% DND provides optimal performance: the friction coefficient decreases by 18%, mass wear by 26%, and linear wear by 21%. Nanodiamond are distributed uniformly throughout the matrix volume and contribute to increased wear resistance of bronze composites..*

Keywords: *tin bronze, nanodiamonds, ultrasonic dispersion, tribological properties, composite materials, wear resistance.*

Исходными материалами являлись порошки меди марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) и олова ПО1 (ГОСТ 9723-73) со средним размером частиц 40 мкм и наноалмазы детонационного синтеза (ДНА) марки УДА-С-ГО производства ФНПЦ «Алтай». Соотношение металлических порошков соответствовало стандартному составу оловянной бронзы (ОБ) 80% Cu – 20% Sn. Были подготовлены образцы ОБ и три группы образцов композиционного материала, в которых содержание наноалмазов составляло 0,5, 1,5 и 3,0 масс. %. Технология изготовления образцов материалов включала следующие операции:

– термомодифицирование ДНА для очистки и функционализации поверхности частиц наноалмаза окислением на воздухе, для чего порошок ДНА отжигали на воздухе при температуре 500 °С в течение 5 ч;

– получение рабочей шихты с использованием метода ультразвукового диспергирования [1–4] с помощью ультразвукового гомогенизатора Hielscher UP200St (Ultrasound Technology) в этиловом спирте при температуре 75 °С в течение 25 минут, после чего суспензию выдерживали в сушильном шкафу при температуре 100 °С в течение 45 минут до полного испарения спирта;

– изготовление образцов виде таблеток диаметром 10 мм и высотой 5 мм методом горячего прессования рабочей шихты при температуре 450 °С, усилии 30 кН, длительности прессования 15 с.

Исследование структуры полученных образцов проводили при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6480LV (JEOL, Япония). Фазовый анализ образцов был проведен с помощью дифрактометра D2 PHASER в CuKα излучении (λ = 1,54056 Å), углах сканирования от 20 до 95°. Для проведения съемки образцы помещали в кювету с наполнителем из галита (NaCl).

Определение триботехнических характеристик (коэффициент трения, линейный и массовый износ) проведено с помощью универсального трибометра UMT-3MT (Производитель CETR, США) по схеме “палец-диск” путем сухого скольжения по поверхности контртела из нержавеющей стали AISI

304, расстояние от центра диска до образца 25 мм. Условия испытаний: нагрузка F=30Н, частота вращения вала *v*=60 об/мин=0,157 м/мин, время t=2400 с.

Шероховатость поверхностей трения образцов измерена профилометром Surftest SJ-201 (Mitutoyo, Япония) до и после испытаний на износ. Обработка профилограмм проведена в электронных таблицах Excel с усреднением данных по всей поверхности образцов КМ.

Как видно на рис. 1, дифрактограммы всех образцов КМ, независимо от содержания наноалмазной добавки, идентичны, и фазовый состав металлической матрицы качественно соответствует фазовому составу образца оловянной бронзы ОБ. Пики от алмазной составляющей, обычно возникающие при отражении от плоскостей (111) и (220) при углах Брэгга, равных ≈44 º и ≈75 º соответственно, на рис. 1*, б-г* четко не проявляются. Это может объясняться наноразмерной величиной частиц алмаза, вызывающей размывание дифракционных максимумов и снижение их интенсивности, что способствует перекрытию линий алмаза интенсивными линиями меди, наблюдающимися при близких углах отражения около 43° и 74°. Небольшой пик при угле отражения около 26°, идентифицированный как соединение Cu_3Sn, может указывать на присутствие фазы графита. Слабая интенсивность пика свидетельствует о том, что наноалмазы практически не выгорают и не переходят в фазу графита в процессе отжига и горячего прессования КМ.

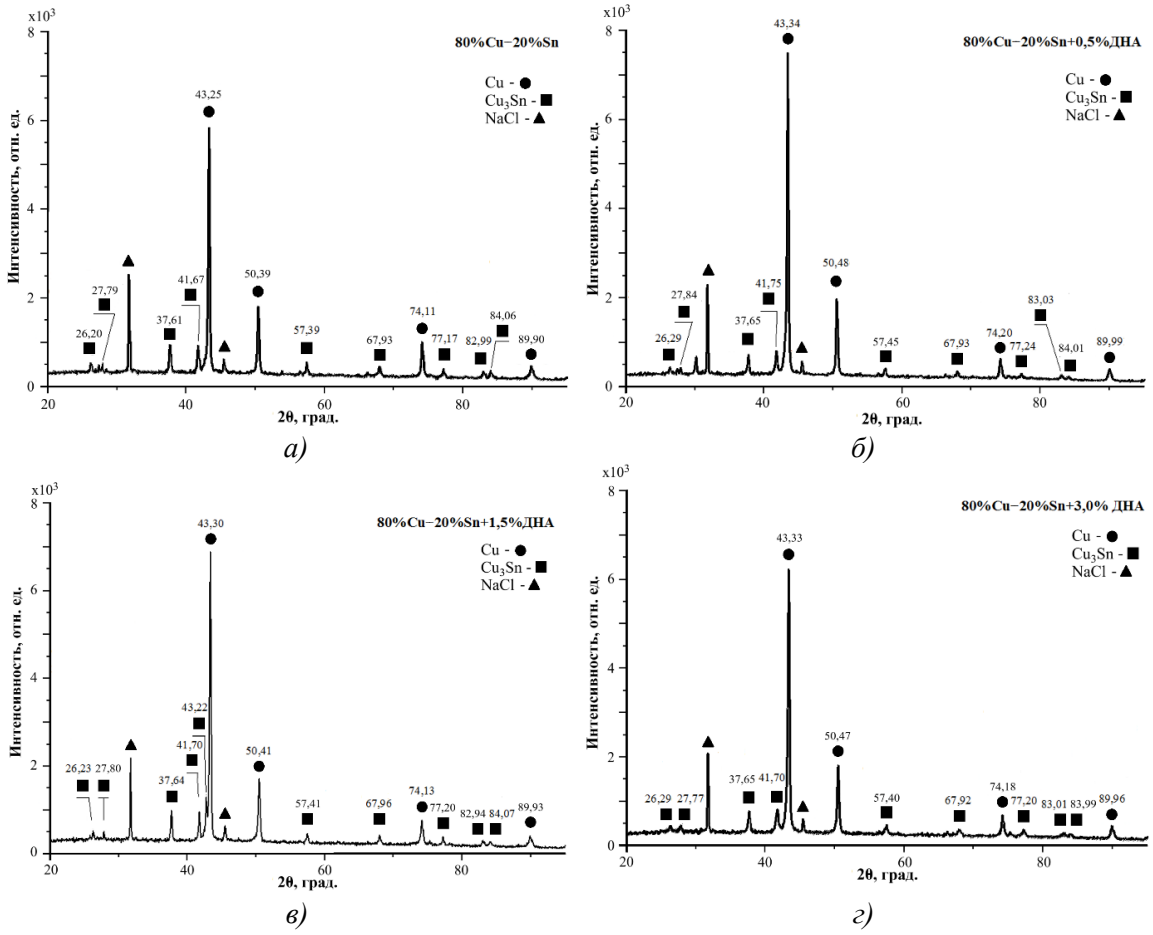
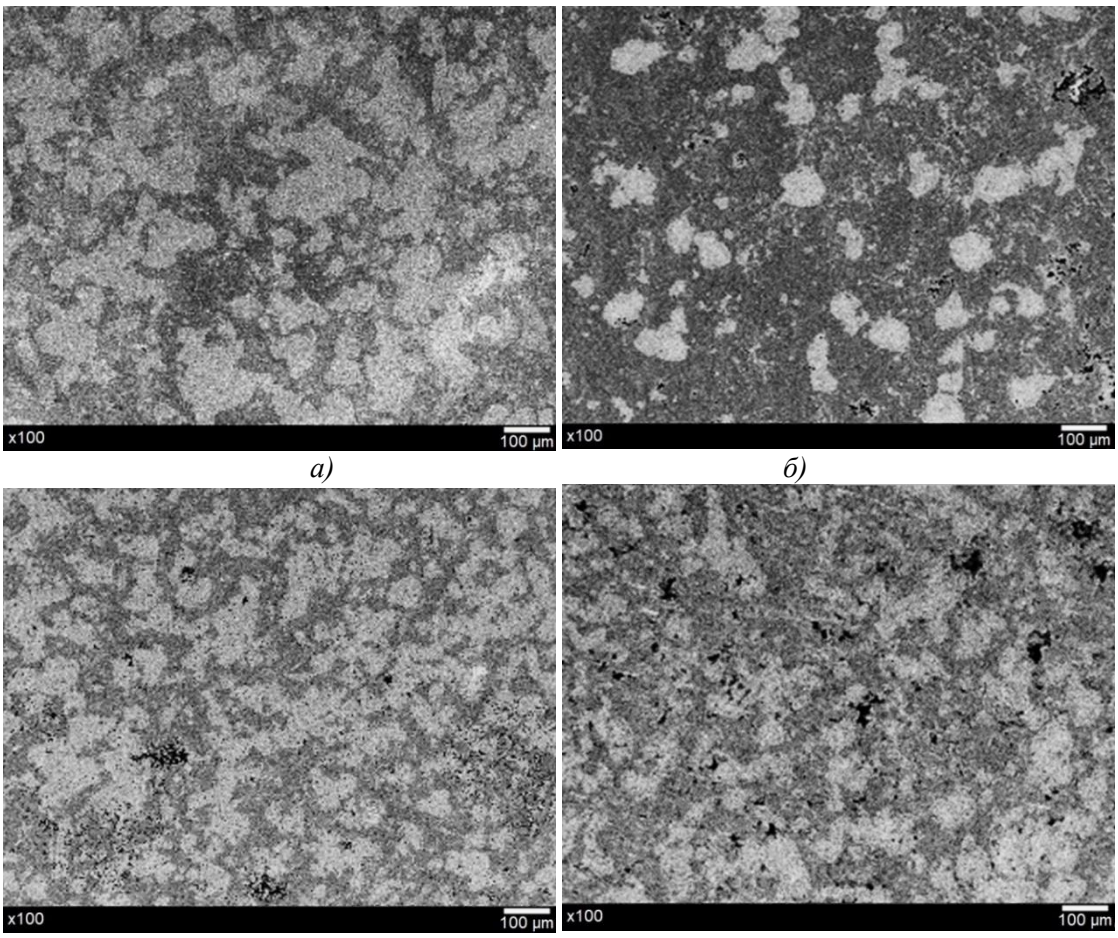


Рис. 1 Дифракционные спектры образцов: *а)* – ОБ без добавок; *б)* – КМ с 0,5% ДНА; *в)* – КМ с 1,5% ДНА; *г)* – КМ с 3,0% ДНА

На изображениях микроструктуры исследуемых образцов (рис. 2), полученных с помощью растрового электронного микроскопа в режиме обратно-рассеянных электронов при увеличении x100. Исходный образец ОБ без добавления модификатора имеет двухфазную структуру (рис. 2, *а*).



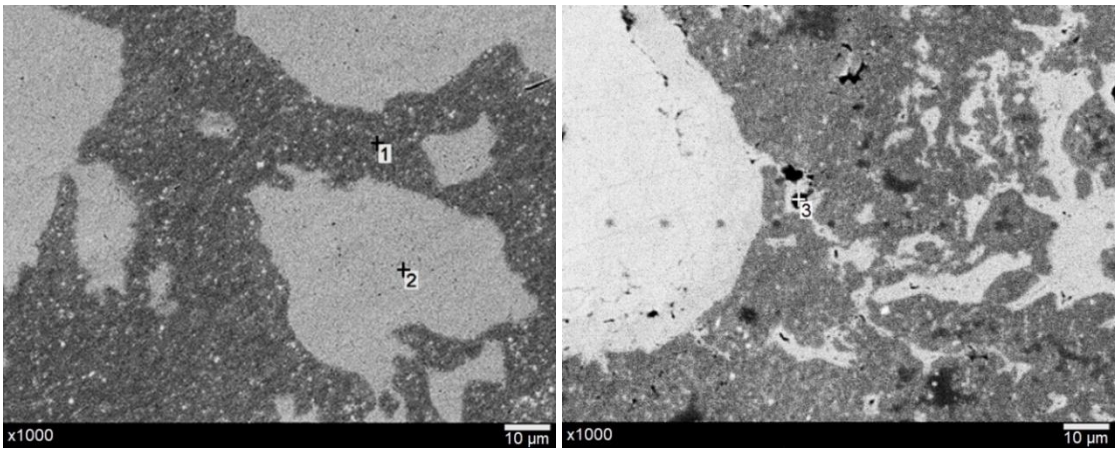
а) *б)*

в) *г)*

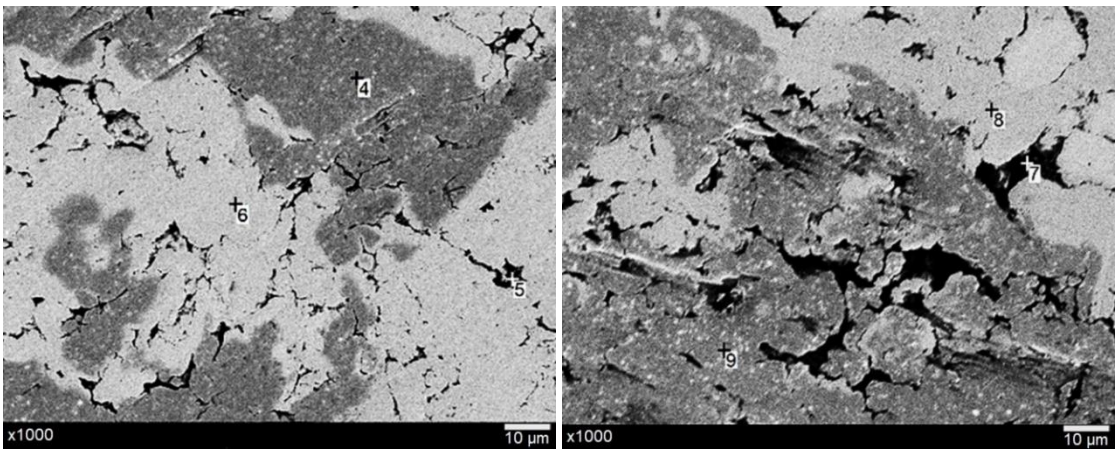
Рис. 2 Структура образцов при увеличении x100: *а)* – ОБ без добавок; *б)* – КМ с 0,5% ДНА; *в)* – КМ с 1,5% ДНА; *г)* – КМ с 3,0% ДНА (SEM-BSE)

В КМ наноалмазные частицы (темные включения на рис. 2, *б-г*) распределены по объему металлической матрицы достаточно равномерно, но по мере увеличения их содержания появляются агломераты наночастиц.

На рис. 3 представлена микроструктура образцов при увеличении x1000. Проведён микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих в точках, отмеченных на рис. 3 цифрами; результаты элементного анализа приведены в табл. 1. В процессе горячего прессования олово, имеющее температуру плавления ≈232 ºС, плавится и проникает в межчастичное пространство меди. Диаграмма состояния медь-олово показывает, что температура ≈450 °С соответствует области существования α-твердого раствора олова в меди Cu(Sn); поэтому в результате перекристаллизации меди через расплав олова происходит формирование твердого раствора.



а) *б)*



в) *г)*

Рис. 3 Структура образцов при увеличении x1000: *а)* – ОБ без добавок; *б)* – КМ с 0,5% ДНА; *в)* – КМ с 1,5% ДНА; *г)* – КМ с 3,0% ДНА (SEM-BSE)

Как следует из таблицы 1, темно-серые области на изображениях микроструктуры (рис. 2, 3) соответствуют α-твердому раствору с переменной концентрацией олова. Также согласно данным табл. 1 и картинам микроструктуры, во всех в образцах сохраняется медь. Твердый раствор олова в меди Cu(Sn) имеет гранецентрированную кубическую решетку с периодом a = 3,665 Å. Период ГЦК решетки меди a = 3,607 A˚. Очевидно, в силу близости этих параметров и, соответственно, близости углов дифракции, происходит рентгенографическое наложение пиков твердого раствора Cu(Sn) и меди на рис. 1. Помимо этих двух фаз в образцах присутствует электронное соединение Cu_3Sn, которое, образовавшись в местах контакта меди и олова, локализуется преимущественно на границах раздела медь-олово. Наноалмазные включения тоже в основном концентрируются на границах зерен матричного сплава (рис. 3, *б-г*). Зарегистрированный при микрорентгеноспектральном анализе кислород (табл. 1), входит в состав функциональных групп на поверхности частиц наноалмаза.

Таблица 1. Элементный состав микроучастков образцов КМ с различным содержанием добавок ДНА (рис. 3)

Точки замера	Элементный состав			
	Cu, ат.%	Sn, ат.%	C, ат.%	O, ат.%
1	100,00	-	-	-
2	71,99	28,01	-	-
3	5,24	2,24	61,34	31,18
4	100	-	-	-
5	-	3,14	83,33	13,53
6	70,74	29,26	-	-
7	3,04	1,58	86,96	8,43
8	73,70	26,30	-	-
9	100	-	-	-

Трибологические свойства являются одной из ключевых характеристик материалов, поскольку от них существенно зависят работоспособность, надежность и ресурс получаемых изделий. На рис. 4 приведена зависимость коэффициента трения, массового и линейного износа образцов КМ от концентрационного содержания ДНА. Видно, что увеличение содержания частиц ДНА вызывает снижение коэффициента трения композитов с 0,73 до 0,60. Изменение массового и линейного износа носит нелинейный характер. При содержании 0,5 и 3,0 масс.% ДНА уровень износа оказывается чуть выше, чем у исходной металлической матрицы. При добавлении 1,5 масс.% ДНА массовый износ снижается на 26% и составляет $0{,}31 \cdot 10^{-2}$ г , линейный износ снижается на 21% и составляет $0{,}51 \cdot 10^{-4}$ м, то есть внесение ДНА в количестве 1,5 масс.% существенно улучшает показатели по сравнению с образцом ОБ без добавок.

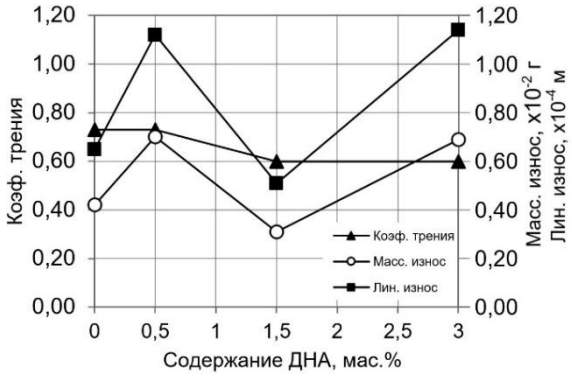


Рис. 4. Трибологические характеристики КМ в зависимости от содержания частиц ДНА

В таблице 2 приведены значения среднего арифметического отклонения профиля образцов КМ с различным содержанием наноалмазных добавок и соответствующих контртел из нержавеющей стали до и после трибологических испытаний. Видно, что что после испытаний на трение шероховатость поверхности всех образцов и контртел возросла на порядок.

Значения шероховатости Ra поверхности образцов КМ с добавками ДНА после трения выше по сравнению с шероховатостью образца исходной металлической матрицы на основе ОБ без добавок. Минимальное значение шероховатости 2,61±0,38 мкм достигается при содержании 1,5 масс.% наноалмазных добавок. Шероховатость поверхности контртел, работавших в паре с образцами КМ с различным содержанием наноалмазов, сначала незначительно возрастает, затем снижается, достигая минимального значения 0,53±0,07 мкм при содержании 1,5 масс. % ДНА.

Таблица 2. Профиль неровностей образцов с различным содержанием ДНА и соответствующих контртел

Концентрация ДНА, масс.%	Шероховатость Ra, мкм		Контртело	Шероховатость Ra, мкм	
	Исходная	После трения		Исходная	После трения
0	0,20±0,06	2,09±0,17	1	0,04	0,81±0,04
0,5	0,29±0,11	5,63±1,89	2	0,05	1,02±0,36
1,5	0,26±0,10	2,61±0,38	3	0,05	0,53±0,07
3,0	0,53±0,04	2,69±0,30	4	0,05	0,72±0,08

Таким образом, по результатам трибологических испытаний экспериментальных композиционных материалов на основе оловянной бронзы с наноалмазными частицами можно заключить, что введение наноалмаза в количестве 1,5 масс. % улучшило трибологические характеристики оловянной бронзы состава 80% Cu–20% Sn: коэффициент трения снизился на 18% , массовый износ – на 26%, линейный износ – на 21% .

Список литературы

1. Шарин П.П. Новый метод приготовления твердосплавной шихты с упрочняющими наночастицами для изготовления матриц алмазных инструментов // *Вестник СВФУ*. 2016. Т. 51. № 1. С. 78–87. DOI: 10.25587/svfu.2016.51.1.011
2. Li B., Mei T., Chu H., Wang J., Du S., Miao Y., Zhang W. (2021) Ultrasonic-assisted electrodeposition of Ni/diamond composite coatings and their structure and electrochemical properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 73, pp. 105475. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105475
3. Hanada K., Nakayama K., Sano T., Imahori A., Negishi H., Mayuzumi M. (2000) Fabrication and characterization of cluster diamond dispersed copper-based matrix composite. *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 3, pp. 325–345. DOI: 10.1080/10426910008912991
4. Liang Y., Meinhardt T., Jarre G., Ozawa M., Vrdoljak P., Schöll A., Reinert F., Krueger A. (2011) Deagglomeration and surface modification of thermally annealed nanoscale diamond. *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 354, no. 1, pp. 23–30. DOI: 10.1016/j.jcis.2010.12.070
5. Dieringa H., Katsarou L., Buzolin R., Szakacs G., Hostmann M., Wolf M., Mendis C., Vorozhtsov S., StJohn D. (2017) Ultrasound Assisted Casting of an AM60 Based Metal Matrix Nanocomposite. *Metals*, vol. 7, no. 10, pp. 388. DOI: https://doi.org/10.3390/met7100388

УДК 620.186
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-233-236

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ГРУЗОВОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Стручков Н.Ф. [1], *Винокуров Г.Г.* [1], *Васильева М.И.* [1], *Климова А.М.* [2]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
E-mail: struchkov_n@rambler.ru

Аннотация. *В статье приведены результаты исследований состава, свойств и структуры втулки и пальца задней рессоры грузового автомобиля, эксплуатируемого в низкотемпературных климатических условиях Севера. Определены уровни значений твердости и микротвердости упрочненного слоя и центральной части пальца. Показаны профили поверхностей изношенных деталей до и после эксплуатации.*

Ключевые слова: *деталь, износ, микротвердость, шероховатость, профиль, структура.*

STRUCTURE AND PROPERTIES OF PARTS OF THE CHASSIS TRUCK VEHICLES OPERATED IN NORTHERN CONDITIONS

Struchkov N.F.[1], *Vinokurov G.G.*[1], *Vasilyeva M.I.*[1], *Klimova A.M.*[2]
[1] Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
[2]Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *The article presents the results of studies of the composition, properties and structure of the bushing and pin of the rear spring of a truck operated in low-temperature climatic conditions of the North. The levels of hardness and microhardness of the hardened layer and the central part of the pin are determined. The surface profiles of worn parts before and after operation are shown.*

Keywords: *detail, wear, microhardness, roughness, profile, structure.*

При движении автомобиля по некачественным дорогам резко возрастает воздействие знакопеременных нагрузок, в первую очередь, на детали ходовой части, подвески, в частности рессор. Поэтому постоянный рост скоростей автомобилей и грузоперевозок с увеличением грузоподъёмности обуславливают повышенные требования к надежности и работоспособности деталей ходовой части автомобильного транспорта. Этими сложными факторами предъявляются также особые требования к эксплуатации, обслуживании и формировании парка запасных частей автомобильной техники Севера [1–3].

Как известно, основной проблемой трибологии северной техники является обеспечение надежности и долговечности узлов трения машин и механизмов, эксплуатирующихся при низких климатических температурах Севера [4–6]. Актуальными задачами в данном направлении является проведение испытаний на износ деталей автомобильной техники при холоде. При этом объектом исследования должны быть конкретные материалы узлов трения автомобилей, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур Севера. Такой подход требует анализа материалов узла трения в состоянии поставки, особенностей их изнашивания при эксплуатации техники в условиях низких климатических температур.

В качестве объекта исследований выбраны и подготовлены образцы для аналитических исследований из материалов втулки и пальца рессоры грузового автомобиля самосвала марки «FAW», который в последнее время широко эксплуатируется в природно-климатических условиях Севера (Республика Саха (Якутия)). Образцы изготовлены из деталей заводской (оригинальной) поставки и из аналогичных деталей не серийного исполнения (т. н. аналоги). На рис. 1. показаны внешние виды изношенных деталей: пальцы и втулки. Втулка заводского исполнения имеет во внутренней части вставку из сплава на медной основе. Как видно из рис. 1, пальцы имеют на рабочей поверхности технологические выемки и каналы для прохода и удержания смазочного материала. Втулки по всей поверхности внутренней части имеют такие же выемки и каналы.

а) *б)*

Рис. 1. Изношенные детали грузового автомобиля самосвала «FAW»:
а) общий вид пальцев и втулок рессоры; *б)* внутренняя часть изношенных втулок

Как известно, критериями оценки свойств металлических материалов, в т. ч. порошковых, являются наиболее структурно-чувствительные характеристики: формы зерен и частиц, микроструктура, химический и фазовый составы, твердость и микротвердость [7–10]. Металлографические исследования структуры образцов пальцев и втулок проведены на микроскопах «Stemi 2000-C» и «Neophot-32». Измерение микротвердости образцов деталей проводилось на микротвердомере «ПМТ-3М». Среднее значение содержания легирующих элементов образцов деталей получено по результатам трех измерений каждого элемента на установке «Foundry-master». Твердость образцов пальцев и втулок измерена на твердомерах «TH500» и «Heckert» по шкале Роквелла (HRC) и Бринелля (HB).

Как отмечено выше, предварительно необходимо провести анализ состава, физико-механических свойств материалов узла трения в состоянии поставки, выявление особенностей их изнашивания при эксплуатации техники на Севере. Анализ изношенных и замененных деталей показал, что при эксплуатации грузового автомобиля самосвала «FAW» наиболее интенсивному изнашиванию подвергаются и преждевременно выходят из строя втулки (рис. 1).

Сначала аналитическими методами проведены исследования химического состава и твердости материалов узла трения (втулки и пальца рессоры). Усредненные результаты спектрального анализа химического состава исследованных образцов приведены в табл. 1. Исходя из анализа полученных данных, определены марки сталей, из которых произведены данные детали.

Как видно из таблицы 1, заводская втулка изготовлена из Ст0, конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества, содержание углерода в сплаве составляет до 0,23% масс. Сталь Ст0 используется в сварке, сваривается без подогрева и без последующей термообработки. А втулка-аналог изготовлена из стали Ст3сп с более высоким содержанием углерода (табл. 1). Также был определен химический состав вставки на медной основе втулки заводского изготовления, который соответствует марке сплава БрО3Ц6С5.

В таблице 2 приведены средние значения твердости исследуемых образцов деталей. Твердость пальцев из сталей Ст6сп и Ст40Х измерена на центральной части среза и на рабочей поверхности. Значительная разница твердости HRC свидетельствует о том, что на поверхности пальцев проведена упрочняющая обработка.

Из таблицы 2 видно, что твердость стали Ст6сп с изношенной стороны пальца заводского изготовления близка к твердости центральной части пальца. Это объясняется тем, что упрочненная поверхность пальца местами подверглась практически истиранию во время эксплуатации автомобиля.

Таблица 1. Химический состав исследованных образцов, % масс

Образец	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Fe	Марка стали
Палец (завод)	0,40	0,30	0,55	0,03	0,04	0,01	0,01	0,11	Ост.	Ст6сп
Палец (аналог)	0,36	0,33	0,58	0,91	0,01	0,01	0,01	0,03	Ост.	Ст40Х
Втулка (завод)	0,03	0,02	0,18	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	Ост.	Ст0
Втулка (аналог)	0,19	0,30	0,54	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	Ост.	Ст3сп

Таблица 2. Средние значения твердости образцов

Образец	HRC (среднее) центра	HB (среднее)	HRC (среднее) поверхности
Палец (завод)	25-27	302	55 (27-29*)
Палец (аналог)	25-27	301	58
Втулка (завод)	-	121	-
Втулка (аналог)	-	186	-

* – *твердость с изношенной стороны пальца*

В то же время твердость пальца (аналог) по всей рабочей поверхности имеет одинаковые высокие значения (табл. 2). Как видно из табл. 1, палец (аналог) изготовлен из стали Ст40Х с высоким содержанием хрома. Легирующий элемент хром Cr повышает прочность, закаливаемость, жаростойкость, режущие свойства и стойкость стали на истирание, но снижает свойства вязкости и теплопроводности. При этом, так как хром является карбидообразующим элементом, его содержание повышает износостойкость стали. Этим объясняется высокие значения твердости пальца (аналог) по всей рабочей поверхности.

Далее, были проведены измерения микротвердости на приборе ПМТ-3М при нагрузке на индентор 50 г. Поперечный срез пальцев был условно разделен на 2 зоны: упрочненный поверхностный слой и центральная зона (рис. 2). Измерения проведены на 50–60 точках на упрочненном слое и центральной зоне.

В таблице 3 приведены минимальные, максимальные и средние значения микротвердости условных зон исследуемых пальцев. Как видно из таблицы, микротвердость упрочненного слоя значительно выше (до ≈2,4 раза) центральной зоны на обоих пальцах. У пальца заводского исполнения микротвердость упрочненного слоя выше у аналога на 11%, и наибольшее значение достигает 8250 МПа. В центральных частях обоих пальцев значения микротвердости значительно уступают упрочненному слою.

Таким образом, исследования состава и твердости показывают метод поверхностного упрочнения пальца, который позволяет повысить твердость и износостойкость поверхности трения, и в тоже время сохранить пластичность центральной части детали, что, безусловно, положительно влияет на его работоспособность во время эксплуатации автомобиля.

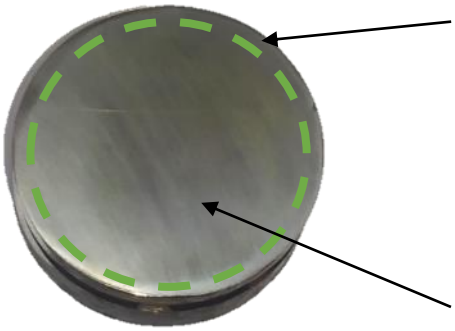


Рис. 2. Схематичное разделение на условные зоны среза пальцев

Таблица 3. Значения микротвердости различных зон пальцев

Материал, зоны		Значения микротвердости, МПа		
		Минимальное	Максимальное	Среднее
Палец (завод)	Упрочненный слой	6640	8250	7170
	Центральная зона	2900	5730	4040
Палец (аналог)	Упрочненный слой	6000	7000	6450
	Центральная зона	2550	2900	2750

Заключение. Установлено, что при эксплуатации самосвала втулка и палец фиксируются в одном положении, из-за этого изнашивание в основном происходит в одной области контактных поверхностей трения. Выявлено, что при эксплуатации грузового автомобиля самосвала при низких климатических температурах наиболее интенсивному изнашиванию подвергаются и преждевременно выходят из строя втулки.

Определены марки сталей: палец промышленного изготовления – Ст6сп, палец- аналог – Ст40Х, втулка промышленного изготовления – Ст0, втулка-аналог – Ст3сп. Выявлено, что твердость стали Ст6сп с изношенной стороны пальца заводского изготовления близка к твердости центральной части пальца, упрочненный поверхностный слой местами подверглась практически истиранию во время эксплуатации техники. Твердость пальца (аналога) из Ст40Х по всей рабочей поверхности имеет одинаковые высокие значения, что объясняется высокими легирующими свойствами хрома. Таким образом показано, что втулки, изготовленные из сталей Ст0 и Ст3сп имеет более ограниченный ресурс. Установлено, что микротвердость упрочненного слоя значительно выше (до 2,4 раза) центральной зоны на обоих пальцах. У пальца заводского исполнения микротвердость упрочненного слоя выше у аналога на 11%, и наибольшее значение достигает 8250 МПа.

Проведены исследования микроструктуры пальцев заводского и аналогичного исполнения, втулок заводского и аналогичного исполнения. Характерные микроструктуры соответствуют требованиям нормативной документации деталей из конструкционной стали, и в основном представлены ферритоперлитной структурой. На исследуемых деталях металлургические дефекты, а также дефекты в виде карбидной сетки не обнаружены.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0036).

Работа выполнена с использованием приборов и оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Волик Б.Г. Термины работоспособности объектов техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://riskprom.ru/publ/29-1-0-42 , свободный (27.01.2017).
2. Лукинский В.С., Зайцев Е.И. Прогнозирование надежности автомобилей. – Л.: Политехника, 1991. – 224 с.
3. Зудов Г.Ю., Ишков А.М., Левин А.И. Методика расчета срока службы техники, эксплуатируемой в условиях холодного климата // Вестник ИрГТУ. 2013. №6(77). С.112-116.
4. Ларионов В.П., Ковальчук ВА. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. – Новосибирск.: Наука, 1976. – 206 с.
5. Черский И.Н. О критериях работоспособности и прогнозирования долговечности металлополимерных узлов трения // Трение и износ. 1980. т.1. №6. С. 1021-1026.
6. Исследование триботехнических систем в условиях холодного климата. Сборник научных трудов. – Якутск.: изд. ЯФ СО АН СССР, 1990.–120 с.
7. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытий плазмой. –М.: Наука, 1990.–408 с.
8. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. – М.: Мир, 2004. – 384 с.
9. Анциферов В.Н. Порошковое материаловедение. – Екатеринбург.: Изд-во УрО РАН, 2012. – 456 с.
10. Орыщенко А.С. Жаростойкие жаропрочные сплавы.– СПб.:Наука, 2011.– 191с.

УДК 624.147:539.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-237-240

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА И БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН

Сыромятников Д. И. [1, 2*], *Сыромятникова А.С.* [1,2]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
*E-mail: sdisoul@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены перспективы применения ледового материала, усиленного дискретными базальтовыми волокнами, – фиброльда. Рассчитывались структурные параметры наполнителя, а также прочностные характеристики фиброльда в зависимости от содержания волокон. Результаты прогнозирования свойств фиброльда продемонстрировали, что использование базальтовых волокон в качестве армирующего компонента позволяет увеличить прочность пресного льда на изгиб в 2–3 раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик фиброльда в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям. Полученные результаты указывают на перспективность применения фиброльда в качестве эффективного и экологичного материала для строительства, в частности, для создания ледовых переправ и других временных конструкций в условиях холодного климата.*

Ключевые слова: *лед, упрочнение, волокна базальта, фибролед, структура, прочностные свойства*

PREDICTING THE STRUCTURAL PARAMETERS AND THE PROPERTIES OF THE COMPOSITE MATERIAL BASED ON FRESH ISE WITH BAZALT CONTINUOUS FILLERS

Syromyatnikov D. I. [1,2*], *Syromyatnikova A. S.* [1,2]
[1] Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
[2]Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *Within the framework of the study, the prospects of application of ice material reinforced with discrete basalt fibers – fibre reinforcement – are considered. The structural parameters of the reinforcing filler of the composite material were calculated, as well as the strength characteristics of the material depending on the fiber content. The results of predicting the properties of fibrold demonstrated that the use of basalt fibers as a reinforcing component allows increasing the bending strength of fresh ice by 2-3 times. Experimental data obtained in the study of the strength characteristics of fibroblend depending on the filler concentration confirm compliance with the calculated values. The obtained results indicate the prospect of using fiberboard as an effective and environmentally friendly material for construction, in particular, for creating ice crossings and other temporary structures in cold climate conditions.*

Keywords: *ice, hardening, basalt fibers, fiber-ice, structure, strength properties*

Введение. Арктическая зона Российской Федерации отличается сложными условиями доступа, отсутствием круглогодичной наземной транспортной инфраструктуры и полной зависимостью объектов жизнеобеспечения и населения от северного завоза. В этих условиях особенно важно использовать местные, экономически эффективные и экологически безопасные материалы для строительства различных объектов и дорожного строительства, включая ледовые переправы. В условиях арктических и северных регионов одними из наиболее перспективных строительных материалов можно рассматривать лед и снег. Это обосновывается их доступностью, простотой обработки, экологической безопасностью, отсутствием необходимости утилизации после завершения срока службы. Однако, несмотря на эти преимущества, лед имеет недостаточную прочность и проявляет высокую хрупкость при отрицательных температурах, что ограничивают широкое применение льда в этом качестве.

Известно, что эффективным методом повышения прочности льда является его армирование. Предварительные исследования показали, что наиболее эффективными волокнистыми наполнителями в ледовой матрице являются базальтовые материалы, которые характеризуются высокими физико-ме-

ханическими характеристиками, повышенной химической и биологической стойкостью, экологичностью, долговечностью, отличаются эффективными эксплуатационными свойствами в широком диапазоне температур, доступностью и невысокой стоимостью [1, 2]. Одним из преимуществ базальтовых волокон для армирования льда является их высокая смачиваемость водой, что превосходит аналогичные показатели волокон из полимерных материалов. Угол смачивания базальтового материала даже ниже, чем у стеклянных и углеродных волокон. Базальтовые волокна также показывают отличные эксплуатационные характеристики в условиях низких температур, что делает их особенно подходящими для использования в холодном климате.

Лед с добавлением наполнителей является композиционным материалом, состав, форму и распределение компонентов которого можно запроектировать заранее. Целью проведенных исследований стало проектирование структуры и свойств ледового материала, армированного хаотично расположенными дискретными волокнами базальта, – фиброльда. Для этого были выполнены расчеты механических характеристик фиброльда с позиций механики композиционных материалов и проведено их сравнение с экспериментальными результатами, полученными авторами в ходе изучения прочностных характеристик композиционного материала на основе льда с содержанием до 6% (мас.) базальтовых волокон [1]. Кроме того, с целью уточнения экологических аспектов использования базальтовых волокон в качестве армирующего материала в ледовой матрице были проведены исследования химического состава базальтовых волокон и оценка толщины донного отложения при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда.

Материалы и методы. Лед, усиленный хаотично расположенными дискретными волокнами, является изотропным двухкомпонентным хаотично-армированным композитом на основе коротких волокон. На основе положений механики композиционных материалов рассчитывались следующие характеристики фиброльда: содержание волокнистого наполнителя, плотность композита, критическая длина волокон, прочность и модуль упругости композита [3–5].

Экспериментальные исследования прочностных свойств фиброльда проводились на образцах ледового материала в виде балки, которые получали послойным намораживанием водопроводной воды при спокойном ее наливе в опалубку из пенополистирола с внутренними размерами: высота h = 100 мм, ширина b = 500 мм, длина L = 870 мм, в натурных условиях при естественно низких среднесуточных температурах –45 °С. Наполнитель представлял собой базальтовые волокна длиной 40 мм и диаметром 18 мкм. Содержание фибры равнялось 0,8/0,3; 2,0/0,75, 4,0/1,5 и 6,0/2,3 % (мас./об.). Первый и последний слои всех образцов представляли чистый лед высотой 1 мм. Наполнитель укладывали на замерзший нижний слой, равномерно распределяя по поверхности ледового слоя, и заливали необходимым количеством охлажденной пресной воды. Количество слоев и расстояния между слоями составляли 7, 9, 11, 15 и 10, 9, 7, 5 мм, соответственно, для разных содержаний фибры. Прочность на растяжение при изгибе определяли в натурных условиях при среднесуточных температурах –45 ^{0}С с использованием специальной установки [1].

Неармированные образцы льда разрушаются хрупко, а фибролед демонстрирует разрушение по вязкому механизму. Разрушение образцов чистого льда происходит путем быстрого продвижения хрупкой трещины, инициированной в области максимальных растягивающих напряжений, по всей ширине образца. В армированных образцах формируются множественные трещины в области максимальных растягивающих напряжений, дальнейшее разрушение происходит путем их медленного продвижения в направлении, нормальном сечению образца, и их объединения.

Основная часть. Прогнозирование физико-механических свойств композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон проводилось с применением условий аддитивности [3–5].

Плотность фиброльда $\rho_ф$ определяется по следующей зависимости:

$$\rho_ф = \rho_в \cdot v_в + \rho_л(1 - v_в), \quad (1)$$

где $\rho_в$, $\rho_л$ – плотность базальтового волокна и плотность льда, $v_в$ – объемная доля волокон.

При $v_в$ = 0,008, плотности базальтовых волокон $\rho_в$ = 2600 кг/м^3 и плотности пресного льда $\rho_л$ = 1000 кг/м^3 плотность композита, вычисленная в соответствии с формулой (1), будет равна $\rho_ф$ = 1012,8 кг/м^3.

В композиционных материалах под действием растягивающей нагрузки дискретные волокна не разрушаются, а вытягиваются из матрицы, если их длина l меньше критической длины $l_{кр}$, которая рассчитывается по формуле [5]:

$$l_{кр} = d_в\, \sigma_в / 2\tau_{гр}, \quad (2)$$

где $d_в$ – диаметр волокна; $\sigma_в$ – предел прочности волокна при растяжении; $\tau_{гр}$ – сдвиговая прочность границы раздела между волокном и матрицей. Сдвиговую прочность $\tau_{гр}$ можно определить с помощью зависимости:

$$\tau_{гр} = \sigma_л \cos 45^0 , \quad (3)$$

где $\sigma_л$ – прочность льда.

При прочности базальтовых волокон при растяжении $\sigma_в$ = 3200 МПа, $d_В$ = 18 мкм и прочности льда при (-20^{0}С) – (–40 ^{0}С) $\sigma_л$ = 1,5 МПа [6] критическая длина волокон базальта в матрице составляет $l_{кр}$ = 37 мм, т. е. в ледяном композиционном материале длина армирующих базальтовых волокон должна быть больше 37 мм.

При армировании матрицы непрерывными волокнами с содержанием $v_в$ прочность композиционного материала $\sigma_к$ определяется из условия аддитивности:

$$\sigma_к = \sigma_л\ (1 - v_в) + \sigma_в\ v_в \quad (4)$$

Прочностные свойства композиционных материалов, армированных дискретными волокнами, зависят от длины волокон. При $l > l_{кр}$ уравнение аддитивности для определения предела прочности фиброльда $\sigma_ф$ с использованием коэффициента эффективности, зависящего от расположения дискретных волокон в матрице K, имеет вид [7]:

$$\sigma_ф = KR\ v_в \sigma_в + \sigma_л\ (1 - v_в), \quad (5)$$

где K – коэффициент эффективности, в случае хаотичного расположения волокон в матрице K = 1/6; R – коэффициент, учитывающий распределение напряжений по длине волокон, R = 0,5. Расчеты по формуле (5) показывают, что введение базальтовых волокон в количестве 0,8 об.% в ледовую матрицу позволит увеличить прочность композиционного материала до $\sigma_ф$ = 3,5 МПа, т. е. в 2,3 раза. Если создавать фибролед, прочность которого в 4 раза превышает прочность пресного льда, то содержание базальтовых волокон в матрице должно составить 1,7 об.%.

Зависимость предела прочности на растяжение фиброльда $\sigma_ф$ от объемного содержания дисперсных волокон $v_в$, построенная в соответствии с соотношением (5), приведена на рис. 1.

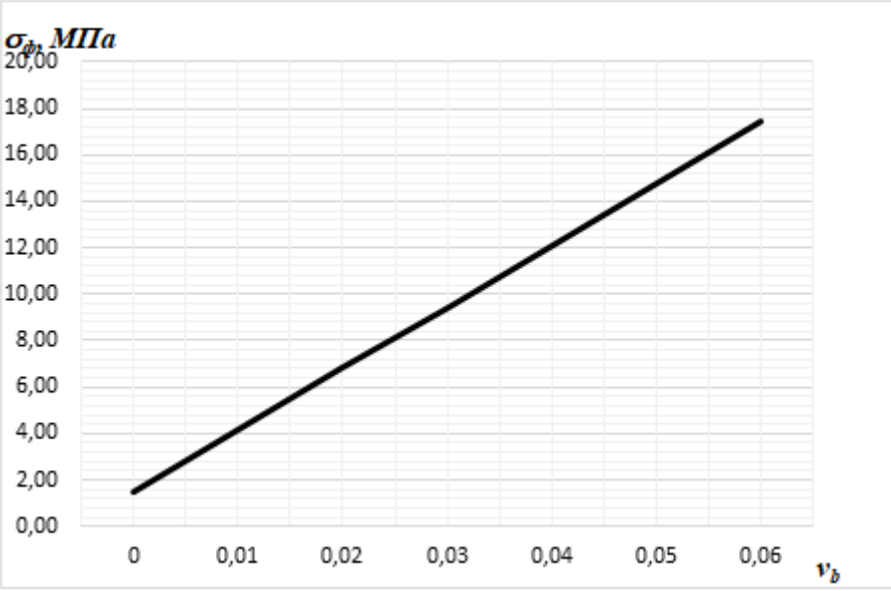


Рис. 1. Расчетная зависимость предела прочности на растяжение композиционного материала $\sigma_ф$ от объемного содержания армирующих волокон $v_в$

Модуль упругости композиционного материала $E_{км}$ с армирующими волокнами, длина которых превышает критическую длину волокон, условие аддитивности имеет вид

$$E_{км} = E_в \cdot v_в \cdot (1 - l/2l_{кр}) + E_м \cdot (1 - v_в), \quad (6)$$

где $E_в$, $E_м$ – модули упругости волокна и матрицы.

Для ледового композиционного материала с базальтовыми волокнами длиной l = 40 мм, принимая $E_в$ = 70 ГПА, модуль упругости пресного льда при температуре -25°С $E_м$ = 10 ГПА [8] в соответствии с выражением (6) получаем значение $E_{км}$ = 10,2 ГПа при $v_в$ = 0,008 и $E_{км}$ = 11,3 ГПа при $v_в$ = 0,06.

Экспериментально полученная авторами зависимость предела прочности на растяжение при изгибе фиброльда $\sigma_{изг}$ от содержания базальтового волокна $v_в$, приведена на рис. 2 [1].

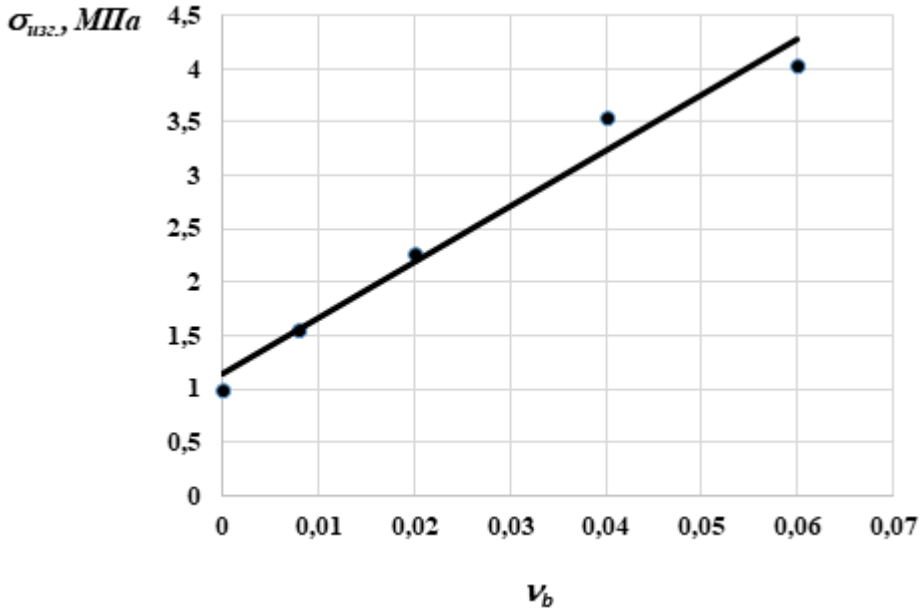


Рис. 2. Экспериментальная зависимость прочности на растяжение при изгибе фиброльда $\sigma_{изг}$ от объемного содержания армирующих волокон $v_в$ [1]

Видно, что прогнозируемые и экспериментально полученные прочностные характеристики фиброльда возрастают линейно в зависимости от содержания наполнителя.

Прогнозирование характеристик композиционного материала, основанного на ледяной матрице и армированного хаотично расположенными дискретными базальтовыми волокнами, продемонстрировало высокую эффективность использования базальтовых волокон в качестве армирующей добавки. Введение таких наполнителей позволяет увеличить прочность на изгиб пресного льда в два-три раза. Экспериментальные данные, полученные при изучении прочностных характеристик композиционного материала на основе пресного льда и базальтовых волокон в зависимости от концентрации наполнителя, подтверждают соответствие расчетным значениям.

Список литературы

1. Syromyatnikova A. S., Tikhonravova Ya. V., Mestnikov A. E., Syromyatnikov D. I. and Sibiryakov M. M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials. Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. No.5. Pp. 1215-1220. DOI: 10.1134/S0036029524702240.
2. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. Cold Regions Sci. Technol. 2022. Vol. 196. N 103490. DOI:10.1016/j.coldregions.2022.103490.
3. Коротеева Л.И., Шаронов А.В., Астахов П.А., Миронов Н.А., Сергеева А.В. Проектирование композиционных материалов с заданной структурой и свойствами// Пластические массы.2016.№5-6. С.15-16.
4. Шульга А.В. Композиты. Ч.1. Основы материаловедения композитных материалов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. 96 с.
5. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. – Киев: Вища школа, 1977. 312 с.
6. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. 208 с.
7. Композиционные материалы: Справочник/ Под ред. Карпиноса Д.М. – Киев: Наукова думка, 1985. – 592 с.
8. Короновский Н.В. Общая геология. – М.: КДУ, 2018. 552 с.

УДК 624.147:539.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-241-243

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА И БАЗАЛЬТОВЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Сыромятников Д. И. [1, 2*], *Сыромятникова А.С.*[1,2], *Захарова М.И.*[1]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
*E-mail: sdisoul@mail.ru

Аннотация. *Показано, что базальтовые непрерывные волокна являются экологически безопасным материалом: их химический состав идентичен природному сырью, а при использовании композита в качестве ледового покрытия волокна не образуют вредных донных отложений после таяния. Полученные результаты указывают на перспективность применения фиброльда в качестве эффективного и экологичного материала для строительства, в частности, для создания ледовых переправ и других временных конструкций в условиях холодного климата. Кроме того, приведены данные о толщине льда на реке Лена по многолетним наблюдениям.*

Ключевые слова*: лед, упрочнение, волокна базальта, химический состав, ледовый покров, толщина донного отложения, толщина ледового покрова*

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF COMPOSITE MATERIAL'S APPLICATION BASED ON FRESH ICE WITH BAZALT CONTINUOUS FILLERS FOR STRENGTHENING OF THE ICE COVER

Syromyatnikov D. I.[1,2*], *Syromyatnikova A. S.*[1,2] , *Zacharova M.I.*[1]
[1] Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
[2]Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *Showed that basalt fibers are an environmentally safe material: their chemical composition is identical to natural raw materials, and when the composite is used as an ice coating, they do not form harmful bottom sediments after melting. The obtained results indicate the prospect of using fiberboard as an effective and environmentally friendly material for construction, in particular, for creating ice crossings and other temporary structures in cold climate conditions. Besides, data on the thickness of ice cover based on long-term observations are provided*

Keywords: *ice, hardening, basalt fibers, chemical composition, ice cover, bottom sediment thickness, thickness of ice cover*

Введение. За последние десятилетия наблюдается растущий интерес к Арктике, что связано с вопросами национальной безопасности, разработки минеральных и углеводородных ресурсов, а также с возможностью организации круглогодичного транспортного сообщения по Северному морскому пути. Понятно, что одним из необходимых условий освоения Арктики является наличие материалов, которые могут сохранять эксплуатационные свойства в холодном климате. Еще одно требование к таким материалам – учет незащищенности северной природы к антропогенному воздействию и стремление к минимизации экологических рисков.

В ходе предварительных исследований показано, что наиболее эффективными волокнистыми наполнителями в ледовой матрице являются базальтовые материалы, которые характеризуются высокими физико-механическими характеристиками, повышенной химической и биологической стойкостью, экологичностью, долговечностью, отличаются эффективными эксплуатационными свойствами в широком диапазоне температур, доступностью и невысокой стоимостью [1, 2]. В работе, с целью уточнения экологических аспектов использования базальтовых волокон в качестве армирующего материала в ледовой матрице, были проведены исследования химического состава базальтовых волокон и оценка толщины донного отложения при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда.

Материалы и методы. Для получения изображения базальтового материала и определения его химического состава использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-7800F, оснащенный энергодисперсионным детектором.

Расчет толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при таянии ледового покрова, сформированного с использованием фиброльда, проводился при допущении естественного весеннего таяния ледовой переправы шириной a и длиной b на водоеме с постоянной по глубине скоростью течения $\upsilon_{\text{р}}$. При таких допущениях выражение для вычисления толщины базальтового слоя на дне водоема имеет вид:

$$\delta_1 = \frac{0{,}3 \cdot V \cdot \upsilon_{\text{ос}}}{\text{a} \cdot (\upsilon_{\text{ос}} \cdot b + \upsilon_{\text{р}} \cdot \delta)}, \quad (1)$$

где V – объем слоя льда, содержащего базальтовые волокна, м^3; $\upsilon_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частиц базальта на дно водоема, м/с; δ – толщина слоя базальта после таяния льда.

Скорость осаждения частицы базальта диаметром d и плотностью ρ, падающей в жидкости с плотностью ρ_0 и динамической вязкостью η_0, под действием собственного веса, определяется по известной формуле Стокса:

$$\upsilon_{\text{ос}} = d^2 \cdot (\rho - \rho_0) \cdot \frac{g}{18 \cdot \eta_0} \quad (2)$$

Анализ данных о толщине льда на реке Лена, коррелирующая с динамикой изменения температуры в окрестности г. Якутска за период ледостава, проводился на основе многолетних данных Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Основная часть. В качестве сырья для производства базальтовых волокон используются базальтовые горные породы вулканического происхождения, состоящие из оксидов *Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K* и других элементов.

РЭМ – изображение использованного базальтового материала приведено на рис. 1. Волокна ровные по длине, диаметром 18 мкм (рис. 1).

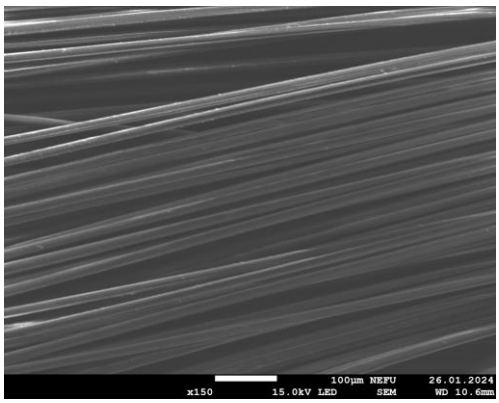


Рис. 1. РЭМ-изображение базальтовых волокон

Элементный состав базальтового материала, определенный с использованием энергодисперсионного детектора, приведен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав базальтового материала

Элемент	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Вес.%	59, 74	1,01	1,67	7,40	19,88	1,04	4,50	4,29

Из данных таблицы видно, что состав базальтового волокна полностью соответствует составу природного материала, т. е. технология производства не предусматривает применение каких-либо добавок.

Результаты проведенной оценки толщины базальтового слоя на дне водоема, образующегося при естественном таянии ледового покрова из фиброльда, показали следующее. При исходных данных d = 0,000018 м, ρ = 2600 кг/м^3, ρ_0 = 1000 кг/м^3, η_0 = 1,3·10^{-3} Па·с, V = 35 м^3, a = 7 м, b = 100 м, υ_p = 1 м/с, δ = 0,015 м, толщина базальтового слоя на дне водоема составит $\delta_1 = 8{,}87$ мм.

Учитывая, что при скорости течения реки на дне от 2–3 см/с происходят процессы эрозии дна путем переноса частиц [3], можно ожидать, что при строительстве ледовой переправы через реку Лена из композиционного материала на основе льда и базальтовой фибры образовавшийся на дне слой из частиц базальта размером 18 мкм будет уноситься течением реки и не образует донных отложений.

На основе многолетних данных Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды ЯУГМС о толщине льда на реке Лена была построена зависимость толщины льда от года наблюдения с линией тренда (Рис. 2). Метеорологический пост расположен в пригороде г. Якутска, измерение толщины проводилось ежегодно в конце марта.

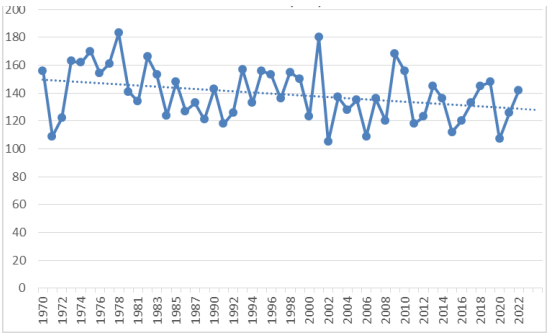


Рис. 2. Толщина льда на р. Лена за 1970–2022 годы наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Анализ данных показывает, что наблюдается тенденция к уменьшению толщины льда.

Для корреляции наблюдаемой тенденции с динамикой изменения температуры была построена зависимость средней температуры в окрестности г. Якутска за период ледостава (ноябрь-март) за те же годы наблюдения (рис. 3).

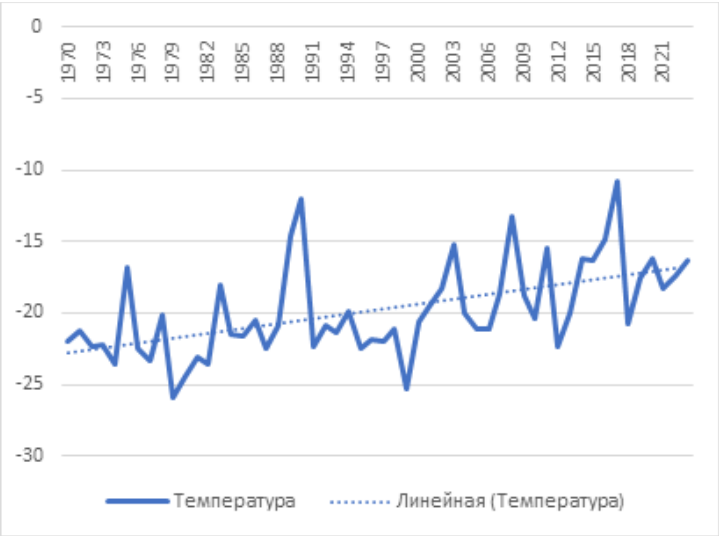


Рис. 3. Средние температуры в период ледостава на р. Лена (25 ноября – 25 марта) в окрестности г. Якутска за 1970–2023 годы наблюдения (пунктиром – линия тренда)

Видно, что наблюдается тенденция к повышению среднесезонных температур в период ледостава на р. Лена.

На основании наблюдаемых трендов за многолетние наблюдения в изменении толщины льда и климатических температур можно выдвинуть предположение, что уменьшение толщины естественного льда на реке Лена вызвано явлениями, связанными с процессами глобального потепления. Этот фактор также может приводить к сокращению сроков эксплуатации ледовых переправ и свидетельствует о необходимости принятия дополнительных мер по укреплению льда на северных водоемах.

Итак, базальтовые непрерывные волокна являются экологически чистым материалом: химический состав базальтовых волокон аналогичен составу природного сырья, не содержит посторонних добавок, и при использовании этого композиционного материала в качестве ледового покрытия не склонен к образованию донных отложений после таяния.

Список литературы

1. Syromyatnikova A. S., Tikhonravova Ya. V., Mestnikov A. E., Syromyatnikov D. I. and Sibiryakov M. M. Effect of the Filler Content and the Crystallization Temperature on the Bending Strength and Structure of Fresh-Ice-Based Composite Materials. Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2024. No.5. Pp. 1215-1220. DOI: 10.1134/S0036029524702240.
2. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of Ice with basalt materials. Cold Regions Sci. Technol. 2022. Vol. 196. N 103490. DOI:10.1016/j.coldregions.2022.103490.
3. Короновский Н.В. Общая геология. – М.: КДУ, 2018. 552 с.

УДК 669.046.5:669.018.28
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-244-246

ВЫПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ГАЗОВОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Тарасов П.П.[1,2], Петров П.П.[1], Данилов А.Д.[1], Степанова К.В.[1], Слепцов Г.Н.[1]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» обособленное подразделение
«Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН»
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: tarasov-p@mail.ru

***Аннотация**. Проведение фундаментальных исследований и внедрение научных разработок, ориентированных на создание новых конструкционных хладостойких сталей и сплавов, которые обеспечат повышение надежности техники ответственного назначения, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур, является важной актуальной научно-технической задачей. Одним из решений указанных вопросов является создание хладостойких литых сплавов, содержащих модифицирующие элементы из местного минерального сырья.*

***Ключевые слова:** износостойкость, сталь, хладостойкие литые сплавы, модифицирование.*

SMELTING OF WEAR-RESISTANT CARBON STEELS IN A GAS CRUCIBLE FURNACE

Tarasov P.P.[1,2], Petrov P.P.[1], Danilov A.D.[1], Stepanova K.V.[1], Sleptsov G.N.[1]
[1]FIC «Yakut Scientific Center SB RAS» separate division
V.P. Larionov institute of the physical-technical problems of the North
of the Siberian branch of the RAS
[2]M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

***Abstract.** Conducting fundamental research and implementing scientific developments focused on the creation of new structural cold-resistant steels and alloys that will increase the reliability of critical equipment operating at low climatic temperatures is an important urgent scientific and technical task. One of the solutions to these issues is the creation of cold-resistant cast alloys containing modifying elements from local mineral raw materials.*

***Keywords:** wear resistance, steel, cold-resistant cast alloys, modification.*

Экстремальные природно-климатические условия Севера и Арктики значительно снижают работоспособность и долговечность техники и конструкций, в зимнее время отказ деталей и узлов увеличивается в 2–3 раза, по некоторым данным до 6 раз, что наносит значительные финансовые убытки и уменьшают экономическую целесообразность их эксплуатации [1]. Поэтому проведение фундаментальных исследований и внедрение научных разработок, ориентированных на создание новых конструкционных хладостойких сталей и сплавов, которые обеспечат повышение надежности техники ответственного назначения, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур, является важной актуальной научно-технической задачей. Одним из решений указанных вопросов является создание хладостойких литых сплавов, содержащих модифицирующие элементы (никель, марганец, ванадий, титан, ниобий, церий, иттрий, лантан, празеодим, неодим и др.) из минерального сырья Якутии [2]. Добавление легирующих элементов в различных концентрациях положительно влияет на свойства сплавов, таких как порог хладноломкости, прочность, твердость, ударная вязкость и износостойкость [3].

Цель: получение методом литья материалов с заданным комплексом свойств для изготовления рабочих органов горнодобывающей техники, эксплуатируемой в условиях Крайнего Севера.

Задачи:

– отработка технологии плавки и литья скрапа рабочих органов горнодобывающей техники с использованием газовой печи;

– подбор режимов термической обработки полученных стальных отливок;

– изучение структуры и основных физико-механических свойств экспериментальных литых сплавов.

Скрап материала коронок рыхлителя производства фирмы «NBLF» (КНР) представлял собой окатыши со средним размером 50x20x90 мм.

В качестве раскисляющих, легирующих и модифицирующих добавок использовались:
– Марганец металлический МН95 (ГОСТ 6008-90);
– Хром металлический Х98,5 (ГОСТ 5905-2004);
– Лигатура молибденовая МФТА (ТУ 48-4-365-88);
– Кремний поликристаллический КПС-1 (ТУ-48-4-174-77);
– Титан губчатый ТГ-120 (ГОСТ 17746-96);
– Иттрий металлический ИтМ-1 чистый (ТУ 48-4-208-72);
– Лантан металлический ЛаМ-1 (ТУ 48-4-218-72);
– Алюминий гранулированный чистый (МРТУ-6-09-5931-69);
– Концентрат РЗМ (Томторское редкометальное месторождение).

Были разработаны 3 варианта рецептуры шихты для ввода в состав стали, восполняющий угар компонентов и корректировки химического состава, для улучшения структуры.

Проведены 4 экспериментальные плавки. Отливка 1 плавилась с добавкой шихты по рецептуре состава1; 2 и 3 – состава 2; 4 – состава 3.

Результаты опытных плавок в газовой тигельной печи. Плавка производилась в газовой тигельной печи шахтного типа кустарного производства с рабочей камерой диаметром около 20 см и высотой около 30 см с шамотно-бетонной теплоизоляцией в стальном корпусе (рис. 1, *а*). Нагрев осуществлялся теплотой сгорания смеси пропана и воздуха, смешиваемой в форсунке с подачей газа и воздуха. Пропан подается из стандартного баллона объемом 50 литров, воздух нагнетается вентиляционной установкой (рис. 1, *б*). Регулировка пламени производится вентилями системы подачи. Для более равномерного нагрева рабочего объема печи факел пламени вводится на высоте примерно 1/3 высоты камеры и под углом по горизонтали к оси симметрии шахты, огибая ее внутренний радиус.

а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 1. Газовая печь для плавки и тигель

Для плавки использовался графитовый тигель объемом 800 мл, установленный на подставке из огнеупорного кирпича. При этом пламя горелки находится на уровне дна тигля. Отверстие шахты печи закрывается огнеупорными кирпичами (рис. 1, *в, г*).

Длительность плавки составляла от 3 ч 34 мин до 3 ч 49 мин. Шихта загружалась в тигель и по мере плавления и оседания шихты в тигле, добавлялась ее оставшаяся часть.

Рецептура шихты. В начале предварительных работ был произведен переплав материала коронки в индукционной печи. В ходе плавки произошёл угар некоторых компонентов (3), что негативно повлияло на структуру и свойства сплава. С учетом этих данных были разработаны 3 варианта рецептуры шихты для ввода в состав стали восполняющий угар компонентов и корректировки химического состава, улучшения структуры. Вводились активно выгорающие элементы-раскислители с высоким сродством к кислороду, также редкоземельные металлы для модификации сплава.

Термическая обработка образцов. Образцы из отливок подвергались термической обработке по 2 режимам:

– 1 режим: закалка с 840 ºС в масле, низкий отпуск при 300 ºС, выдержка 1 час и охлаждение на воздухе;

– 2 режим: закалка с 840 ºС в масле, средний отпуск при 450 ºС, выдержка 1 час и охлаждение на воздухе.

Закалка производилась в электрической трубчатой муфельной печи Nabertherm RHT 08/17 (Германия). Образцы для ударных испытаний загружались в стальную лодочку по 4 штуки, выдерживались

15 мин. Отмечено, что образец, лежащий ближе к крышке печи, недостаточно нагревается, получена недостаточно закаленная структура (обр.№ 3032 /5/, №3033 /2/). Образцы для испытаний на растяжение располагались на проволочной подставке, выдержка 10 мин.

Отпуск производился в электрической муфельной печи SNOL 8,2/1100 (Литва).

Определение механических свойств. Для измерения твердости использовался твердомер «Affri 206 RTD» (Италия), определяли по методу Бринеля и Роквела согласно ГОСТ 9012-59 и 9013-59.

Для определения временного сопротивления металла использовалась универсальная электромеханическая испытательная машина «Zwick/Roell Z600» (Германия), были изготовлены плоские стандартные образцы с головками на растяжение по ГОСТ 1497-84 (рис. 2).

Для испытаний на ударный изгиб при температуре 20 ºС использовался маятниковый копер Amsler RKP450 (Германия), были изготовлены образцы с U-концентратором (Тип VI) по ГОСТ 9454-78. Исследовались образцы из отливок № 3 и 4. Результаты представлены в таблице 1.

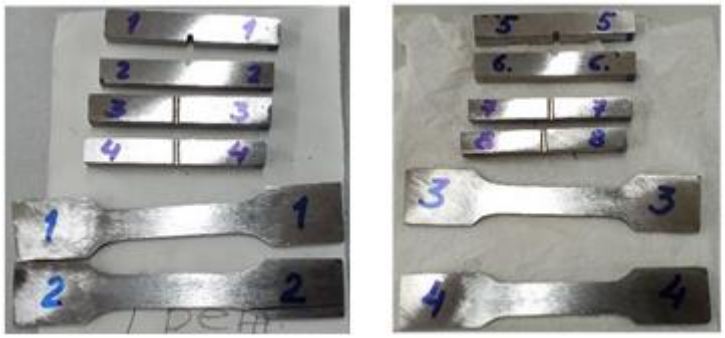


Рис. 2. Образцы для механических испытаний

Таблица 1. Влияние режима термической обработки на основные механические характеристики

Материал	Режим ТО	$\sigma_в$ [МПа]	KCU[кДж/м^2]	HB (HRC)
3 отливка	после литья	-	-	395
	1	894	42,8	(61)
	2	658	29,6	(54)
4 отливка	после литья	-	-	341
	1	919	43,3	(62)
	2	915	32,1	(54)

Выводы. Выявлено повышение содержания углерода во всех четырех образцах полученных сплавов в газовой печи (относительно химического состава исходного скрапа). Отмечено, что степень насыщения жидкой фазы углеродом зависит от времени выдержки расплава в тигле. Это обусловлено тем, что нагрев и плавка шихты производится в восстановительной атмосфере (CO; CO_2), препятствующей выгоранию углерода, при этом происходит взаимодействие расплава с материалом графитового тигля в течении достаточно длительного времени, жидкая фаза при этом насыщается углеродом как из материала тигля, так и из газовой (восстановительной) фазы. Более оптимальные результаты по структуре и свойствам дает применение добавки рецептуры состава 3. Созданы предпосылки для дальнейших работ по усовершенствованию технологии плавки, литья и последующей термомеханической обработки отливок с целью получения материалов с заданным комплексом свойств.

Список литературы

1. Полецков П.П., Никитенко О.А., Кузнецова А.С., Алексеев Д.Ю. Разработка режимов термической обработки новой конструкционной экономно-легированной высокопрочной стали для Арктики и Севера // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. №4. С.3 -8.
2. Petr P. Petrov, Ksenia V. Stepanova, Aleksandr D. Danilov Smelting of carbon alloy from iron ore of the Mene-Aldan ore occurrence in the Republic of Sakha (Yakutia) // Published online: 7 January 2025 Springer Science +Business Media, LLC, part of Springer Nature 2025. Metallurgist (2025) No.68, P. 1267 – 1274. DOI:10.1007/s11015-024-01837-9.
3. Петров П.П., Степанова К.В., Данилов А.Д. Использование местного минерального сырья для развития металлургии в Якутии // Наука и техника в Якутии. 2020. №1 (38). С. 18 -20. DOI: 10.24412/1728-516X-2020-1-18-20

УДК 539.375.6
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-247-251

МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЙ МАТЕРИАЛ, УПРОЧНЕННЫЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ ПРИРОДНОГО АЛМАЗА

Федотов А.А.[1], *Сафонова М.Н.*[1]
[1]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: fedot_andrey@mail.ru

Аннотация. *Авторами изучается эффект воздействия ультрадисперсных порошков природного алмаза, используемых в качестве наполнителей, на свойства композиционного материала из оловянистой бронзы, в зависимости от процентного содержания и зернистости. Проведены исследования физико-механических характеристик образцов. Проведены металлографические исследования поверхности исследуемых образцов. Исследования проводились с помощью применения теорий зернограничного и дисперсного механизмов упрочнения. Согласно результатам металлографических исследований, проведены расчеты количественных показателей упрочнения по уравнениям Орована и Холла-Петча. Выявлено, что введение наполнителей в состав композита в определенном количестве, положительно воздействует на физико-механические свойства.*

Ключевые слова: *алмазные порошки, оловянистая бронза, ультрадисперсный порошок природного алмаза, механизмы упрочнения*

METAL MATRIX MATERIAL STRENGTHENED BY ULTRA-DISPERSED NATURAL DIAMOND POWDERS

Fedotov A.A., Safonova M.N.
M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *The authors study the effect of ultra-dispersed natural diamond powders, used as fillers, on the properties of a tin bronze composite material, depending on the percentage content and grain size. Physical and mechanical characteristics of the samples were obtained. Metallographic studies of the surface of the samples under study were carried out. The theory of grain boundary and dispersion strengthening mechanisms was investigated. Based on the results of metallographic studies, calculations of quantitative hardening indicators were carried out using the Orowan and Hall-Petch equations. It was found that the introduction of fillers into the composite in a certain amount has a positive effect on the physical and mechanical properties*

Keyword: *Diamond powders, tin bronze, ultra-dispersed natural diamond powders, hardening mechanisms*

Актуальность работы. Определено [1, 2], что наиболее оптимальным упрочнителем для композиционных материалов из меди и ее сплавов может быть углерод и, в частности, алмаз, как его наименее химически активная и термически устойчивая форма, а также, согласно критерию термодинамического равновесия – энергии Гиббса. Важным преимуществом в использовании алмаза в качестве упрочнителя является то, что алмаз имеет большую адсорбционную способность и наименее химически активен из различных форм углерода. Кроме того, частицы ультрадисперсного и нанодиапазона характеризуются высокой поверхностной активностью, позволяющей осуществлять прочное сцепление с матрицей. В данной работе исследуется эффект воздействия ультрадисперсных порошков природного алмаза, используемых в качестве наполнителей, на свойства композиционного материала из оловянистой бронзы, в зависимости от процентного содержания и зернистости.

Цель работы – повышение физико-механических и эксплуатационных свойств металлической матрицы на основе оловянистой бронзы, применяемой в алмазных инструментах путем добавления ультрадисперсных порошков природного алмаза.

Задачи исследования:

– выбор дисперсного упрочнителя в металлической матрице на основе оловянистой бронзы и исследование его гранулометрического состава;

– исследование влияния введения дисперсного наполнителя в виде порошков природного алмаза на физико-механические свойства металлической матрицы на основе оловянистой бронзы;

– исследование изменения структуры металлической матрицы на основе оловянистой бронзы в зависимости от содержания и дисперсности порошков природного алмаза.

Практическая значимость полученных результатов заключается в модификации металлической связки на основе оловянистой бронзы улучшением физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик, что позволяет прогнозировать снижение интенсивности изнашивания и, следовательно, увеличение сроке службы алмазосодержащего инструмента.

Выбор дисперсного упрочнителя. Можно утверждать (табл.1), что наиболее оптимальным упрочнителем для композиционных материалов из меди и ее сплавов может быть углерод и, в частности, алмаз, как его наименее химически активная и термически устойчивая форма.

Таблица 1. Физические характеристики основных типов наполнителей

Вещество и состояние	Изменение свободной энергии Гиббса, ΔG, кДж/моль	Микротвердость x10^2 МПа,	Температура плавления, °С
C (к, алмаз)	2.377	1000	3700
W (к)	0	258	3422
Al_2O_3 (к)	-1582,3	180-220	2044
BN (к)	-226,8	800-900	2700
SiC (к)	-60	300-320	2730
BeO (к)	-579,9	152	2530
Be_2C (к)	-948	780	2400

В качестве упрочнителей использованы порошки природного алмаза (ППА) размерами 3/2 мкм, 7/5 мкм, –40 мкм и ультрадисперсный порошок (УДПА). Зерновой состав исследуемых порошков природных алмазов, определенный методом компьютерного диагностического сита (КДС) приведен в табл. 2.

Таблица 2. Зерновой состав ППА

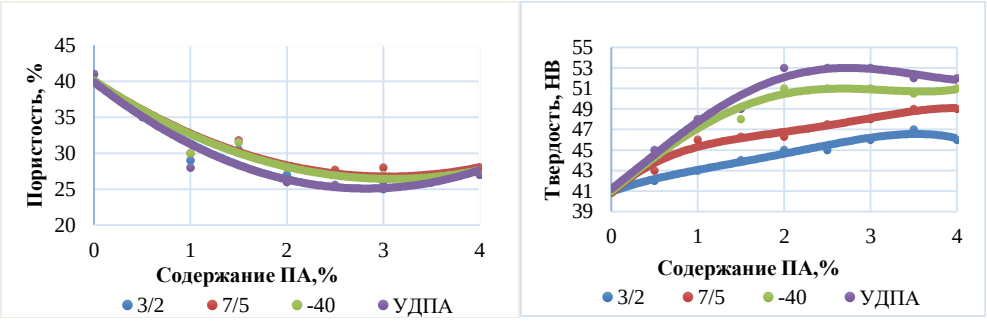
Обозначение порошков природных алмазов (ППА)	Зернистость, мкм
7/5	0–7
3/2	0–3
–40	0–40
УДПА	0–0,5; 0–1 более 50 %

Величина полной удельной поверхности (S_{BET}) порошков УДПА, измеренная методом низкотемпературной адсорбции на приборе «Avtosorb», оказалась равной 5,5 $м^2/г$. Приняв, что зерна представляют собой сферы и следующего из этой предпосылки эмпирического соотношения $d=6/(\gamma S_{BET})$, где d – диаметр зерна, γ – плотность, получаем значение эквивалентного диаметра зерна, равное $d \approx 300$ нм.

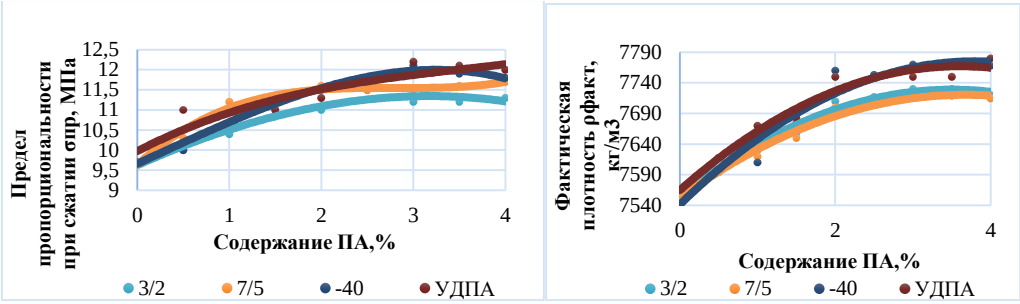
Далее, исследовался стандартный алмазосодержащий абразивный материал на основе оловянистой бронзы М2-01 (20% олова, 80% меди, с добавлением ультрадисперсного природного алмазного порошка в количестве 0,5–4% при постоянном соотношении содержания меди к олову).

Также были изготовлены образцы с добавлением порошков природных алмазов с более крупной фракцией (–40, 7/5, 3/2) для сравнения влияния размера наполнителя на свойства и структуру материала. Физические и механические характеристики спрессованных и спечённых материалов оценивали по стандартным методикам.

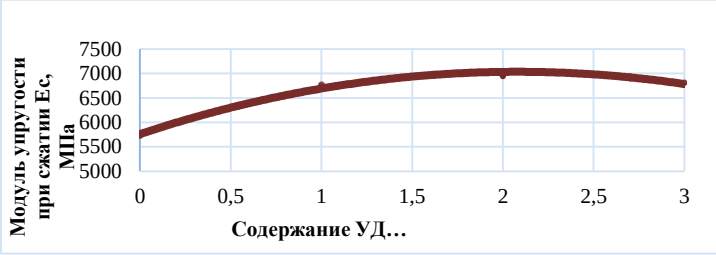
Результаты исследований приведены на рис. 1.



а) *б)*



в) *г)*



д)

Рис. 1. Влияние введения ППА на физико-механические свойства сплава М2-01 в зависимости от размерности и содержания порошков природного алмаза: *а)* пористости; *б)* твердости; *в)* предела пропорциональности; *г)* фактической плотности; *д)* модуля упругости при сжатии (только для УДПА)

Проведены триботехнические испытания исследуемых образцов на машине трения ИИ 5018 при вращательном движении по кинематической схеме диск-колодка в режиме сухого трения под нагрузкой 600Н. Результаты приведены на рис. 2.

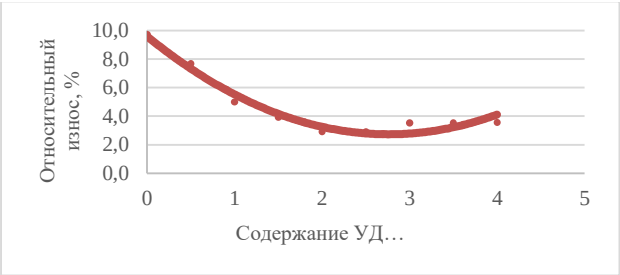
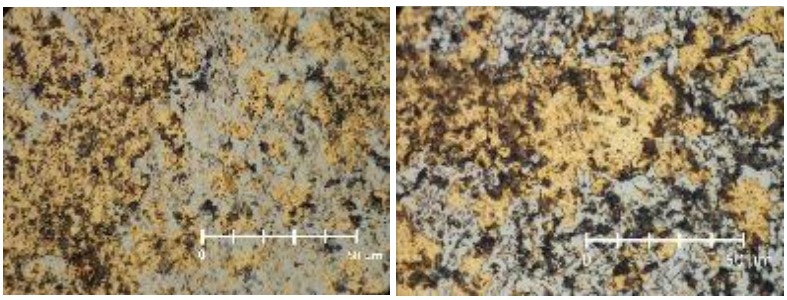


Рис. 2. Результаты испытаний на трение и износ

В целом наиболее оптимальные физико-механические и триботехнические свойства показывают образцы с добавлением УДПА в количестве 2–3% массовых.

Для определения зависимости структуры сплавов от содержания добавки, были проведены металлографические исследования спеченных образцов. На рис. 3 представлены микроструктуры бронзовой матрицы без алмазного наполнителя и с 3% концентрацией алмазных порошков УДПА.



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура сплава *а)* М2-01; *б)* М2-01 с содержанием алмазных порошков 3% УДПА

Наличие на границах раздела микрочастиц алмаза повышает развитость границ. Количественно степень развитости границ можно оценить по величине средней плотности границ $q_{ср}$:

$$q_{cp} = \frac{P_{cp}}{F_{cp}} = \frac{\sum P_i}{\sum F_i}, \quad (1)$$

где P_{cp} – средний периметр зерен;
F_{cp} – средняя площадь зерен.

Зависимость микротвердости матрицы от концентрации алмазного наполнителя (рис. 3а) отражает суммарное влияние дисперсионного и зерно граничного механизма торможения дислокаций.

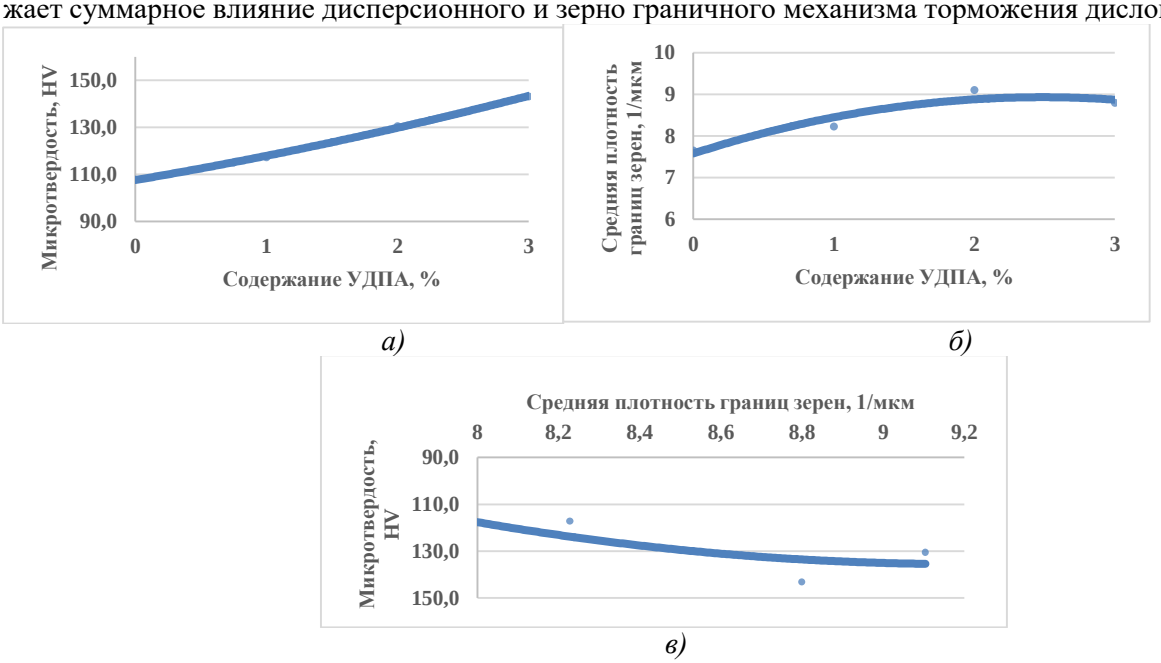


Рис. 3. Влияние концентрации частиц алмаза на среднюю плотность границ зерен (*а*) и микротвердость (*б*) и зависимость микротвердости от средней плотности границ зерен (*в*)

Зависимость микротвердости от содержания алмазного наполнителя (рис. 6*а*) и от средней плотности границ (рис. 3*в*) убедительно подтверждают ранее высказанное предположение. Отмечается также корреляция значений микротвердости и средней плотности границ зерен в зависимости от концентрации алмазных порошков (рис. 3*а* и 3*б*).

Упрочнение за счет введения в материал матрицы порошков природного алмаза можно рассчитать согласно уравнения Орована:

$$\zeta_N = \frac{Gb}{2\pi\lambda} k_o \ln\frac{\lambda}{2b} \quad (2)$$

Выбраны значения для G=0,367*10^5 МПа для бронзы [7], b=3.608 А – период кристаллической решетки бронзы, k_0=0.85.

Среднее расстояние между частицами рассчитали по формуле:

$$\lambda = \left[\left(\frac{200+L_H}{1.91L_H}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right] d \quad (3)$$

где L_H – весовая доля наполнителя;
d – диаметр или толщина частиц наполнителя.

Значения прироста предела текучести за счет дисперсионного упрочнения, рассчитанные по уравнению Орована, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Среднее расстояние между частицами (мкм) и дисперсионное упрочнение матрицы при введении ППА, МПа

Зернистость частиц	7/5			3/2			-40			УДПА		
Содержание частиц, %	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
λ, мкм	125.3 ±1.25	98.19 ±0.9	85.02 ±0.8	52.19 ±0.5	40.91 ±0.4	35.42 ±0.3	417.56 ±4	327.30 ±0.3	283.40 ±3	6.26± 0.06	4.91± 0.05	4.25± 0.04
ζ_N, МПа	0.17 ±0.01	0.69± 0.007	0.78± 0.008	1.22± 0.01	1.52± 0.01	1.74± 0.02	0.18± 0.002	0.23± 0.002	0.26± 0.003	8.24± 0.08	10.23± 0.1	11.63± 0.1

С целью определения количественного увеличения прочности материала при добавлении частиц алмазных порошков за счет зернограничного упрочнения были проведены соответствующие расчеты по эмпирическому соотношению Холла-Петча:

$$\Delta\sigma_T = kd^{-1/2} \quad (4)$$

где k – коэффициент Холла-Петча для данного материала;

d – размер зерна.

Для расчетов были взяты образцы, показывающие наибольшее увеличение прочности согласно теории Орована. Расчеты выполнены согласно данным, полученным по итогам обработки снимков микроструктуры поверхности с помощью программы Image Pro Plus.

Средний размер зерна был рассчитан согласно проведенным металлографическим исследованиям поверхности образцов:

$$d = \sqrt{\frac{4\left(\frac{S_{общ}}{N_{общ}}\right)}{\pi}} \quad (5)$$

где $S_{общ}$ – общая площадь объектов;

$N_{общ}$ – количество объектов.

При значении среднего размера зерен порядка 10^{-1} мкм коэффициент Холла-Петча равен примерно 0,01 МПа*м$^{1/2}$ [7].

Расчеты согласно соотношению Холла-Петча (рис. 4) свидетельствуют об увеличении предела текучести материала при добавлении частиц порошков природного алмаза. Максимального расчетного значения предел текучести достигает при содержании наполнителей 1% (рис. 4).

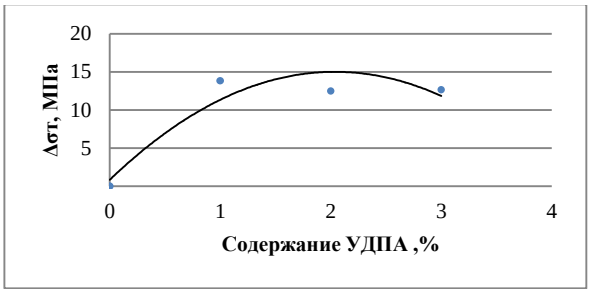


Рис. 4. Зависимость изменения значения предела текучести от содержания УДПА

Основные выводы. Выявлено, что добавка мелкодисперсных алмазных частиц в количестве 1–3% в металлическую матрицу положительно влияет на качество металлической связки. При этом наилучшие показатели наблюдаются у образцов с добавлением 2% УДПА.

Установлена взаимосвязь физико-механических свойств спеченного металлической матрицы на основе оловянистой бронзы М2-01 с содержанием и зернистостью наполнителя в виде порошков природного алмаза (7/5, 3/2, -40 и УДПА). Экспериментально определено, что для образцов с добавлением порошков природного алмаза повышается износостойкость, наименьший износ наблюдается у образцов с добавлением УДПА в количестве 2–2,5%.

Список литературы

1. Емельянова М.А., Романов Г.Н., Ноев И.И., Формирование абразивного материала на основе медь-титан-алмаз // Вестник ЯГУ. – 2010. – Т.7, №1. – С. 64-70.
2. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы: учебное пособие – М.: Изд-во МАТИ РГТУ, 2009. – 306 с.
3. Козлов Э.В, Жданов А.Н., Конева Н.А. Барьерное торможение дислокаций. Проблема Холла-Петча // Физ. мезомех. – 2006. – С. 81-92.

УДК 549.086
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-252-255

ВКЛЮЧЕНИЯ В ПРИРОДНОМ САПФИРЕ

Федотова М.А., Алексеева П.А.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»
E-mail: alepa270403@gmail.com

Аннотация. *В данной работе изучены внутренние особенности десяти ювелирных вставок сапфира круглой огранки методом оптической микроскопии. Были выявлены следующие виды скоплений внутренних дефектов: вуаль, отпечатки пальцев, ростовая зональность. На основании ряда обнаруженных признаков установлено, что изученные образцы имеют природное происхождение и были термически обработаны.*

Ключевые слова: *природный сапфир, синий сапфир, включения, диагностика, облагороженный сапфир*

INCLUSIONS IN NATURAL SAPPHIRE

Fedotova M.A., Alekseeva P.A.
Federal state autonomous educational institution of higher education «M. K. Ammosov North-Eastern Federal University»

Abstract. *In this study, the internal features of ten round-cut sapphire gemstones were examined using optical microscopy. The following types of internal defect clusters were identified: veils, fingerprints, and growth zoning. Based on a number of detected features, it was determined that the samples were natural in origin and heat-treated.*

Keywords: *natural sapphire, blue sapphire, inclusions, diagnostics, treated sapphire*

Сапфир - это драгоценный камень, относящийся к минералам корундовой группы. Его химический состав – оксид алюминия (Al_2O_3). По шкале твердости Мооса сапфир оценивается в 9 баллов, уступая только алмазу. Кристаллы сапфира имеют тригональную сингонию. Чистый корунд бесцветен, а различные оттенки сапфира возникают благодаря примесям-хромофорам [1, 2]. Например, синий цвет сапфира обусловлен изоморфным вхождением в состав решётки пары ионов железа-титан Fe^{2+}-Ti^{4+} [1, 2].

Сапфир обладает высоким показателем преломления, превышающим показатели многих других оптических материалов. Это связано с плотной упаковкой атомов кислорода в его кристаллической решетке и ионной поляризацией. Сапфир является одноосным и оптически отрицательным кристаллом. Это значит, что в нем существует одно направление (оптическая ось), где отсутствует двойное лучепреломление, а показатель преломления необыкновенного луча меньше, чем у обыкновенного луча. Дисперсия сапфира составляет 0,018, такая незначительная дисперсия приводит к слабой игре цвета, но это компенсируется насыщенностью основного оттенка камня.

Включения в сапфире бывают трех типов [3]: твердые, жидкие, газово-жидкие. Твердые включения представляют собой мелкие обломки других минералов, которые были захвачены при росте камня или после. Жидкие включения имеют вид полостей, заполненных жидкостью - водой, водными растворами или углекислотой.

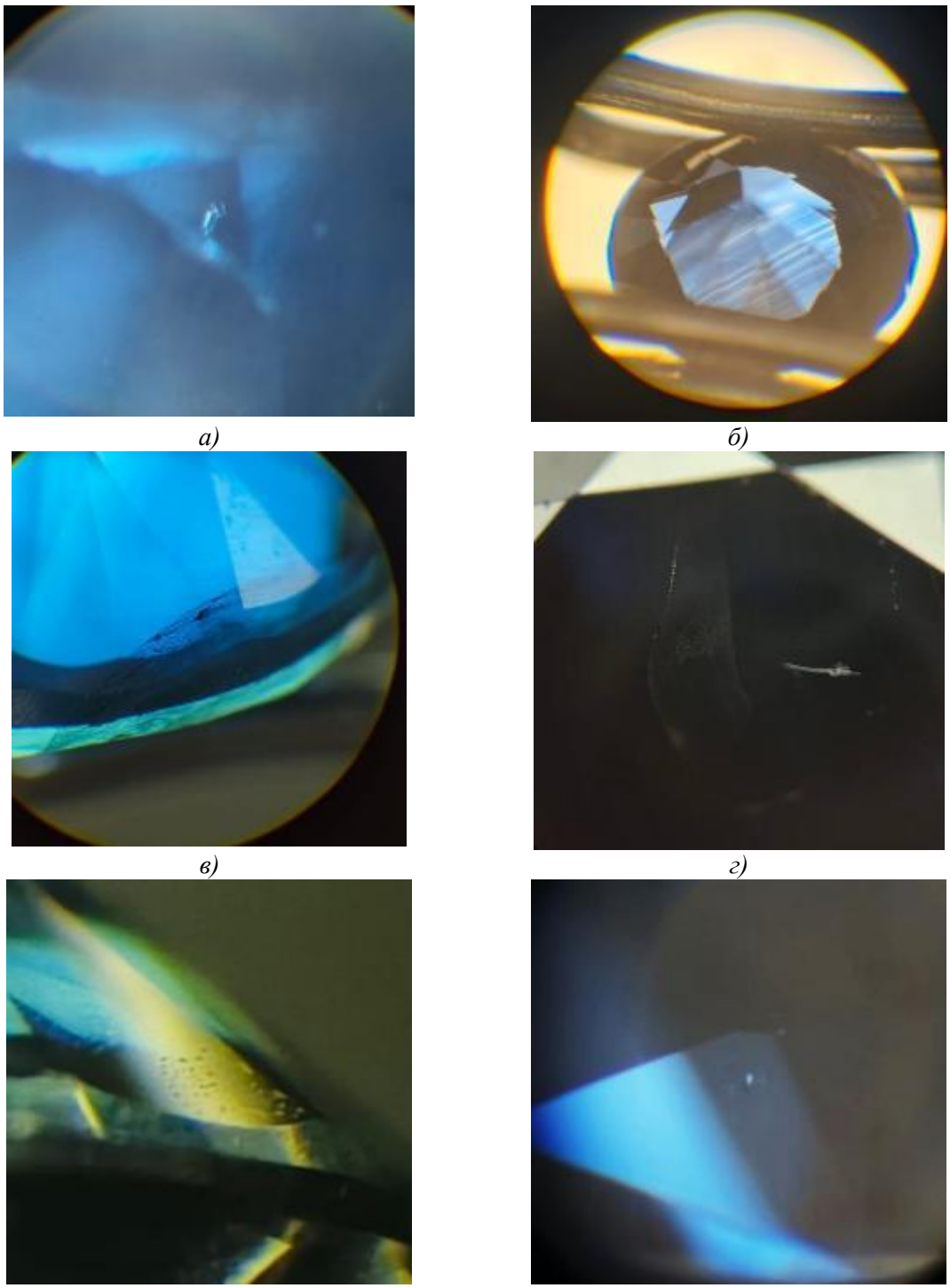


Рис. 1. Включения в исследованных образцах:
а) трехфазное газово-жидкое включение в образце С-2, х60; *б)* ростовая зональность в образце С-3, х40; *в)* залеченная трещина в образце С-5, х60; *г)* залеченная трещина в образце С-7, х60; *д)* вуаль из газово-жидких включений в образце С-9, х60; *е)* минеральное включение в образце С-10, х60

Различают однофазные, двухфазные и трёхфазные газово-жидкие включения. Однофазные - вся полость включения заполнена жидкостью. Двухфазные - вместе с жидкостью в полости присутствует газовый пузырь. Трёхфазные - помимо жидкости и газа, содержат ещё и кристаллик минерала. По СТО 45866412-05-2008 [4] в сапфирах могут быть следующие виды скоплений внутренних дефектов: вуаль (скопления жидких включений и (или) газово-жидких, имеющие неправильную изогнутую плоскостную форму), отпечаток пальца (скопления жидких и (или) газово-жидких включений, напоминающие по рисунку дактилоскопический узор пальца), облако (скопления мелких, с трудом видимых, при 10х увеличении твердых, жидких или газово-жидких включений, образующих матовую зону, похожую на

облако), ростовая зональность (прямолинейная цветовая зональность по зонам роста), пятнистость окраски (неравномерность окраски сапфира в виде отдельных зон или областей различного цвета), структурные неоднородности (полисинтетические двойники в виде параллельных плоскостей).

Исследование включений является основным методом диагностики природных камней, позволяющим не только отличить их от синтетических камней, но и в некоторых случаях определить их происхождение. Целью работы является изучение внутренних особенностей в образцах ювелирной вставки сапфира круглой огранки.

В данной работе были изучены 10 образцов (табл. 1) с показателями качества 2/2 (как указано поставщиком), фацетной клиновидной огранки круглой формы. Применялись следующие методы: оптическая микроскопия и наблюдение люминесценции. Изображения были получены на бинокулярном геммологическом микроскопе.

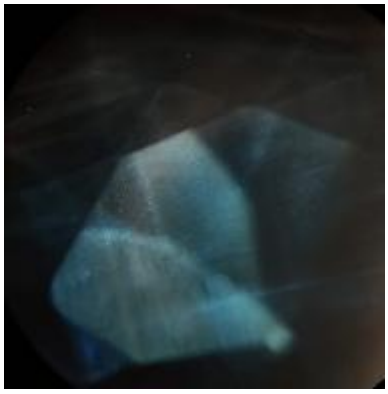
Таблица 1. Вес и диаметр образцов

Номер образца	С-1	С-2	С-3	С-4	С-5	С-6	С-7	С-8	С-9	С-10
Вес, ct	0,06	0,07	0,17	0,20	0,48	0,40	0,93	0,92	0,96	0,83
Диаметр, мм	2,49	2,41	3,49	3,49	4,59	4,57	5,62	5,56	6,10	6,11

Качество огранки во всех образцах варьируется от хорошего до неудовлетворительного [4]: имеются маленькие сколы и трещины по всей поверхности камня; смещена площадка относительно короны или калеты; рундист имеет неравномерную высоту и имеет маленькие сколы и трещины; площадка несимметрична; пропорции варьируются от хорошего до неудовлетворительного; имеются линии полировки; на некоторых образцах шип сколот или отсутствует. Все исследованные образцы были инертны в коротковолновой и в длинноволновой областях УФ-излучения.

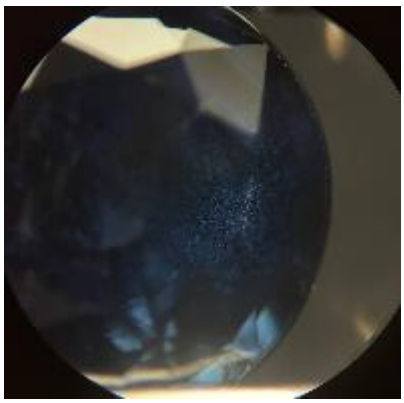
Образец С-1 имеет сколы, 2 вуали и большой скол у шипа со стороны павильона, трещину со стороны площадки выходящую на поверхность, множество тонких и больших вуалей со стороны площадки, самая большая из них имеет в себе включения в виде крестов. Рядом с данной вуалью расположено скопление минеральных включений (рис. 2 *а*). Образец С-2 имеет большую вуаль от рундиста до середины павильона, трещину со стороны площадки выходящую наружу, под ней трехфазное газово-жидкое включение (рис. 1 *а*). Образец С-3 имеет вуаль у шипа и ростовую зональность (рис. 1 *б*). Образец С-4 имеет ростовую зональность. Образец С-5 имеет трещину «отпечаток пальца» (рис. 1 в) у рундиста со стороны павильона близко к поверхности. Образец С-6 имеет 2 параллельные царапины на поверхности площадки и ростовую зональность. Образец С-7 имеет царапину на площадке и рядом трещину, выходящую на поверхность (рис. 1 г), большой скол на рундисте и вуаль под рундистом со стороны павильона. Образец С-8 имеет множество вуалей и шелк из включений лестничного вида. Образец С-9 имеет вуаль из газово-жидких и/или минеральных включений (рис. 1 *д*) под рундистом со стороны павильона и ростовую зональность. Образец С-10 имеет минеральное включение под площадкой (рис. 1 *е*) и ростовую зональность.

а)



б)

в)



г)

Рис. 2. Признаки термической обработки исследованных образцов:
а) залеченная трещина и скопление минеральных включений в образце С-1, х60;
б) растворение рутилового шелка в образце С-4, х60; *в)* лестничные вкрапления в образце С-8, х60;
г) растворение рутилового шелка в образце С-8, х60

Изучение внутренних дефектов образцов показало, что данные сапфиры были термически обработаны. Признаками термообработки являются: залеченная трещина [5] на образцах С-1(рис. 2 *а*), С-5 (рис. 1 *в*) и С-7 (рис. 1 *г*). В образцах С-1 и С-7 можно наблюдать точечные образования и частичное заживление, которые способствуют снижению отражательной способности трещины. В образце С-4 имеется растворение рутилового шелка (рис. 2 *б, г*) [6], который также является подтверждением термической обработки природного сапфира.

Интересным наблюдением является тот факт, что в образце С-8 имеется включение, похожее на «лестничные вкрапления» (рис. 2 *в*). Согласно [6] такие включения характерны для сапфиров Кашмира и Мадагаскара. Они представляют собой форму узорчатых облаков. Кашмирские синие сапфиры стали практически бесценными из-за того, что их добыча в кашмирских шахтах прекратилась более века назад.

Таким образом, внешний осмотр камней показал недостаточно качественную огранку по сравнению с бриллиантами. Изучение внутренних особенностей образцов показало, что они являются природного происхождения и были подвергнуты термической обработке. Результаты исследования подтверждают, что анализ включений важная часть для определения природы сапфиров.

Список литературы

1. Ахметшин Э. А., Савина Е. И., Плечов П. Ю., Петрова О. Б. Улучшение цветовых характеристик сапфиров fancy месторождения «Кедрового» методом термообработки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 30–50. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_30.
2. N. Udomkan, P. Limsuwan, P. Winotai, S. Meejoo (2005) Effects of heat treatment on blue sapphires as monitored by ESR spectroscopy. *International Journal of Modern Physics B*, vol. 19, no. 20, pp. 3273-3284. DOI:10.1142/S021797920503205X
3. Типы включений в минералах [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://mgc-labs.ru/blog/tipy-vklyuchenii-v-mineralah
4. СТО 45866412-05-2008: дата введения 2008-10-01. – Москва: Гохран России, 2008. – 40 с.
5. A. Peretti, M. Musa, W. Bieri, E. Cleveland, I. Ahamed, M. Alessandri, et al., (2018) Identification and characteristics of PHT (‘HPHT’) – treated sapphires – An update of the GRS research progress, GRS.
6. Palke, A. C., Saeseaw, S., Renfro, N. D., Sun, Z. & McClure, S. F. (2019) Geographic origin determination of blue sapphire. *Gems & Gemology*, vol. 55, no. 4, pp. 536-579. DOI:10.5741/GEMS.55.4.536

УДК 549.903.551
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-256-260

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ БРИЛЛИАНТОВ ПО ЦВЕТУ

Федотова М.А., Иванов М.А.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова»
E-mail: fedmar_fti@mail.ru

Аннотация. *В данной работе приводится обзор работ, посвященных разработке и применению физических инструментальных методов, а также цифровых методов для оценки цвета бриллиантов. Бриллиант визуально оценивается по совокупности оптических факторов таких как сверкание, дисперсия и сцинтилляция. Каждый из рассмотренных методов имеет ограничения, связанные с учетом и соединением указанных свойств в одну целую картину, используемую при визуальном методе.*

Ключевые слова: *бриллиант, цвет, классификация, оценка, физические методы, цифровые методы*

METHODS OF EVALUATION OF DIAMONDS BY COLOR

Fedotova M.A., Ivanov M.A.
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *This paper provides a review of studies devoted to the development and application of physical instrumental methods, as well as digital methods, for jewelry diamond color assessment. Polished diamonds are visually assessed based on a combination of optical factors, such as brilliance, dispersion, and scintillation. Each of the methods reviewed has limitations associated with taking these properties into account and combining them into a single, coherent picture, as used in the visual method.*

Keywords: *polished diamond, color, classification, evaluation, physical methods, digital methods*

Цвет бриллианта является свойством, определяющим его рыночную стоимость. Классификации бриллиантов по цвету появились давно, они постоянно изменялись и в конечном счете пришли к единому «ряду желтизны», который охватил палитру наиболее распространенных камней. Национальные и международные шкалы соответственно различаются. В российской шкале группы цвета имеют цифровое обозначение, в шкалах Геммологического института Америки (GIA) – буквенное, Всемирной ювелирной конфедерации (CIBJO) – словесное.

С момента своего появления в начале 1950-х годов международная шкала GIA с обозначениями от D до Z использовалась для оценки цвета подавляющего большинства бриллиантов ювелирного качества от бесцветных до светло-желтых. Использование этих буквенных обозначений для цветовых градаций бриллиантов в настоящее время является практически универсальным и используется во всем мире. Российская классификация бриллиантов [1] по цвету более детальная и включает в себя три шкалы: группы цвета бриллиантов Кр-17 и Кр-33; группы цвета бриллиантов Кр-57 с массой до 0,29 кар; группы цвета бриллиантов с массой более 0,30 кар.

Оценка бриллиантов по цвету производится визуально на белой специальной бумаге, в качестве стандартного светового источника принимается естественный «северный» свет или искусственный свет флюоресцентных ламп дневного холодного света. Помещение, где производится оценка по цвету, должно быть защищено от проникающих солнечных лучей, а стены, потолок и шторы должны быть окрашены в светло-серый цвет. Одежда эксперта так же должна быть «нейтральной» по цвету. Камень рассматривается сбоку, при этом бриллиант лежит в желобе из оценочной бумаги. Необходимо учитывать, что определение цвета бриллиантов, закрепленных в изделиях, затруднено, так как даже если соблюдены условия по освещенности, цвет алмазов будет искажаться цветом металла, ювелирных камней, любыми окрашенными веществами, скрытыми закрепкой.

В геммологических лабораториях и сертификационных центрах оценку цвета бриллианта выполняет опытный специалист на камнях в сравнении с коллекцией эталонных камней. По правилам CIBJO, если разница между одним из эталонных камней и рассматриваемым алмазом незаметна, то цвет алмаза обозначается как цвет данного камня. Если цвет алмаза промежуточный между цветами двух эта-

лонных камней, то он обозначается цветом более темного эталона. При сертификации камней в обязательном порядке фиксируется интенсивность ультрафиолетовой (УФ) флюоресценции. Флюоресценция анализируется на качественном уровне в ультрафиолетовых лучах (365 нм) и должна быть обозначена в соответствии со следующим рядом: отсутствует – слабая – умеренная – сильная.

Цвет камня визуально трудно определить объективно. Эксперты при оценке используют геммологическую лупу, увеличительные очки, стандартные образцы, а также некоторые устройства, такие как колориметры и микроскопы. Тем не менее, визуальная оценка может иметь ограниченную точность, субъективность. Поэтому наряду с визуальными в настоящее время разрабатываются инструментальные (физические) и цифровые методы определения цвета бриллианта. Целью данной работы является обзор разработанных инструментальных и цифровых методов и возможности их использования для определения цвета бриллианта.

В работе [2] обсуждается история и развитие системы оценки в условиях просмотра в лаборатории GIA с применением колориметров и приборов для наблюдения флюоресценции камней с переходом от ламп накаливания к люминесцентному освещению. При этом важное значение имела разработка среды просмотра, которая максимизирует эффективность для наблюдателя, и усовершенствование системы для учета алмазов в нижней части шкалы. Эти усовершенствования введены GIA для поддержки процесса визуальной оценки. При этом подчеркивается необходимость особых подходов при оценке бриллиантов, значительно отличающихся от эталонных камней – более крупных, с причудливыми формами, отличным от желтого оттенком, с большим количеством включений и фантазийных цветов.

Цвет бриллианта зависит от пропускания света через него и в значительной степени зависит от примесей азота, которые вызывают желто-коричневый оттенок, а также от структурных дефектов в кристалле. В редких случаях примесь бора приводит к появлению синего цвета или оттенка. В работах [3, 4] обращают внимание на некоторые проблемы, которые могут возникнуть при использовании спектроскопического оборудования для оценки цвета бриллиантов. Метод, который был использован Diamond Grading Laboratories (DGL), основан на цветовом показателе на интенсивности линии N3 при 415 нм. Однако этот индекс можно использовать только для бриллиантов цвета Cape-yellow, и опытный оценщик должен сначала оценить (чисто субъективно), обусловлен ли цвет конкретного бриллианта исключительно поглощением в ряду линий поглощения Кейп. Убедиться в этом можно, измерив спектр поглощения во всей видимой области, но, если этого измерения не проводить, наличие других полос поглощения, незамеченных глазом, может привести к занижению истинного цвета по цветовому показателю. Другим методом определения цвета алмаза являлось измерение спектра поглощения во всей видимой области спектра и вычисление координат цветности. Этот метод использовался в Лаборатории геммологического анализа (Рим) и далее разрабатывался в лаборатории HRD (Высший совет по алмазам) в Антверпене. Тем не менее, коричневые бриллианты с поглощением, которое непрерывно увеличивается от красного конца спектра к синему концу спектра, довольно трудно оценить по цвету с помощью этого метода.

Ярко люминесцирующие бриллианты будут давать низкий показатель цвета при использовании метода DGL, особенно сильно окрашенные алмазы, а также будут давать ошибочные значения координат цветности в методах, анализирующих весь видимый спектр [3, 4]. Аналогичные ошибки вызывает регистрация света, отраженного от передней поверхности бриллианта.

В исследовании [5] изучили полный набор бриллиантов D-Z, представленных в лаборатории GIA в течении всего 2017 года. Данные оценивались на основе свойств типов алмазов по физической классификации, а также факторов качества. Известно, что большинство алмазов типа I и типа II, отличающихся наличием или отсутствием обнаруживаемого азота в их в спектрах инфракрасного диапазона (ИК-спектрах), образовались в очень разных условиях. Эти различия выявились и на изученных бриллиантах. Они показали довольно четкое распределение. Большинство бриллиантов типа II и типа IaB имели цвет D. Для бриллиантов типа II средний вес в каратах больше, а качество огранки выше. Кроме того, бриллианты типа II демонстрировали бимодальное распределение чистоты, при этом значительный процент бриллиантов как типа IIa, так и типа IIb имели чистоту IF (или чистоту VVS1, которая, возможно, улучшается до IF), в то время как остальные бриллианты типа II больше напоминали распределение четкости типа I.

Большинство бриллиантов, представленных GIA, относилось к типу Ia или IaAB [5], которые, вероятно, образовались в континентальной литосфере. Они обычно содержат большое количество азота и часто не имеют заметной флуоресценции. Алмазы типа II демонстрировали несколько отчетливо различающиеся модели показателей качества, которые, вероятно, соответствуют их уникальному формированию, наряду с решениями по огранке, вытекающими из этих различий. Авторы [5] пришли

к выводу, что нет двух одинаковых природных алмазов (бриллиантов), каждый из них имеет свой собственный ИК-спектр, форму огранки и историю формирования.

Присутствие азота в алмазах типа Ia приводит к желтому оттенку, интенсивность которого увеличивается с увеличением содержания азота (классификация от D до Z). В работе [6] были измерены электронные и колебательные спектры алмазных стандартов GIA для разработки и стандартизации методологии с использованием вакансий на основе азота. Данные о положении пика пластинчатого кристалла и его ширине были проанализированы на предмет возможной корреляции с классификацией цвета. Данные о положении пика пластинки, полученные из ИК-спектров, дали хорошую корреляцию с оценкой цвета до оценочной градации L. Для оценочных градаций от E до M данные хорошо соответствовали как квадратичным ($R2 = 0,92 \pm 0,02$), так и линейным уравнениям ($R2 = 0,91 \pm 0,01$). Используя подбор положения пика, были оценены оценочные градации цвета 336 алмазов и сравнены с визуальными градациями, которые были определены оценщиками Геммологического института Индии (GII). Поглощение пика N3 (415 нм) в видимой области также дало хорошую корреляцию с оценкой цвета. Оценочные градации цвета алмазов, отнесенных к тестовым образцам, были определены с использованием УФ-данных. Авторы [6] считают, что представляется возможным разработать инструментальную методологию для оценки цвета алмазов типа Ia, основанную только на измерениях поглощения в видимой области.

В работе [7], предложен метод для определения степени окраски алмазов в более длинных волнах, таких как микроволны (МВ). Показано, что необработанные алмазы и бриллианты рассеивают одинаково свет при использовании сверхвысокой частоты (СВЧ). Поэтому с использованием методов передачи или отражения и резонаторных методов было ими разработано несколько волноводов, перекрывающих диапазон частот 3,95–26,5 ГГц с подходящими резонаторными зеркалами. Хорошая корреляция между параметрами и содержанием азотных примесей была обнаружена с использованием метода пропускания или отражения. Сделан вывод [6], что измерения электромагнитных свойств алмазов в диапазоне частот СВЧ могут быть использованы для определения содержания в них азота и цветовой градации, и результаты МВ-метода хорошо согласовывались с результатами, полученными по инфракрасным спектрам алмазов.

В работах [8, 9] предложен метод оценки цвета, заключающийся в определении цветовых параметров прозрачных и полупрозрачных насыщенных образцов, в том числе алмазов и бриллиантов, по их цифровым изображениям, полученным с помощью приемников излучения на основе матриц с шаблонами цветоделения. Предложен [8, 9] колориметр на основе новых разработанных матриц, который предположительно позволит решить проблему оценки так называемых насыщенных цветов. Колориметр оснащен специальным боксом для исследования прозрачных и полупрозрачных образцов. Также устройство оснащено камерой с матрицей, имеющей более широкий цветовой охват, включающий практически все цвета, воспринимаемые человеческим глазом. Авторы [8, 9] считают, что этого достаточно, чтобы адекватно, без потерь воспроизводить координаты насыщенных цветов, таких как зеленый, сине-зеленый, синий. Устройство относится к фотоэлектронной технике, а именно, к измерению цвета (колориметрии) прозрачных и полупрозрачных материалов, и, в частности, к колориметрии цифровых изображений.

Цифровой метод предложен в работе [10]. Способ, работающий с использованием компьютеризированной системы для определения группы цвета бриллианта, в котором цвет бриллианта сопоставляют с цветом множества бриллиантов, каждый из которых имеет присвоенную ему группу цвета. При этом компьютеризированная система включает в себя устройство получения оптического изображения, модуль процессора и модуль вывода, функционально соединенные вместе.

В статье [11] показана стратегия проверки оттенков драгоценных камней в зависимости от машинного зрения. Чтобы получить изображения бриллиантов, используется источник света, основанный на координационном круге. Чтобы компенсировать разницу в источнике света, в отдельных однородных областях на основе разработанной нейронной сети выделяются комбинированные цветовые блики, в том числе свободные и комбинированные блики цветового тона и насыщенности. С помощью классификатора и перцепционной коррекции для цветокоррекции случайных текстур бриллианты могут быть оценены путем затенения. Данная система выполняет оценку качества бриллианта, основываясь на цвете бриллианта, текстуре и чистоте.

Человеческий глаз воспринимает бриллиант как совокупность его поверхностных и внутренних оптических свойств, проявляющихся как сверкание, дисперсия и сцинтилляция. Сверкание (бриллиация) – это явление возврата огранкой света за счет эффектов внутреннего отражения. Дисперсия («огонь», «игра») бриллианта воспринимается как яркие разноцветные блики на его поверхности, появляющиеся в результате дисперсии света: разности в показателях преломления для лучей красного и

фиолетового концов спектра. Сцинтилляция бриллианта – это явление, наблюдаемое при передвижении бриллианта относительно источника света. В этом случае вся картина белых и цветовых участков в камне начинает сложным образом изменяться: различные грани то вспыхивают, то угасают, различные цвета дисперсии сменяют друг друга. Из этого следует, что бриллиант трудно оценить в неподвижном состоянии.

В работе [12] предложен подход к моделированию, сочетающий энтропийный метод и формулу цветоразности, для количественной оценки мерцания алмаза. Изображения 66 бриллиантов были получены в диапазоне от 0 до 105 оборотов с 15 интервалами. Цветовая разница соответствующих пикселей на соседних изображениях угла поворота рассчитывалась с помощью программы MatLabr2014a, которая указывала на изменение цвета бриллианта за счет его мерцания. Пороговое значение было определено для разделения цветового различия на семь интервалов цветового различия, процентное соотношение которых указывало на площадь изменения цвета. Цветовая разница и процентное содержание были всесторонне проанализированы с использованием энтропийного метода для объективной и количественной оценки сцинтилляций бриллиантов. Яркость была основным фактором, влияющим на мерцание бриллианта, в то время как цветность и оттенок также значительно влияли на него.

В работе [13] описаны результаты проекта по использованию искусственных нейронных сетей (ИНС) для оценки бриллиантов по цвету. В качестве базы был взят набор данных, соответствующий различным изображениям, полученным веб-сканером. Нейросетевая система оказалась способна классифицировать различные типы бриллиантов на основе входного изображения, выполнив следующие шаги: формирование информации для набора данных посредством веб-сканирования, загрузки множества изображений бриллиантов; реализация аугментации данных относительно предыдущих изображений, увеличение количества выборок в наборе данных; реализация операций свертки для фильтрации данных и их вставки в нейронную сеть, состоящую из плотно связанных слоев; оценка входного изображения в системе и формирование выходных данных, связанных с классификацией бриллианта. Пользователь должен был вручную вводить бриллиант и диапазон, который он хочет получить, чтобы сформировать набор данных. Оказалось, что система может выполнять вспомогательные алгоритмы обработки изображений для обеспечения качества полученных данных. Тем не менее, авторы [13] пришли к выводу, что для эффективной оценки цвета бриллиантов для ИНС требуется больший набор данных для обеспечения её производительности.

Проведенный обзор позволяет сделать следующие выводы. Инструментальная классификация бриллиантов по цвету рассматривается некоторыми геммологами как желательная по двум причинам. Во-первых, она устраняет субъективное сравнение с эталонными камнями, заменяя их числовым индексом цвета, и, во-вторых, ее может проводить относительно неопытный специалист. Как правило, спектроскопические приборы (в инфракрасном или УФ-видимом спектральном диапазоне) используются и в промышленности, и в научных целях для регистрации спектров бриллиантов и необработанных алмазов, но их результаты недостаточно точны для определения степени их окраски. Цифровые методы пока имеют значительные ограничения в учете всех факторов, влияющих на оценку цвета бриллианта.

Основная проблема заключается в том, что падающие на бриллианты лучи света из-за своих физических характеристик вызывают явления рассеяния и многократного отражения. Это выводит процесс оценки цвета бриллиантов за рамки классической колориметрии. При оценке бриллианта необходимо оценить общий вид драгоценного камня, и это объясняет, почему до сих пор цвет бриллианта определяется в основном при визуальном осмотре. Тем не менее, технологии развиваются, поэтому важно быть в курсе изменений, которые могут оказаться полезными при установлении цветовых градаций бриллиантов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52913-2008 «Бриллианты. Классификация. Технические требования».
2. King J.M., Geurts R.H., Gilbertson A.M., Shigley J.E. Color Grading «D-to-Z» Diamonds at the GIA Laboratory// Gems & Gemology – 2008, Vol. 44, No. 4. – pp. 296–321.
3. Collins A.T. Pitfalls in Color Grading Diamonds by Machine// Gems & Gemology – Spring 1984. – pp. 14-21. DOI: 10.5741/GEMS.20.1.14
4. GB 2036360 A, 1980.
5. Eaton-Magaña S. Ardon T., Breeding C.M., Shigley J.E. Natural-Color D-to-Z Diamonds: A Crystal-Clear Perspective // Gems & Gemology. – Fall 2020. – pp. 318–335.
6. Ardalkar R. et al. Spectroscopic Evaluation of Colour Grading of Type Ia Diamonds†. – 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4593034/v1

7. Rabinowitz Y., Etinger A., Yahalom A., Cohen H., Pinhasi Y. Microwave Spectroscopy as a Potential Tool for Color Grading Diamonds// Energies. – 2021, 14, 3507. DOI: 10.3390/en14123507.
8. Парвулюсов Ю.Б., Жбанова В.Л. Принципы построения колориметра для оценки насыщенных цветов// Геодезическое приборостроение, Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017, № 5. – с. 122-126.
9. Никишов Д. Е., Жбанова В. Л. Колориметр на основе системы XYZ// Тезисы докладов XXIV Междунар. НТК студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – Москва, 15-16.03.2018. – с. 137.
10. RU 2 739 134 C1, 2020.
11. Navale1 M., Bikchandani M., Bhosale V., Bhosale P., Ghadge S. Diamond Quality Assessmant System Using Machine Learning// International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). – 2020, Vol. 7, Issue 4. – pp. 874- 876.
12. Liu F., Guo Y., Lv S., Chen G. Application of the Entropy Method and Color Difference Formula to the Evaluation of Round Brilliant Cut Diamond Scintillation// Mathematics. – 2020, 8, 1489.
13. García-Torres J. M. Implementing a deep learning algorithm for diamond classification //Florida International University. – 2018.

УДК 549.086
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-261-264

ВКЛЮЧЕНИЯ В ПРИРОДНОМ РУБИНЕ

Эверстова Д.Г.
ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук
E-mail: everstova_d@mail.ru

Аннотация. *В работе проведено геммологическое исследование десяти ювелирных вставок из природного рубина с целью изучения их внутренних особенностей. Методами микроскопии выявлен комплекс диагностически значимых включений, на основании которого установлен факт термической обработки образцов в среде флюса. Методом сравнительного анализа предположено географическое происхождение некоторых образцов рубина: Таджикистан и Вьетнам. Результаты подчеркивают важность анализа включений для определения природы и происхождения рубинов.*

Ключевые слова: *драгоценные камни, природные рубины, включения в рубинах, термическая обработка, диагностика*

INCLUSIONS IN NATURAL RUBY

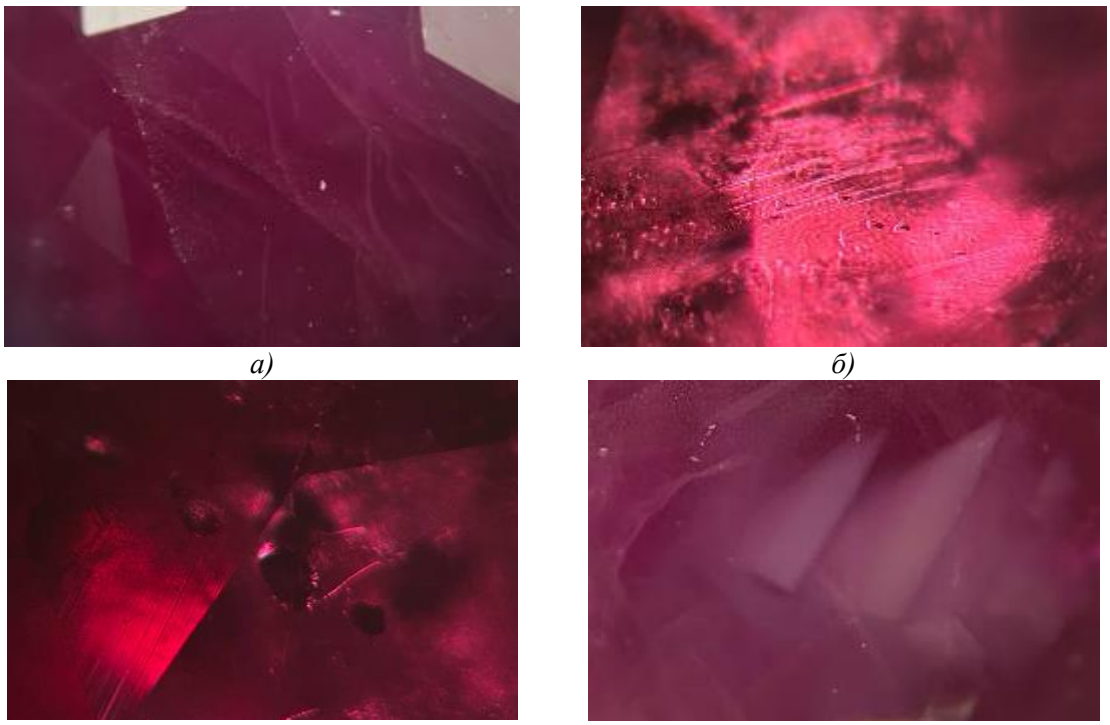
Everstova D.G.
Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This paper presents a gemological study of ten faceted jewelry inserts of natural rubies, conducted to examine their internal characteristics. A set of diagnostically significant inclusions was identified using microscopic methods. Based on which the fact of flux heat treatment was established. Comparative analysis of some of the crystals suggested their geographical origins: Tajikistan and Vietnam. The results highlight the importance of inclusion analysis in determining the nature and origin of rubies.*

Keywords: *gemstones, natural rubies, inclusions in rubies, heat treatment, diagnostics*

Рубин – это одна из самых ценных и известных разновидностей корунда, чья красная окраска обусловлена наличием ионов хрома [1]. В природных условиях кристаллы рубинов крайне редко образуются без внутренних дефектов – большинство из них содержит многочисленные включения, трещины и зоны с неравномерной окраской. Исследование внутренних включений служит основным методом диагностики природных камней, позволяя не только отличить их от синтетических, но и в ряде случаев определить их происхождение. Цель данной работы – выявление и описание характеристик включений в природных рубинах. Для исследования были отобраны десять ограненных вставок из рубина массой от 0,06 до 1,27 карата. Изучение образцов проводилось с помощью бинокулярного геммологического микроскопа в проходящем и отраженном свете при различных увеличениях.

В результате проведенных исследований в образцах рубина был идентифицирован комплекс разнотипных включений. Наиболее распространенными являлись газово-жидкие включения, формирующие так называемую «вуаль», которая состояла из многочисленных субмикроскопических пузырьков (рисунок 1, а) [2–4]. Помимо этого, в трех образцах были зафиксированы двухфазные (жидкость + газ) включения (рисунок 1, б), что является типичным признаком природного формирования кристаллов. В нескольких образцах наблюдались непрозрачные включения темного цвета (рисунок 1, в), имеющие как округлую, так и неправильную форму, их точная минералогическая природа требует дополнительного исследования. Также, в одном образце наблюдалось плотное, угловатое полосчатое образование молочного цвета (рисунок 1, г).

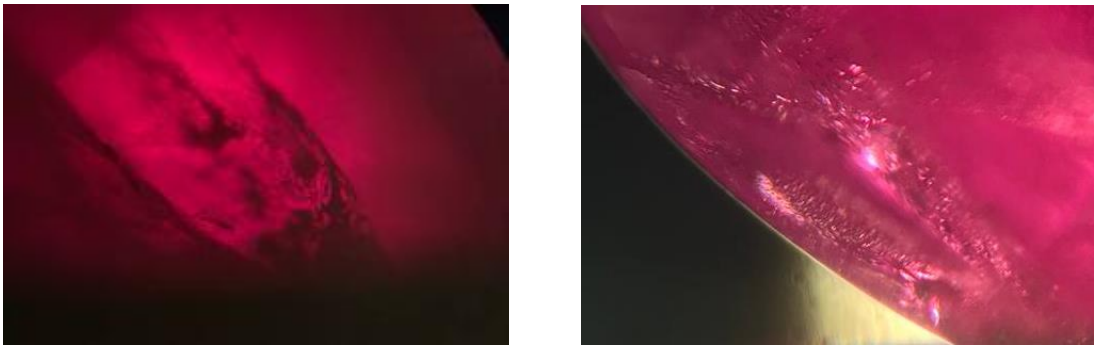


а) *б)*

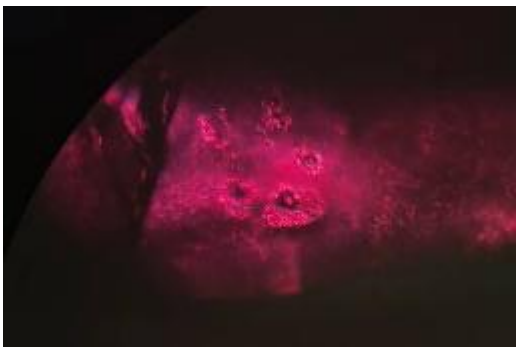
в) *г)*

Рис. 1. Включения, наблюдавшиеся в образцах: *а)* газово-жидкие включения, формирующие «вуаль» (отр.св., х30); *б)* двухфазные включения (жидкость + газ) (пр.св., х60); *в)* темные включения (пр.св., х60); *г)* плотное, угловатое полосчатое образование молочного цвета (отр.св., х30)

Для улучшения цвета и прозрачности природные рубины часто нагревают до высоких температур. Этот процесс, называемый термической обработкой, обычно проводят с добавлением флюса – специального химического вещества, которое, плавясь, способствует «залечиванию» трещин [5–7]. При микроскопическом исследовании таких образцов можно наблюдать комплекс диагностических признаков. Темные, непрозрачные включения, имеющие сложную ветвящуюся форму, описываются, как реликты флюса (рисунок 2, а, б). Эти образования возникают в результате заполнения флюсом микротрещин с последующей его кристаллизацией. Также наблюдалась отчетливая иридизация. (рисунок 2, в). В одном из образцов были обнаружены включения, окруженные характерными радиальными трещинами (рисунок 2, г), что является признаком твердых включений после термической обработки.



а) *б)*



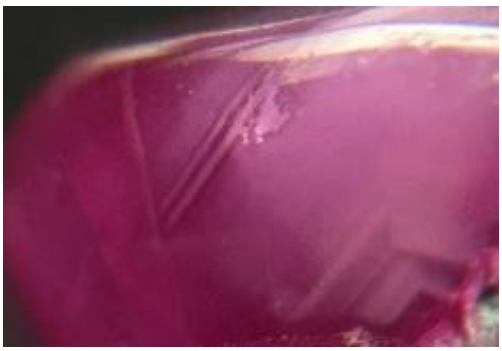
в) *г)*

Рис. 2. Признаки термической обработки рубинов в среде флюса:
а) включение, представляющее собой реликты флюса (пр.св., х60); *б)* трещина, «залеченная» при термообработке (пр.св., х30); *в)* иридизация в «залеченной» зоне (отр. св., х40); *г)* включения, окруженные радиальными трещинами (пр. св., х60)

Таким образом, комплекс включений указал на мраморный генезис некоторых исследованных рубинов. Так, в ряде образцов были обнаружены выходящие на поверхность белые твёрдые включения, вероятно, представляющие собой остатки вмещающего мрамора [8], что является одним из диагностических признаков такого происхождения. Дополнительным подтверждением послужило красное свечение разной интенсивности всех исследуемых образцов при воздействии УФ излучения [4].

Определение географического происхождения рубинов из мраморных месторождений является сложной задачей, поскольку эти камни сформировались в одинаковых геологических условиях. Поэтому в них наблюдается значительное совпадение геммологических свойств. Однако существуют некоторые включения, которые типичны для конкретных месторождений.

К мраморным месторождениям относятся рубины из Мьянмы (Могок, Монг Су), Вьетнама, Таджикистана и Афганистана. Как указано в работах [3, 9], присутствие в природных рубинах включений, окруженных «ореолом», могут быть признаками того, что рубины происходят из месторождений Таджикистана (рисунок 3, *а*). Также, плотное, угловатое полосчатое образование молочного цвета, обнаруженное в одном из образцов, более типично для рубинов Вьетнама (рисунок 3, *б*) [3, 10].



а) *б)*

Рис. 3. Включения, которые могут указывать на происхождение рубина:
а) включения, окруженные «ореолом» (отр.св., х60), возможные признаки рубина из Таджикистана; *б)* плотное, угловатое полосчатое образование молочного цвета, возможные признаки рубина из Вьетнама (отр.св., х30)

Таким образом, проведенное исследование внутренних особенностей позволило предположить географическое происхождение некоторых образцов. По совокупности диагностических признаков три образца, вероятно, относятся к месторождениям Таджикистана и один образец демонстрирует характеристики, сходные с рубинами Вьетнама. Для оставшихся образцов выявление происхождения не представляется возможным из-за наличия распространенных включений, не позволяющих однозначно идентифицировать их происхождение.

Список литературы

1. Смит Г. Драгоценные камни: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 558 с.
2. Giuliani G., Groat L.A., Fallick A.E., Pignatelli I., Pardieu V. Ruby Deposits: A Review and Geological Classification // Minerals. 2020.10, 597. DOI: 10.3390/min10070597.
3. Palke A.C., Saeseaw S., Renfro N.D., Sun Z., McClure S.F. Geographic origin determination of ruby // Gems&Gemology. 2019. Vol. 55. No. 4. P. 580-613. DOI: 10.5741/GEMS.55.4.580
4. Gao Y., He M., Lucas A.C., Sun X., Zhou D., Huang T., Li K., Fortaleché D., Lin M., Zhu Y. et al. Ruby from Longido, Tanzania: Mining, Color, Inclusion, and Chemical Features // Crystals. 2024. 14, 383. DOI: 10.3390/cryst14040383.
5. Calvo del Castillo H., Deprez N., Dupuis T. et al. Towards the differentiation of non-treated and treated corundum minerals by ion-beam-induced luminescence and other complementary techniques // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2009. Vol. 394. P. 1043–1058. DOI: 10.1007/s00216-009-2679-y.
6. McClure S.F., Kane R.E., Sturman N. Gemstone Enhancement and Its Detection in the 2000s // Gems & Gemology. 2010. Vol. 46. № 3. P. 218–240. DOI: 10.5741/GEMS.46.3.218.
7. Abdel-Wahab H., Gund T., Bozzelli J. Color Lightening Chemical Treatments for the Improvement of the Deep Red Colored Ruby Stones' Quality // American Journal of Chemical and Biochemical Engineering. 2023. Vol. 7. № 2. P. 20–23. DOI: 10.11648/j.ajcbe.20230702.12.
8. Bowersox G.W., Foord E.E., Laurs B.M., Shigley J.E., Smith C.P. Ruby and Sapphire from Jegdalek, Afghanistan // Gems & Gemology. 2000. Vol. 36. № 2. P. 110–126. DOI: 10.5741/GEMS.36.2.110
9. Sorokina E.S., Litvinenko A.K., Hofmeister W., Häger T., Jacob D.E., Nasriddinov Z.Z. Rubies and sapphires from Snezhnoe, Tajikistan // Gems and Gemology. 2015. Vol. 51. P. 160–175. DOI: 10.5741/GEMS.51.2.160.
10. Kane R.E., McClure S.F., Kammerling R.C., Khoa N.D., Mora C., Repetto S., Khai N.D., Koivula J.I. Rubies and Fancy Sapphires from Vietnam // Gems & Gemology. 1991. Vol. 27. № 3. P. 136–155. DOI: https://doi.org/10.5741/GEMS.27.3.136

УДК 539.422.24: 691.771
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-265-269

СТРУКТУРНАЯ ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Яковлева С.П., Махарова С.Н.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск
E-mail: snmachar@yandex.ru

Аннотация. *Решение актуальных задач поиска надежных методов раннего обнаружения повреждений в металлических изделиях и повышения точности прогнозирования их усталостной долговечности требует глубокого понимания структурных изменений материала на разных стадиях нагружения. Методом статистического анализа микротвердости исследованы структурная неоднородность и поврежденность трёх зон разрушившегося при эксплуатации на Севере алюминиевого сплава АД33, характеризующихся разной степенью развития малоцикловой усталости. Показано, что разрушению сплава предшествует прогрессирующая структурная неоднородность и отклонение распределения микротвердости от гауссова. Установлены количественные характеристики критического состояния сплава перед разрушением: коэффициенты неоднородности структуры, накопления поврежденности и приведенная частотность выборки возрастают в 3–4 раза при катастрофическом снижении среднего значения микротвердости на 26%.*

Ключевые слова: *алюминиевый сплав, малоцикловая усталость, поврежденность, микротвердость*

STRUCTURAL DAMAGEABILITY AND FAILURE OF AN ALUMINUM ALLOY UNDER LOW-CYCLE FATIGUE IN NORTHERN CONDITIONS

Yakovleva S.P. , Makharova S.N.
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North

Abstract. *Solving the urgent problems of finding reliable methods for the early detection of damage in metal products and improving the accuracy of predicting their fatigue durability requires a deep understanding of the material's structural changes at different loading stages. The method of statistical analysis of microhardness was used to study the structural inhomogeneity and damageability of three zones of the aluminum alloy AD33, which failed during operation in the North, characterized by different degrees of low-cycle fatigue development. It is shown that the failure of the alloy is preceded by progressive structural inhomogeneity and a deviation of the microhardness distribution from Gaussian. Quantitative characteristics for the critical state of the alloy before failure have been established: the coefficients of structural inhomogeneity, damage accumulation, and the reduced sampling frequency increase by 3–4 times with a catastrophic 26% decrease in the average microhardness value.*

Keywords: *aluminum alloy, low-cycle fatigue, damageability, microhardness.*

Введение. Конструкционные алюминиевые сплавы занимают ведущее положение в современных отраслях промышленности благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных и технологических характеристик. Они обладают высокой удельной прочностью, деформируемостью, хорошей коррозионной стойкостью, легко поддаются основным видам обработки – литью, прессованию, прокатке, резке, шлифованию и т. д. Этот комплекс свойств предопределил их широкое применение в ответственных деталях и конструкциях автомобильной и авиационно-космической техники, где требуется гарантированная надежность при циклическом нагружении. Для обеспечения длительной и безопасной эксплуатации таких изделий необходимо глубокое понимание процессов, происходящих в них на микроструктурном уровне под воздействием переменных нагрузок, и их влияния на рабочие характеристики материалов, так как эти процессы могут приводить к усталостным разрушениям.

Как известно, потеря несущей способности и разрушение технических объектов обычно обусловлены образованием в материале локальных повреждений структуры, накопление и слияние которых

приводит к зарождению и развитию микро- и макротрещин. Одним из основных условий решения фундаментально-прикладных проблем описания процессов разрушения, в том числе на стадии накопления поврежденности и образования трещин, является развитие феноменологических подходов, основанных на экспериментальных данных. При этом важно приближение параметров экспериментов к эксплуатационным, в связи с чем особый интерес и актуальность приобретают исследования, выполненные на объектах, разрушившихся в ходе реальной эксплуатации.

Среди алюминиевых сплавов особую значимость и востребованность приобрел сплав АД33 системы Al-Mg-Si, оптимально сочетающий высокую прочность с технологичностью и часто применяемый в технических объектах, испытывающих низкочастотные высокоамплитудные нагрузки. К таким объектам относятся внутренние герметизирующие оболочки (лейнеры) автомобильных газотопливных баллонов для компримированного природного газа, специфика функционирования которых связана с силовыми воздействиями в режиме малоциклового нагружения. В данной работе представлены результаты исследования усталостной поврежденности, возникшей в процессе эксплуатации лейнера из сплава АД33 в условиях Якутии и приведшей к появлению усталостных трещин, обусловивших катастрофическое разрушение конструкции. Цель работы – выявление структурных особенностей и количественная оценка поврежденности металла зоны предразрушения, сформировавшейся в горловине лейнера под воздействием малоцикловых нагрузок при эксплуатации на Севере. Имеющиеся данные в области изучения усталостных процессов в алюминиевых сплавах получены большей частью при многоцикловом нагружении лабораторных образцов; процессы при эксплуатационной малоцикловой усталости сплава АД33, в том числе в условиях климатического холода, остаются практически неизученными.

Методы исследования. Для оценки структурной поврежденности, накопленной в металле лейнера при его эксплуатации, использован метод микроиндентирования, предложенный в работе [1]. Показатель микротвердости интегрально отражает совокупность структурных изменений, вызываемых в металлах внешними нагрузками: процессов упрочнения и разупрочнения, появления пор, микротрещин и т. п. Очевидно, что сопротивляемость микрообъема металла вдавливанию индентора характеризует уровень его дефектности, а статистика распределения набора значений микротвёрдости будет кардинально меняться при переходе от исходного состояния металла к повреждённому.

Статистический анализ микротвердости как инструмент исследования микромеханических свойств металла позволяет перейти от единичных местных замеров к комплексной оценке структурных изменений, в частности при циклическом нагружении. К преимуществам метода помимо возможности фактически неразрушающего контроля реальных конструкций на различных стадиях нагружения относятся высокая чувствительность к начальным стадиям поврежденности и простота реализации, что важно для создания методик диагностики состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Подробное описание метода будет дано ниже в п. 3.2.

Замеры микротвердости проводили на шлифе, перпендикулярном плоскости усталостного излома. Были подготовлены три выборки значений микротвердости из трех зон материала, находящихся на разной глубине от излома. Зона 1 находилась на расстоянии ≈ 9 мм от излома (условно-исходное состояние материала); зона 2 – на расстоянии ≈ 5 мм (промежуточное состояние или стадия накопления поврежденности); зона 3 – на расстоянии ≈1,0 мм от излома (зона предразрушения).

Микротвердость замеряли на приборе «ПМТ-3» при нагрузке на индентор 0,098 Н (10 гс). Количество замеров для каждой зоны составило более 200 отпечатков. Статистический анализ проведен в программной среде EXCEL.

Основные результаты и их обсуждение.

Конструкция газотопливного баллона и его разрушение. Разрушившийся баллон модели БА 100.20.327/1660 относится к 3-му типу баллонов по ГОСТ Р 51753-2001, в соответствии с которым вся поверхность лейнера покрыта стеклоэпоксидной армирующей оболочкой. Баллон был установлен на транспортном средстве, эксплуатация которого происходила в условиях резко-континентального климата Центральной Якутии. Разрушение баллона с отрывом днища лейнера со стороны заглушки, разделением его на несколько частей и метанием осколков произошло задолго до выработки расчетного ресурса. Подробно разрушение баллона рассмотрено в работе [2], в которой показана усталостная природа очаговых трещин, возникших в лейнере под воздействием малоцикловых нагрузок, характерных для режимов работы автомобильных газотопливных баллонов. Очаговые усталостные трещины сформировались на внутренней поверхности эксплуатационной горловины лейнера; магистральные усталостные трещины развивались от очаговых вглубь стенки горловины.

Применение статистического анализа микротвердости для исследования поврежденности металлов. Циклическое нагружение, в отличие от других видов силового нагружения, инициирует в

металлах микропроцессы деформации с образованием полос сдвига и зон локализованной пластичности даже при макроскопически упругом поведении материала. Происходящее при этом деформационное упрочнение локальных объемов на определенном этапе переходит в их разупрочнение с последующим возникновением микронесплошностей. Развивающаяся структурно-механическая неоднородность формирует усталостно-повреждённое состояние материала. Процесс накопления микроповреждений, сопровождающийся изменением локальных прочностных свойств металла, объективно фиксируется падением параметра микротвёрдости. Соответственно, статистический анализ репрезентативного набора значений микротвёрдости дает возможность проведения комплексной оценки структурных изменений и деградации материала в процессе циклического нагружения.

Для изучения усталостной микроповрежденности сплава АД33, из которого выполнен разрушившийся лейнер, вычисляли предложенный в работе [1] коэффициент накопления поврежденности k_p, характеризующий относительное увеличение плотности поврежденности при эксплуатации и рассчитываемый по формуле

$$k_{p=} K_p/K_p^0 \ ,$$

где K_p – приведенная частотность выборки замеров микротвердости материала на исследуемом этапе эксплуатации; K_p^0– приведенная частотность выборки замеров микротвердости материала в условно-исходном состоянии.

Приведенная частотность выборки подсчитывается по гистограмме как сумма отдельных частотностей с учетом весовых коэффициентов:

$$K_p = \sum_{i=1}^{m} a_i f_i \, ,$$

где $f_i = \frac{n_i}{N}$– частотность отдельного интервала значений микротвердости;
$N = \sum_{i=1}^{m} n_i$– общее количество замеров; i – номера интервалов микротвердости; n_i – количество результатов в данном интервале значений микротвердости; m – количество интервалов разбиения.

Весовые коэффициенты a_i вычисляются для каждого интервала в пределах количества интервалов m соответствующей гистограммы по следующим формулам:

$$a_i = 1 - (i-1)\frac{1{,}8}{m-1} \text{ для } i \le \frac{m+1}{2};\ a_i = 1 - (m-i)\frac{1{,}8}{m-1} \text{ для } i\,\frac{m+1}{2} \text{ (при нечетном } m\text{)};$$

$$a_i = 1 - (i-1)\frac{1{,}8}{m-2} \text{ для } i \le \frac{m}{2};\ a_i = 1 - (m-i)\frac{1{,}8}{m-2} \text{ для } i > \frac{m}{2} \text{ (при четном } m\text{)}.$$

Микромеханические свойства и количественный анализ структурной поврежденности металла лейнера. Гистограммы, построенные по результатам замеров микротвердости в зонах 1, 2, 3 с различным уровнем поврежденности алюминиевого сплава АД33, возникшей под действием переменных эксплуатационных нагрузок, представлены на рисунке. Видно, что характер и степень развития поврежденности во всех зонах существенно различаются и, по сути, наглядно показывают деградацию сплава в процессе малоцикловой усталости.

Распределение микротвердости в зоне 1 условно-исходного состояния (рисунок *а*) является узким, отражая структурную однородность материала. Значения микротвердости сконцентрированы в высоком диапазоне от 900 до 1100 МПа с доминированием интервала 900–1000 МПа. В зоне 2 накопления поврежденности распределение меняется, становясь более широким и размытым за счет появления низких значений микротвердости в интервале 700-800 МПа и снижения пика в интервале 900–1000 Па (рисунок *б*). Смещение пика гистограммы влево указывает на потерю структурной однородности материала и развитии усталостной поврежденности. При этом, по результатам проверки статистической гипотезы нормального распределения по критерию «трех сигм», для зоны 2, несмотря на некоторую асимметрию гистограммы, не отвергается закон нормального распределения. Напротив, для микротвердости металла в состоянии предразрушения гипотеза нормального распределения отвергается, что следует и из вида соответствующей гистограммы (рисунок *в*). Для этой зоны предразрушения 3 справедливо утверждение о полной потере структурной однородности и тотальной деградации материала, так как распределение микротвердости становится существенно уширенным и полимодальным, охватывая диапазон значений от 200 до 1100 МПа. Критическим индикатором деградации является формирование «хвоста» в левой части гистограммы. Появление такого хвоста, свидетельствующее о наличии значительной доли материала с аномально низкой микротвёрдостью, является статистическим признаком формирования областей с критической концентрацией дефектов. Интенсивное разупрочнение материала подтверждается присутствием доминирующего пика микротвердости в области 600–700 МПа и снижением ее среднего значения H_{10} на 26 % (таблица). Из приведенных в таблице данных также видно, что неоднородность микроструктуры и разброс свойств возрастают почти втрое (по увеличению значений коэффициента неоднородности *K*, рассчитываемых как отношение средней микротвердости к минимальной).

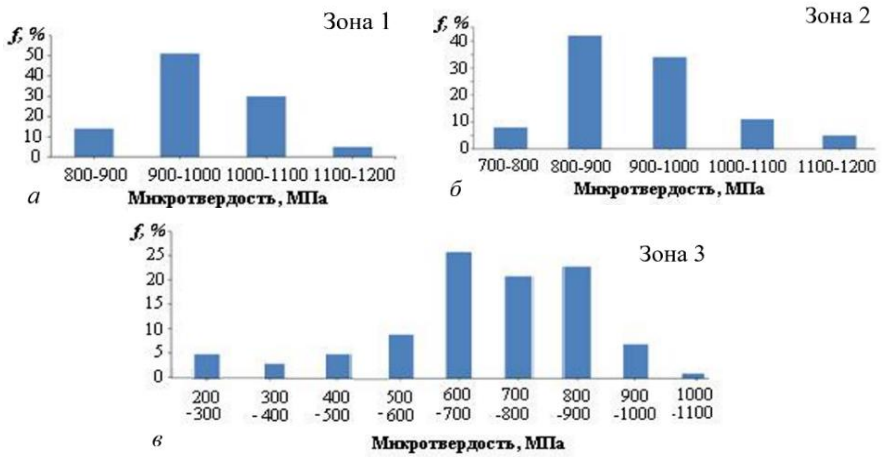


Рис. Гистограммы распределения микротвердости металла лейнера:
а) – в условно-исходном состоянии (зона 1); *б)* – на стадии накопления повреждённости (зона 2); *в)* – на стадии предразрушения (зона 3)

Таблица. Коэффициент неоднородности структуры *К*, средняя микротвердость H_{10}, приведенная частотность выборки K_p и коэффициент накопления повреждённости k_p для сплава АД 33 на разных стадиях развития усталости

Состояние материала	Условно-исходное	Промежуточное (стадия накопления повреждённости)	Стадия предразрушения
К	1,2	1,3	3,2
H_{10}, МПа	988	952	732
K_p, %	18%	27,8%	78,85%
k_p	1	1,5	4,38

Изменения приведенной частотности выборки K_p и коэффициента накопления повреждённости k_p полностью соответствуют описанным выше тенденциям структурно-механической деградации сплава АД33. В относительно однородной исходной структуре (K_p = *18 %*), находящейся в упрочненном состоянии с высокой микротвердостью (988 МПа), эксплуатационные переменные нагрузки вызывают микродеформации, образующие зоны с разной плотностью дислокаций. Прогрессирующий процесс локализации повреждений составляет суть накопления усталостной повреждённости, проявляющейся в возрастании показателей K_p и k_p до 27,8 % и 1,5 соответственно. В зоне 3 предразрушения микроповреждённость выходит на уровень системного разрыхлении металла до уровня появления микропор, так как средняя микротвердость этой зоны существенно ниже средней микротвердости зон 2 и 1, а приведенная частотность и повреждённость достигают критического уровня (78,85 % и 4,38 соответственно). Возникновение микропор согласуется с данными работы [3], в которой было показано, что усталостное разрушение алюминиевого сплава 6061 (зарубежный аналог сплава АД33) вызвано образованием ряда «усталостных микропустот», их ростом и последующим слиянием. «Усталостные микропустоты» образуются в результате отделения некогерентных и хрупких вторичных частиц от алюминиевой матрицы на ранних стадиях усталости. Фрактографический анализ поверхности усталостного разрушения лейнера выявил на ней характерные полости, появление которых связано с присутствием в материале микропор. Кроме того, особенностью излома являются множественные светлые частицы богатой железом хрупкой интерметаллидной фазы, на которых, очевидно, зарождались усталостные микропустоты. Изучение инициации повреждений на микроуровне, их развития и формирования начальных и магистральных усталостных трещин представляет собой отдельную задачу.

Заключение. Методом статистического анализа микротвердости исследованы количественные показатели прогрессирующего роста структурной неоднородности и накопления повреждённости в термоупрочняемом алюминиевом сплаве АД33 при малоцикловом усталостном разрушении, наступившем при эксплуатации в условиях Севера. Критическое состояние сплава перед разрушением характеризуется отклонением распределения микротвердости от закона Гаусса и резкой локализацией микроповреждений: коэффициент неоднородности структуры, приведенная частотность выборки, коэффициент накопления повреждённости увеличиваются примерно в 3–4 раза. Одновременно наблюдалось

катастрофическое падение среднего значения микротвердости (на 26%). Полученные результаты могут быть использованы при развитии методов диагностики и прогнозирования усталостной долговечности изделий, изготовленных из сплава АД33 и работающих в условиях низкочастотного высокоамплитудного нагружения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (научная тема FWRS-2024-0036). При выполнении работы использованы приборы и оборудование ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Зорин Е.Е. Разработка метода оперативной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса, основанного на регистрации накопленной поврежденности металлом конструкции в процессе длительного нагружения // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 4. №1(15). С.142-148.
2. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Фрактодиагностика технических объектов, разрушившихся при эксплуатации на Севере // Зав. лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 6. С. 40-47.
3. Sunder R., Porter W. J., Ashbaugh N. E. Fatigue voids and their significance // Fatigue and Fracture of Engineering Mat. and Structures. 2002. No. 25 (11). P. 1015-1024.

СЕКЦИЯ 4. ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА

УДК 534-8
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-270-274

ТРЁХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖИДКИХ СРЕД С ГАЗАМИ С ЦЕЛЬЮ УТИЛИЗАЦИИ ВРЕДНЫХ ГАЗОВ, УСКОРЕНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ И ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВОВ

Голых Р.Н.[1], Барсуков А.Р.[1] , Маняхин И.А.[1], Хмелёв В.Н.[1]
[1]Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова
E-mail: romangl90@gmail.com

Аннотация. *Теоретически обоснована эффективность способа повышения скорости массопереноса газа (определяющего фактора в процессах утилизации вредных газов, гидратообразовании и дегазации расплавов) в жидкости, основанного на формировании волн на поверхности стабильных газовых пузырьков в жидкости при схлопывании кавитационных пузырьков, создаваемых ультразвуком. Предложена трёхмерная численная модель формирования волн на поверхности стабильных газовых пузырьков, позволяющая оценить увеличение площади межфазной поверхности в зависимости от режимов ультразвукового воздействия. Выполнена оценка режимов и условий, позволяющих достичь предельно возможное увеличение межфазной поверхности с помощью ультразвукового способа.*
Ключевые слова: *ультразвук, массобмен, газ, модель, кавитация*

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING AND TECHNOLOGIES ULTRASONIC CAVITATION INTENSIFICATION OF INTERACTION BETWEEN LIQUID AND GASE TO UTILIZING HARMFUL GASES, ACCELERATE HYDRATE FORMATION AND PERFORM MELTS DEGASSING

Golykh R.N., Barsukov A.R., Manyakhin I.A., Khmelev V.N.
Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Abstract. *The effectiveness of a method for increasing the rate of mass transfer(determining factor in formation of hydrate, utilizing of harmful gases, melts degassing) of gas in a liquid based on the formation of waves on the surface of stable gas bubbles in a liquid during the collapse of cavitation bubbles created by ultrasound has been theoretically substantiated. The three-dimensional numerical model of wave formation on the surface of stable gas bubbles is proposed, which makes it possible to estimate the increase in the interfacial surface area depending on the ultrasonic exposure modes. An assessment of the modes and conditions allowing to achieve the maximum possible increase in the interfacial surface using the ultrasonic method has been performed.*
Keywords: *ultrasonic, mass-transfer, gas, model, cavitation.*

Фундаментальная проблема реализации массообменных процессов «газ-жидкость» (вне зависимости от назначения массообменного процесса – утилизация вредных газов, гидратообразования или дегазации расплавов) заключается в крайне малом коэффициенте диффузии газа в жидкости, который в ~10000 раз меньше по сравнению с коэффициентом диффузии газа в газе [1–2]. Один из перспективных физических принципов решения данной проблемы – ультразвуковое (УЗ) воздействие, которое одновременно позволяет ускорить диффузию и увеличить межфазную поверхность [3].

Известный способ кардинального увеличения межфазной поверхности – распыление (в том числе ультразвуковое распыление). Проблема распыления заключается в крайне малом объёме жидкой фазы по сравнению с объёмом газа, вследствие чего ограничен предельный объём поглощаемого или выделяемого газа.

Наиболее целесообразной реализацией является воздействие через жидкость, объём которой превышает объём газа, так как в этом случае обеспечивается эффективная передача акустической энергии и формирование устойчивых колебаний на границе раздела фаз, что значительно ускоряет массообмен и подтверждается исследованиями [4]. При этом в жидкость, на которую осуществляется ультразвуковое воздействие, принудительно вводятся барботажные газовые пузырьки. Однако для промышленного внедрения остаётся ряд нерешённых проблем:

– амплитуда давления ударных волн возмущающего кавитационного воздействия стремится к нулю вблизи границы раздела «газ-жидкость»;

– ограниченность межфазной массообменной поверхности не только при осуществлении плёночной абсорбции, но и при барботажной абсорбции (при реализации которой межфазная поверхность барботажных пузырьков суммарно выше плёночной поверхности);

– ограниченность применения ультразвуковой абсорбции газов для высоковязких жидкостей.

При этом межфазная поверхность является лимитирующим фактором, обуславливающим скорость массообмена.

Поэтому цель представленного исследования – выявление режимов и условий ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование межфазной поверхности максимальной площади. Исследование проводится теоретическими методами и далее описано взаимное влияние факторов формирования межфазной поверхности при введении в жидкость барботажного пузырька.

Для построения численной модели формирования межфазной поверхности первоначально проанализировано взаимное влияние факторов формирования межфазной поверхности стабильно существующего газового пузырька. Основной влияющий фактор на формирование межфазной поверхности – кавитационная область.

Схематичное изображение формирования возмущений под действием кавитации представлено на рисунке 1.

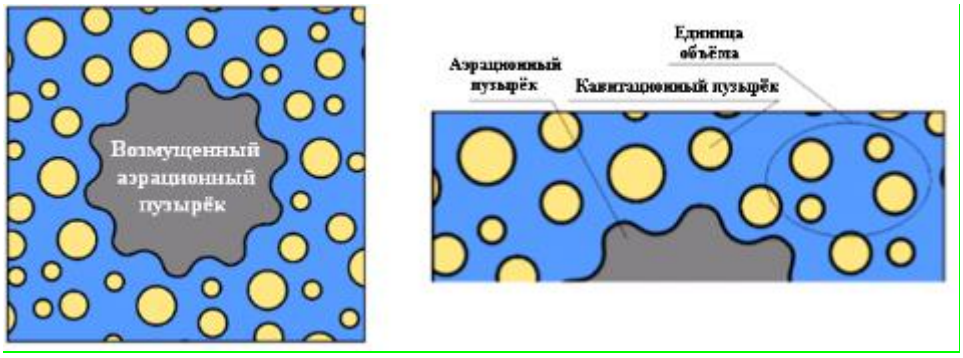


Рис. 1. Схематичное изображение возмущений барботажного (аэрационного) пузырька под действием схлопывающихся кавитационных пузырьков

В предлагаемой постановке задачи размер барботажного пузырька составляет 1…5 мм. Размеры кавитационных пузырьков не превышают 200 мкм. При этом для выявления формирования межфазной поверхности кавитационная область рассматривает в качестве сплошной среды с эквивалентными характеристиками:

1. Усреднённая плотность по объёму (здесь и далее размер объёма усреднения значительно превышает размер кавитационного пузырька, но при этом он значительно меньше длины ультразвуковой волны и размера барботажного пузырька) и времени (здесь и далее время усреднения – период ультразвуковых колебаний).

2. Усреднённый акустический импеданс среды (отношение комплексной амплитуды первой гармоники звукового давления к комплексной амплитуде колебательной скорости).

3. Усреднённая энергия схлопывания кавитационных пузырьков.

Параметры кавитационной области зависит от распределения амплитуд звукового давления в технологическом объёме, которое в свою очередь определяется колебаниями ультразвукового излучателя и геометрией технологического объёма, которая определяет явления отражения колебаний.

Наряду с параметрами ультразвукового излучателя, распределение амплитуд звукового давления зависит от акустических свойств кавитирующей жидкости, которые определяются параметрами кавитационной области. Т. е. имеет место быть обратная связь. При этом капиллярные волны, формируемые под действием схлопывающихся пузырьков, также оказывают обратное влияние на распределение амплитуд звукового давления, тем самым влияя на геометрию технологического объёма.

Однако поскольку длина капиллярной волны много меньше размера пузырька (и, следовательно, много меньше длины первичной ультразвуковой волны) и сопоставима с амплитудой капиллярной волны, то обратная связь со стороны капиллярных волн оказывается достаточно слабой.

Для выявления распределения параметров кавитационной области предложена численная модель, позволяющая рассчитать распределение звукового давления, с учётом обратного влияния распределения на акустические свойства кавитирующей жидкости. Модель основана на уравнении, описывающем распространение акустического поля в жидкости, содержащей кавитационные пузырьки, заполненные паром или газом:

$$\Delta p - \frac{1}{{c_0}^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2}; \quad (1)$$

где t – время, с; ρ_0 – плотность сплошной жидкой фазы, кг/м^3; p – мгновенное значение давления жидкости, Па; c_0 – скорость звука в сплошной жидкой фазе, м/с; δ – объёмное содержание пузырьков в текущий момент времени t.

Для решения уравнения (1) использовалось разложение Фурье звукового давления и объёмного содержания кавитационных пузырьков

$$\overline{p}(\mathbf{r},t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{p_n}(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}; \quad (2) \qquad \overline{\delta}(\mathbf{r},t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{\delta_n}(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}; \quad (3)$$

где ω – круговая частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, с$^{-1}$; $\mathbf{r}$ – радиус вектор точки жидкости, м;

В результате разложения Фурье уравнение (1) сведено к уравнению Гельмгольца для первой гармоники (4):

$$\Delta \overline{p_1} + \left(K_{**}\left(\left|\overline{p_1}\right|\right) + iK_*\left(\left|\overline{p_1}\right|\right)\right)^2 \overline{p_1} = 0; \quad (4)$$

где K_{**} – эффективное волновое число кавитирующей среды, м$^{-1}$; K_* – эффективный коэффициент поглощения в кавитирующей среде, м$^{-1}$.

Данное уравнение дополняется граничным условием на поверхности ультразвукового излучателя:

$$\frac{\partial \overline{p_1}}{\partial \mathbf{n}} = \rho\omega^2 A_n; \quad (5)$$

на твёрдой границе технологического объёма

$$\overline{p_1} = 0; \quad (6)$$

на границе барботажного пузырька

$$\frac{\partial \overline{p_1}}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad (7)$$

где A_n – амплитуда нормальных колебаний ультразвукового излучателя, м.

Для решения задачи предложен метод простой итерации, основанный на решении последовательности линейных конечно-элементных задач:

$$\Delta \overline{p_1^{(n+1)}} + \left(K_{**}\left(\left|\overline{p_1^{(n)}}\right|\right) + iK_*\left(\left|\overline{p_1^{(n)}}\right|\right)\right)^2 \overline{p_1^{(n+1)}} = 0; \quad (8)$$

Был проведён расчёт для цилиндрического технологического объёма, на оси симметрии которого расположен газовый пузырёк. Сверху технологического объёма расположен поршневой ультразвуковой излучатель, поверхность которого имеет форму плоского диска. Протяжённость технологического объёма составляет 200 мм, радиус технологического объёма – 100 мм. Частота ультразвуковых колебаний 22 кГц. Амплитуда колебаний излучателя – 20 мкм. Обрабатываемая жидкость – вода (поверхностное натяжение 72 мН/м, плотность 1000 кг/м^3, вязкость 1 мПа·с. Далее представлена зависимость относительной разности между распределениями амплитуд звукового давления на соседних итерациях при расчётах акустического поля (рисунок 2).

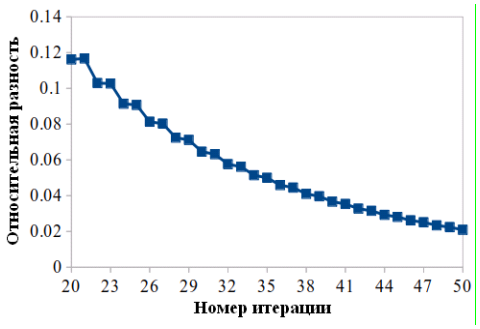


Рис. 2. Зависимость относительной разности между распределениями амплитуд звукового давления на соседних итерациях ($\frac{\max\limits_{\mathbf{r}\in\Omega}\left|p_1^{(n)} - p_1^{(n-1)}\right|}{\max\limits_{\mathbf{r}\in\Omega}\left|p_1^{(n)}\right|}$)

Также были проведены исследования влияния волн на поверхности пузырька на распределение амплитуд звукового давления. Далее представлены результаты сравнения акустических полей при наличии и отсутствии возмущений газового пузырька (рисунок 3).

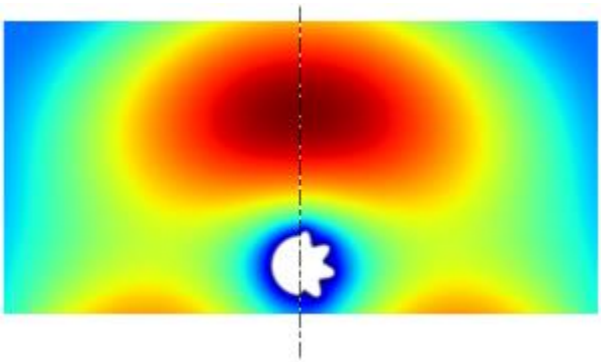


Рис. 3. Акустические поля в окрестности барботажного пузырька (слева – невозмущённый пузырёк, справа – возмущённый пузырёк, максимальная амплитуда звукового давления (обозначена красным цветом) – 4,035 атм)

Представленные результаты подтверждают справедливость допущения об отсутствии обратного влияния капиллярных волн на распределение звукового давления в жидкости. Поэтому далее на рисунке 4 представлены зависимости относительного увеличения межфазной поверхности от положения барботажного пузырька (от расстояния между пузырьком и излучающей поверхностью по отношению к диаметру излучателя).

Как следует из представленных зависимостей, максимальное увеличение межфазной поверхности достигается, когда аэрационный пузырёк находится в зоне вырожденной кавитации. Нахождение аэрационного пузырька в зоне вырожденной кавитации означает, что в точке текущего положения аэрационного пузырька наблюдается вырожденная кавитация, если бы аэрационный пузырёк отсутствовал.

Указанный факт объясняется тем, что за счёт градиента амплитуды звукового давления достигается минимальная толщина пристеночного слоя, в котором отсутствует кавитация, следовательно, уменьшается расстояние от ближайшего схлопывающегося кавитационного пузырька до стенки барботажного пузырька и увеличивается амплитуда ударной волны, достигающей стенки.

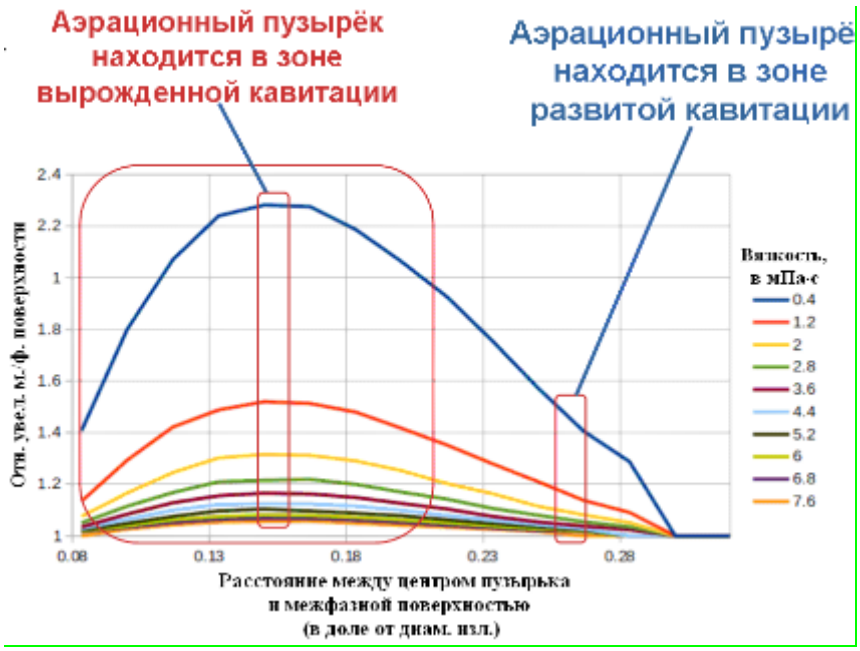


Рис. 4. Зависимости относительного увеличения межфазной поверхности от положения барботажного пузырька (от расстояния между пузырьком и излучающей поверхностью по отношению к диаметру излучателя)

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, https://rscf.ru/project/23-12-00278/

Список литературы

1. Подрыга В.О., Вихров Е.В., Поляков С.В. Молекулярно-динамический расчет коэффициента диффузии газов на примере аргона, азота, водорода, кислорода, метана и углекислого газа // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 96.
2. Новосёлов А.Г., Дужий А.Б., Голикова Е.Ю. Молекулярная диффузия газов в жидкости. Коэффициенты молекулярной диффузии диоксида углерода в воде // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2.
3. Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Цыганок С.Н., Абраменко Д.С., Барсуков А.Р., Минаков В.Д. Эффект воздействия кавитационной области с границей раздела фаз и его влияние на процессы газорастворения: исследование и анализ // Ползуновский вестник. 2024. № 2. С. 217–222.
4. Голых Р.Н., Карра Ж.-Б., Хмелёв В.Н., Маняхин И.А., Минаков В.Д., Генне Д.В., Барсуков А.Р. Влияние ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность «газ-жидкость» при принудительной аэрации // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65, № 6. С. 83–98.

УДК 519.3:519.8
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-275-278

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СРОКА СЛУЖБЫ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Гусев Е.Л.[1,2], Петрова П.Н.[1], Гоголева О.В.[1]
[1]Институт проблем нефти и газа ФИЦ «ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия
[2] Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск, Россия
E-mail: elgusev@mail.ru

Аннотация. *Задачи прогнозирования определяющих характеристик композитов при воздействии экстремальных факторов сформулированы в рамках вариационных постановок. На основе современных вариационных постановок построены обобщенные модели долговечности и разработаны эффективные методы прогнозирования определяющих характеристик композитов в экстремальных условиях. Разработанные вариационные методы применены для решения задач оценки срока службы новых перспективных композиционных материалов (КМ) для экстремальных условий. Проведены вычислительные эксперименты.*

Ключевые слова*: математические модели прогнозирования , вариационные методы, полимерные композиты, климатические испытания, физико-механические свойства композитов.*

APPLICATION OF GENERALIZED LONGEVITY MODELS FOR ESTIMATION OF THE SERVICE LIFE OF NEW COMPOSITE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF EXTREME ENVIRONMENTAL FACTORS

Gusev E.L.[1,2], Petrova P.N. [1], Gogoleva O.V. [1]
[1]Institute of Oil and Gas Problems of the Federal Research Center «Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russia
[2]Institute of Mathematics and Computer Science of the North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Abstract. *The tasks of predicting the defining characteristics of composites under the influence of extreme factors are formulated within the framework of variational formulations. Based on modern variational formulations, generalized durability models have been constructed and effective methods for predicting the defining characteristics of composites in extreme conditions have been developed. The developed variational methods have been applied to solve the problems of assessing the service life of new promising composite materials (CM) for extreme conditions. Computational experiments have been conducted.*

Keywords: *mathematical forecasting models, variational methods, polymer composites, climatic tests, and physical and mechanical properties of composites.*

В условиях Арктического и Субарктического климата важной задачей является разработка новых композиционных материалов с повышенной долговечностью и стабильностью свойств при экстремально низких температурах. Улучшение прочности, износостойкости и электропроводности также играет ключевую роль в эксплуатации техники в этих условиях. При создании новых композиционных материалов для условий Арктики и Субарктики важно повысить их долговечность.

Были проведены исследования по разработке эффективной методологии прогнозирования характеристик композитов и их срока службы в экстремальных условиях холодного климата, при воздействии экстремальных факторов. В условиях Арктического и Субарктического климата были проведены исследования воздействия климата на замедление процессов старения сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и ПКМ на его основе применения стабилизаторов марки СО-4 .

С целью определения степени воздействия различных климатических и погодных условий на физико-механические свойства СВМПЭ и КМ на его основе были проведены натурные испытания образцов. В качестве полимерной матрицы был выбран СВМПЭ марки GUR-4150 производства компании Celanese (Китай) . В качестве армирующего наполнителя использовались углеродные волокна (УВ)

марки «Белум» . В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4 . Этот стабилизатор имеет уникальный набор преимуществ: он улучшает прочностные характеристики, гибкость, долговечность и устойчивость к механическим нагрузкам изделий из ПМ . Химическая формула стабилизатора марки СО-4 приведена на рис. 1:

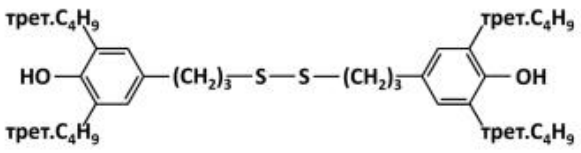


Рис. 1. Ди-[3-(3,5-ди-(1,1-диметилэтил)-4-гидроксифенил)пропил]дисульфид

Проведенные климатические испытания позволили сделать прогноз физико-механических свойств перспективных полимерных композиционных материалов [1-9]. Исследования показали, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен превосходит другие полимерные композиты по таким свойствам , как прочность, морозостойкость, износостойкость, трение [10-16]. Проведено исследование влияния климатических факторов на свойства композитов в экстремальных условиях. В процессе старения материалов было выявлено ухудшение их механических характеристик. Для увеличения долговечности СВМПЭ был использован противостаритель- стабилизатор марки СО-4.

На основе сравнительного анализа результатов климатических испытаний в экстремальных условиях г. Якутска показано что применение стабилизатора марки СО-4 существенно улучшает физико-механические характеристики материала. На рис. 2 приведен график зависимости относительного удлинения СВМПЭ, СВМПЭ+ 5масс% УВ и СВМПЭ+0,5масс% СО-4+5масс%УВ от времени экспонирования.

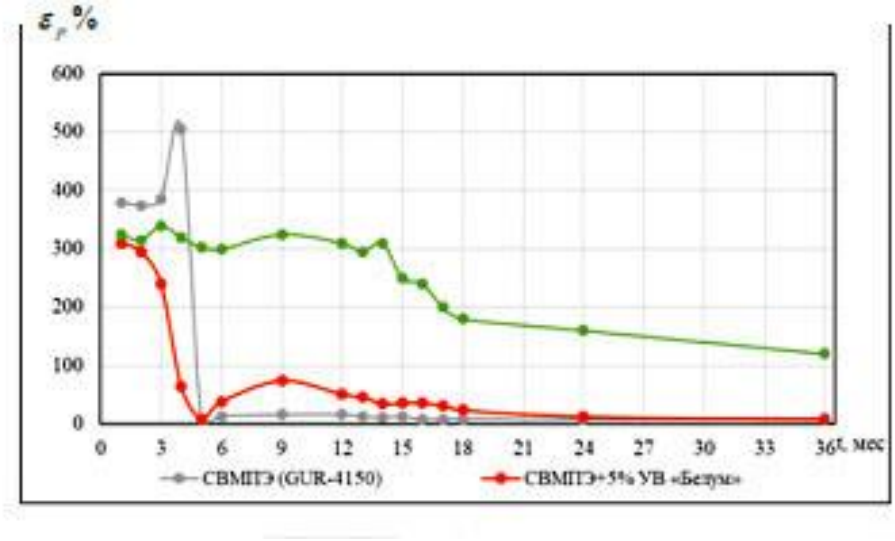


Рис. 2. График зависимости относительного удлинения композитов, содержащих СВМПЭ с добавлением УВ и СО-4 от времени экспонирования

Для решения проблемы создания новых перспективных композиционных материалов с повышенной долговечностью, функционирующих в экстремальных условиях, необходимо разработать высокоточные методы прогнозирования их долговечности. В работах [3–9] разработана методология оптимального прогнозирования характеристик и конструкций новых перспективных материалов при воздействии различных факторов. Обобщенная модель долговечности представима в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^{p} F_j \left(u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j} \; ; \; t \right).$$

Здесь R, параметр, описывающий определяющую характеристику композита, $F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}; t\right), (j = 1,2,..., p)$ – математическое описание j-го фактора, $u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}$ – система параметров, описывающих влияние j-го фактора, t- время.

Одной из ключевых проблем в области материаловедения заключается в том, что сложно предсказать срок службы новых материалов. В качестве определяющего параметра была выбрана такая характеристика СВМПЭ как относительное удлинение $\varepsilon_p\%$. При выборе материала важно учитывать его срок службы. А для определения срока службы важно учитывать предельное значение параметра. Максимальная работоспособность определялась относительным удлинением. $\varepsilon_p\% \approx 30-50\%$. Методика прогноза , представленная в работах [3-9], была применена для исследования влияния противостарителя СО-4 на долговечность СВМПЭ.

Для исследования процессов старения СВМПЭ и композиционных материалов на его основе были проведены натурные эксперименты в экстремальных климатических условиях г. Якутска. Время экспозиции было выбрано продолжительностью 3 года. Предельным значением относительного удлинения, при котором материал еще сохраняет работоспособность было выбрано значение $\varepsilon_{\min}\% = 30\%$ .. Первоначальное относительное удлинение перед началом экспозиции составляло $\varepsilon_p\%$ =335, 594. Через 3 года экспозиции в результате происходящих процессов старения относительное удли-нение составило $\varepsilon_p\%$= 120,071, т. е. уменьшилось в 2,79 раза. На основе разработанной методологии прогнозирования [3-9] были проведены расчеты срока службы композиционных материалов на основе СВМПЭ. Для расчетов были использованы результаты проведенных климатических испытаний на протяжении трех лет. Т. е. интервал ретроспекции принимался равным длиной 3 года. В качестве армирующего наполнителя использовались углеродные волокна (УВ) марки «Белум». Для увеличения долговечности СВМПЭ был использован противостаритель- стабилизатор марки СО-4. Проведенные расчеты на основе разработанной методологии позволили сделать прогноз срока службы материалов. Расчеты дали прогноз срока службы материала когда его относительное удлинение достигает предельного значения $\varepsilon_{\min}\% = 30\%$.Прогнозируемый срок службы составил 49 месяцев (4,1 года).

При разработке новых перспективных композиционных материалов с повышенной долговечностью одной из центральных проблем является проблема сокращения объема и продолжительности климатических испытаний , необходимых для объективной оценки срока службы разрабатываемых перспективных композиционных материалов. Проведено исследование возможности эффективного применения для этих целей разрабатываемой методологии оптимального прогнозирования долговечности композиционных материалов, на основе результатов кратковременных климатических испытаний. Была исследована возможность сокращения объемов и продолжительности климатических испытаний без потери существенной точности прогноза срока службы. Для исследования этой возможности был выбран уменьшенный в 2 раза размер интервал ретроспекции продолжительностью в 18 месяцев (1,5 года). Расчеты на основе разрабатываемой методологии для интервала ретроспекции продолжительностью в 18 месяцев позволили получить прогноз срока службы композиционного материала в 45, 5 месяцев (3,79 года).

При интервале же ретроспекции в 3 года предельное значение достигается через промежуток времени T=49 месяцев (4,1 года). В результате абсолютная ошибка прогноза при интервале ретроспекции Tmin=18 мес по сравнению с интервалом ретроспекции 33 месяцев составляет 3,5 мес. А относительная ошибка составляет 7,1%.

Выводы. На современном уровне развития научно-технического прогресса , тенденций развития современной науки о материалах возникает необходимость использования и развития новейших методов и технологий для точного прогнозирования свойств материалов;

На основе новых вариационных методов были проведены исследования по расширению возможностей точного прогнозирования срока службы новых перспективных полимерных материалов в экстремальных условиях Арктической и Субарктической зоны;

Была создана оптимальная модель долговечности, учитывающая влияние нескольких экстремальных факторов на материал;

На основе натурных испытаний разработаны методы прогнозирования воздействия экстремальных климатических факторов на свойства композитов;

Вычислительные эксперименты показали, что добавление стабилизатора марки СО-4 значительно увеличивает срок службы полимерных композитов;

Показано, что применение разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок для оценки срока службы перспективных композиционных материалов позволяет существенно уменьшить объем и продолжительность климатических испытаний без потери существенной точности прогноза срока службы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (рег. № 122011100162-9) с использованием научного обору-дования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2(51). С. 47–58.
2. Petukhova E.S., Fedorov A.L. Investigation of the climate resistance of stabilized polyeth ylene composite materials // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 20. P. 75–80.
3. Gusev E.L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials// Material Physics and Mechanics, 2016, V.26, N 1, P. 70–72.
4. Gusev E.L., Bakulin V.N. Variation formulations of inverse problems in forecastting the residual life of composites //Doklady Physics, 2018, v.63, N 9, P. 388–392.
5. Gusev E.L., Bakulin V.N. Optimal control under a decrease in the thermal-field intensity based on selection of the heterogeneous –construction structure in the variational formulation// Doklady physics, 2018, V. 63, N 5, P. 213–217.
6. Gusev E. L., Bakulin V. N., Chernykh V. D. Development of combined search methods for efficiency indicator extreme in variation statement of forecasting tasks for determine characteristics of composite materials // Journal of Physics: Conference Series. , Supercomputer Technologies in Mathematical Modelling, 19–21 June 2019, Moscow, Russian Federation 2019. Vol. 1392. 012008.
7. Gusev E.L., Bakulin V.N. Variational Methods of Solving Problems on Control of the In tensity of a Temperature Field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2021, v. 94, № 5, P. 1117–1123.
8. Gusev E.L., Bakulin V.N. Generalized Durability Models and their Application to Solving Problems on Predicting the Defining Characteristics of Composites// Mechanics of Composites Ma terials, V. 58, N 3, 2022, P. 355–364 .
9. Gusev E.L., Bakulin V.N. Mathematical Methods for Predicting the Determining Characteristics of Composite under the Influence of Extreme Factors //AIP Conference Proceedings, 2023, 2948(1), 020030.
10. Валуева М.И, Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 3 (97). – С. 49–57.
11. Сильников Н.М., Новак О.С., Шифрина В.Ю. Повышение защитных характеристик специальных изделий за счет применения полимерной брони // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – № 7-8. – С. 122-128.
12. Шкуренко С.И., Галицын В.П., Соколов А.В. Проблемы и перспективы создания отечественного производства высоко- и сверхвысокопрочных армирующих материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Промышленные процессы и технологии. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 20–31.
13. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. Разработка ПКМ на основе СВМПЭ с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 122-131.
14. Petukhova E.S., Fedorov A.L. Investigation of the climate resistance of stabilized polyethylene composite materials // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 20. P. 75–80.
15. Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты. СПб: СПбГТУРП, 2015. 31 с.
16. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 446 с.

УДК 51-72: 51-74: 531-01
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-279-283

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Гусев Е.Л.[1,2], Федоров Ю.Ю.[1]
[1]Институт проблем нефти и газа ФИЦ «ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия
[2] Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального университета, г. Якутск, Россия
E-mail: elgusev@mail.ru

Аннотация. *Проведено исследование возможностей применения , разработанной в рамках вариационных постановок на основе современных положений кинетической теории прочности (КТП) методологии для эффективного решения задач высокоточного прогнозирования определяющих характеристик стеклопластиков. В рамках вариационных постановок на основе современных положений КТП была разработана оптимальная обобщенная модель долговечности (ОМД), учитывающая одновременное воздействие нескольких дестабилизирующих факторов на композит . Разработанная обобщенная модель долговечности применена для эффективной оценки долговечности стеклопластиков при воздействии экстремальных факторов внешней среды. На основе разработанной методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок проведены вычислительные эксперименты и разработаны оптимальные модели долговечности для композиционных материалов типа стеклопластиков, позволяющие осуществлять прогноз остаточного ресурса стеклопластиков в условиях резко-континентального климата Арктической и Субарктической зоны на длительный период.*

Ключевые слова*: вариационные постановки задач прогнозирования , полимерные композиты, климатические испытания, стеклопластики, обобщенные модели долговечности, физико-механические свойства композитов.*

MATHEMATICAL METHODS FOR PREDICTING THE DURABILITY OF GLASS-PLASTICS UNDER THE INFLUENCE OF EXTREME CLIMATIC FACTORS OF THE EXTERNAL ENVIRONMENT

Gusev E.L.[1,2], Fedorov Y.Y.[1]
[1]Institute of Oil and Gas Problems of the Federal Research Center «Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russia
[2]Institute of Mathematics and Computer Science of the North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Abstract. *A study was conducted on the possibilities of using the methodology developed within the framework of variational formulations based on modern principles of the kinetic theory of strength (KTS) for effectively solving the problems of high-precision prediction of the defining characteristics of glass-reinforced plastics. Within the framework of variational formulations based on modern principles of the KTS, an optimal generalized durability model (GDM) was developed that takes into account the simultaneous influence of several destabilizing factors on the composite. The developed generalized durability model was used to effectively assess the durability of glass-reinforced plastics under the influence of extreme environmental factors. Based on the developed forecasting methodology, computational experiments were conducted within the framework of variational formulations, and optimal durability models were developed for composite materials such as fiberglass, which allow for the long-term prediction of the residual resource of fiberglass in the harsh continental climate of the Arctic and Subarctic zones.*

Keywords: *variational formulations of forecasting problems, polymer composites, climatic tests, fiberglass composites, generalized durability models, and physical and mechanical properties of composites.*

В настоящее время при разработке различных конструкций, приборов, технических устройств одной из важных задач является создание надежных методов количественной оценки работоспособности изделий из полимерных композиционных материалов [1–4]. В последние десятилетия полимерные материалы (ПМ), полимерные композиционные материалы (ПКМ), покрытия и конструкции из них

являются неотъемлемой частью современной техники во многих областях, определяющих научно-технический прогресс [5–12]. КМ и конструкции из них в последние десятилетия применяются в таких современных областях, как авиа- и космическая техника, судостроение, нефтяная и газовая промышленность и др. [7–14].

Широкое применение композитов в современных областях, определяющих научно-технический прогресс, обуславливает важность разработки эффективных высокоточных методов долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик КМ и конструкций из них (остаточного ресурса, прочности, надежности, долговечности). Воздействие различных факторов на композиты, приводит к изменению их свойств с течением времени, что как правило, отражается на их работоспособности. Скорость и характер происходящих изменений в композите будут зависеть не только от числа факторов, воздействующих на материал, но и интенсивности этих воздействий. При решении вопроса об использовании материала в современной технике необходимо из большого количества возможных вариантов образцов выбрать образец с таким составом, который сможет обеспечить оптимальное сочетание необходимых показателей.

Важнейшим преимуществом материала становится его способность как можно дольше сохранять свою работоспособность. Способность материала как можно дольше сохранять свою работоспособность, связана со его способностью противостоять старению , под которой понимается совокупность физико-химических обратимых и необратимых превращений под воздействием экстремальных факторов внешней среды (температуры, влажности, солнечной радиации, механических напряжений и др.). Поэтому основой для принятия решения об использовании материала в современной технике является наряду с совокупностью его требуемых показателей также является его способность противостоять старению . В современной технике доминирующее положение занимают материалы, способные без замены функционировать 20–30, а в необходимых случаях и более 50 лет. При применении материалов в авиа-, и космической технике эффективным активатором старения является проникающая радиация, которая в отличие от световой способна инициировать превращения во всем объеме полимера. Поэтому применение ПКМ в авиа- и космической технике делает еще более актуальными исследования стойкости полимеров к излучению [7–14].

Одними из самых доступных и недорогих композитов являются стеклопластики. Сте-клопластики представляют собой разновидность КМ, которые являются пластическими материалами, состоящими из стекловолокнистого наполнителя (стеклянное волокно, волокно из кварца и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры, эпоксидные модифицированные смолы). Стеклопластики обладают малым удельным весом и заданными свойствами, что обуславливает широкий спектр их применения. Стеклопластики обладают также очень низкой теплопроводностью, и в то же время обладают прочностью как у стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью. В то же время стеклопластики не обладают недостатками, присущими термопластам. До недавнего времени стеклопластики использовались преимущественно в самолётостроении, кораблестроении и космической технике. Широкое применение стеклопластиков сдерживалось, в основном, из-за отсутствия промышленной технологии, которая позволила бы наладить массовый выпуск профилей сложной конфигурации с требуемой точностью. Эта задача успешно решена с созданием пултрузионной технологии. В настоящее время стекло пластики являются одним из самых доступных и недорогих КМ. Стеклопластик – один из наиболее широко применяемых видов КМ . Тем не менее было установлено, что в условиях резко-континентального климата Арктической и Субарктической зоны полимерные материалы и композиции на их основе стареют гораздо интенсивнее, чем в зоне умеренного климата [15]. Свой вклад в процессы интенсивного старения вносят экстремально низкие температуры в зимнее время года. Суточные колебания температуры с широкой амплитудой, сопровождающиеся переходом через 0 °С в весенне-осенний период, приводят к хрупкому разрушению материала, сорбции и десорбции влаги с последующим ее замораживанием и оттаиванием.

Расширение областей применения стеклопластиков в Арктической и Субарктической зонах с резко-континентальным климатом приводит к необходимости разработки методологии как краткосрочного, так и средне-, и долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик данного вида КМ . В рамках вариационных постановок была разработана методология оптимального прогнозирования определяющих характеристик композитов при воздействии экстремальных факторов и построения оптимальных моделей долговечности [6–14]. В предположении, что различные физические факторы оказывают на полимерный композит воздействие, независимое от воздействия других факторов, и изменения, вызванные воз действием различных физических факторов на композит, суммируются, было принято что обобщенная модель долговечности, описывающая одновременное воздействие нескольких факторов может быть представлена в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^{p} F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}\ ;\ t\right).$$

Здесь R, параметр, описывающий определяющую характеристику композита, $F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}\ ; t\right), (j = 1,2,..., p)$ – математическое описание j-го фактора, $u_{j,1}, u_{j,2}, ..., u_{j,l_j}$ – система параметров, описывающих влияние j-го фактора, t- время. На основе разработанной методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок проведены вычислительные эксперименты и разработаны оптимальные модели долговечности для КМ типа стеклопластиков, позволяющие осуществлять прогноз остаточного ресурса стеклопластиков в условиях резко-континентального климата Арктической и Субарктической зоны на длительный период.

При разработке КМ с повышенным сроком службы одной из центральных проблем является проблема оценки и долгосрочного прогнозирования срока службы новых стеклопластиков на основе проведенных натурных климатических испытаний в первые несколько лет. В качестве определяющих характеристик для прогнозирования срока службы стеклопластика была выбрана прочность σ_p . Климатические испытания по исследованию влияния на стеклопластик климатических условий г. Якутска проводились на испытательном полигоне г. Якутска в течение 2,5 лет. Климатические испытания проводились с целью исследования влияния холодного климата и ультрафиолетового излучения на интенсивность старения стеклопластика. Для качественного сравнительного анализа влияния на интенсивность старения одновременно холодного климата и УФ-излучения и только холодного климата при отсутствии УФ-излучения, климатические испытания проводились одновременно на открытом воздухе в условиях полигона и в замкнутом помещении (ангаре).

По результатам проведенных в течение 2,5 лет климатических испытаний на основе разрабатываемой методологии в рамках вариационных постановок и введенных понятий моделей прогнозирования оптимальной структуры и сложности , а также сформулированного принципа множественности моделей прогнозирования было проведено долгосрочное прогнозирование характера изменения временной зависимости остаточного ресурса стеклопластика в условиях полигона и ангара на период до 40 лет. На рис. 1 приведены графики временной зависимости прочности для случая стеклопластика, построенные на основе разработанной обобщенной модели оптимальной структуры и сложности по данным климатических испытаний, проведенных в условиях климатической зоны г. Якутска в условиях полигона и ангара.

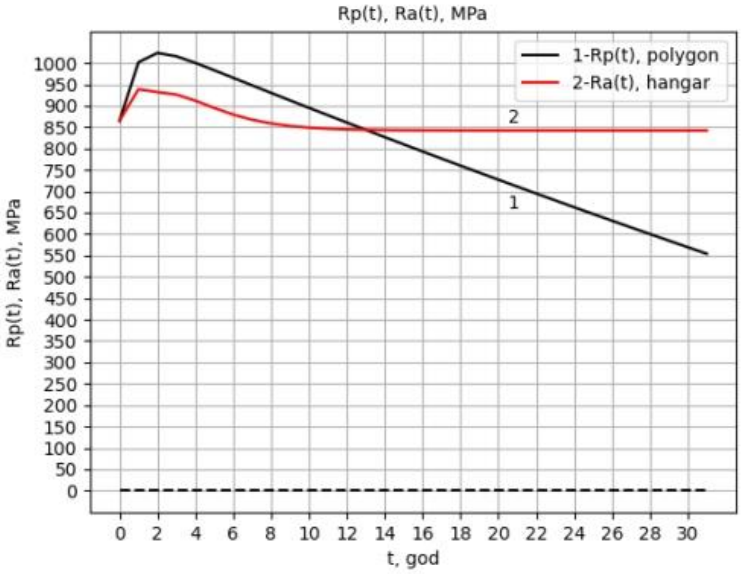


Рис. 4. Графики зависимости прочности σ_p для случая стеклопластика, построенные на основе оптимальной модели долговечности по данным климатических испытаний, проведенных в условиях климатической зоны г. Якутска для интервала ретроспекции продолжительностью 2,5 года: 1– зависимость остаточного ресурса для случая полигона; 2 – зависимость остаточного ресурса для случая ангара

Прогноз на основе разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок позволяет по полученным экспериментальным данным климатических испытаний продолжительностью 2,5 года (интервал ретроспекции), построить модель оптимальной структуры и сложности, позволяющую осуществлять не только краткосрочные, но и долгосрочные прогнозы на периоды времени многократно превышающие размеры исходного интервала ретроспекции в 2,5 года. Проведенные результаты исследований на основе разработанной методологии прогнозирования остаточного ресурса стеклопластика в рамках вариационных постановок и, на основе разработанных обобщенных моделей долговечности позволили заключить, что существенное влияние УФ-излучения на интенсивность изменения остаточного ресурса необходимо учитывать, как правило, при эксплуатации материала в течение нескольких десятилетий. В первые десятилетия УФ-излучение одновременно инициирует высокую интенсивность и длительность процессов упрочнения, которые компенсируют одновременное увеличение интенсивности процессов старения под воздействием УФ-излучения. И только после уменьшения интенсивности процессов упрочнения определяющее влияние на ускорение процессов старения начинает оказывать УФ-излучение. При этом также установлено, что экстремально низкие температуры в зимние периоды, характерные для климата Арктической и Субарктической зоны, оказывают на увеличение интенсивности старения стеклопластика меньшее влияние по сравнению с УФ-излучением.

В результате проведено исследование возможности применения разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок , разработанных обобщенных моделей долговечности оптимальной структуры и сложности , для решения задач прогнозирования остаточного ресурса стеклопластика на период до 40 лет. Для построения оптимальных обобщенных моделей долговечности в рамках разрабатываемой методологии были проведены климатические испытания по измерению остаточного ресурса композита на интервале ретроспекции 2, 5 года в климатической зоне г. Якутска. В качестве остаточного ресурса рассматривалась прочность стеклопластика σ, Мпа.

Проведено исследование перспективных возможностей применения разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок для исследования перс-пективных возможностей оценки тенденций изменения остаточного ресурса стеклопластика на длительный период до 40 лет, а также выделения основных факторов, оказывающих существенное влияние на интенсивность изменения остаточного ресурса. В результате было установлено, что применение разработанной методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок и разработанных на ее основе обобщенных моделей прогнозирования открывают перспективные возможности для решения задач эффективного прогнозирования определяющих характеристик стеклопластиков в условиях Арктической и Субарктической зоны на длительный период порядка нескольких десятков лет, а также позволяют установить важные особенности и тенденции процессов старения, происходящих на длительном временном интервале , а также выделить определяющие факторы, влияющие на процессы старения , и провести их сравнительный анализ.

Вычислительные эксперименты были проведены на объектно-ориентированном языке программирования Python версии 3.12.3 в кроссплатформенной интегрированной среде разработки IDE PyCharm , среде разработки Jupyter Notebook версии 7.2.2.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (рег. № 122011100162-9) с использованием научного обору-дования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Gusev E.L., Bakulin V.N..Variation formulations of inverse problems in forecasting the residual life of composites // Doklady Physics, 2018, v. 63, N 9, p. 388-392.
2. Гусев Е.Л., Бабенко Ф.И. Методы поиска экстремума с оптимальным выбором параметров для решения задач восстановления параметров моделей прогнозирования определяющих характеристик полимерных композитов//Сб. трудов «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике», Москва., Всероссийский институт авиационных материалов, 2015, с.132-141.
3. Уржумцев Ю.С., Черский И.Н. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов// Механика композитных материалов, 1985, № 4, с. 708–714.
4. Болотин В.В. Ресурс машин н конструкций , Москва, Машиностроение, 1990, 448 с
5. Gusev E. L. Using parallel procedures for the searching of the extremum for the decision of the inverse problems prediction of the defining characteristics of the composite materials // Mater. Phys. Mech. , 2016, Vol. 26, No. 1, P. 70–72.
6. Gusev E. L., Bakulin V. N., Chernykh V. D. Development and application of combined methods to expand the potential for predicting the defining characteristics of composites // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. , 2020, Vol. 927, P. 010240.

7. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Оптимальное управление уменьшением интенсивности теплового поля на основе выбора структуры неоднородных конструкций в вариационной постановке //Доклады РАН, 2018, т.480, № 3, с.287-292.
8. Гусев Е.Л. , Бакулин В.Н. Вариационные методы решения задач управления интенсивностью температурного поля на основе выбора структуры слоисто-неоднородных композиционных конструкций//Инженерно-физический журнал, 2021, т. 94, № 6, с. 1141-1147.
9. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Обобщенные модели долговечности и их применение для решения задач прогнозирования определяющих характеристик композитов //Механика композитных материалов, т. 58, № 3, 2022, с. 505-520.
10. Гусев Е.Л. Постановка и решение задач прогнозирования остаточного ресурса , долговечности композиционных материалов и конструкций при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды//Сб. трудов VII Межд. конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов, Моск-ва, Институт металлургии и материаловедения РАН, 2017, с. 847-849.
11. Гусев Е.Л., Бакулин В.Н. Разработка обобщенных моделей долговечности композиционных материалов и конструкций в экстремальных условиях на основе современных положений кинетической теории прочности//Материалы 1-ой Международной конференции «Скоростной транспорт будущего, перспективы, проблемы, решения (HSTD-2022)», М., МАИ, 2022 с. 47-48.
12. E.L. Gusev, V.N. Bakulin and V.D. Chernykh Promising methods for predicting the residual life of polymer composites in refined variational statements under extreme environmental influences, v.1191, (IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021), p. 012022 .
13. E.L. Gusev , V.N. Bakulin. The use of generalized models in the variational formulation of the prediction tasks defining characteristics of composite materials, V. 1431 , (Journal of Physics: Conference Series. Collection of Materials of the VIII International Conference. 2020), P. 012017.
14. Gusev E.L., Bakulin V.N. Generalized multiparametric models for predicting the physical and mechanical properties of composites when exposed to extreme environmental factors, Vol, 1705,(Journal of Physics: Conference Series , 2020) , 012033.
15. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: Наука, 1983. 213 с.

УДК 539.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-284-286

ПРИМЕНЕНИЕ ИТ-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Гусев Е.Л.[1,2], *Черных В.Д.*[1]
[1]Институт проблем нефти и газа ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия
[2]Институт математики и информатики СВФУ, г. Якутск, Россия
E-mail: chernykh.vera@mail.ru

Аннотация. *Отсутствие надёжных методов прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов (ПКМ) в Арктике ведёт к повышенным рискам и издержкам. Цель исследования – разработка комбинированного полуэмпирического метода оценки остаточного ресурса ПКМ в экстремальных условиях. Метод основан на принципе суперпозиции климатических факторов и минимизации среднеквадратического отклонения расчётных и экспериментальных данных. Расчёты автоматизированы в среде Delphi. Апробация на полимерных волокнистых композитах показала сходимость модели при интервале ретроспекции ≥ 7 лет. Метод позволяет получить прогноз остаточного ресурса на 15-летний период.*

Ключевые слова: *прогнозирование, старение, полимерные материалы, прочность, арктическая зона.*

APPLICATION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR PREDICTING THE DURABILITY OF ADVANCED COMPOSITE MATERIALS IN ARCTIC ENVIRONMENTS

Gusev E.L.[1,2], *Chernykh V.D.*[1]
[1]Institute of Oil and Gas Problems SB RAS – Division of Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre SB RAS», Yakutsk, Russia
[2]Institute of mathematics and informatics NEFU, Yakutsk, Russia

Abstract. *The absence of reliable methods for predicting the durability of polymer composite materials (PCMs) in Arctic environments increases operational risks and costs. This study aims to develop a combined semi-empirical method for estimating the remaining service life of PCMs under extreme conditions. The proposed approach integrates the superposition of climatic factors with the minimization of the standard deviation between calculated and experimental data. Calculations are automated using the Delphi programming environment. Validation on polymer fiber composites demonstrated model convergence for retrospective intervals of at least seven years. The method supports the prediction of residual service life over a 15-year period.*

Keywords: *prediction, aging, polymer composite materials, durability, Arctic environments.*

Освоение Арктической зоны – стратегическая задача, требующая надёжных конструкционных материалов, способных выдерживать экстремальные климатические воздействия: температуры до –50 °C и ниже; резкие суточные и сезонные перепады; высокую влажность и цикличное замерзание-оттаивание; интенсивное УФ-излучение; ветровые нагрузки и абразивное воздействие снежно-ледяных масс.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают рядом преимуществ для арктического применения (высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, технологичность), однако их долгосрочная работоспособность в таких условиях остаётся слабо предсказуемой. Это создаёт ключевые проблемы: экономические риски (избыточный запас прочности или преждевременный выход из строя); экологические угрозы (аварии ведут к загрязнению хрупкой арктической экосистемы); дефицит надёжных методов прогнозирования (существующие подходы либо требуют многолетних испытаний, либо дают неточные результаты).

Современные методы прогнозирования долговечности ПКМ делятся на:

1. Эмпирические – основаны на обработке данных натурных испытаний, но неприменимы для ускоренной оценки.
2. Неэмпирические – опираются на физико-химические модели, но сложны для практического использования.
3. Полуэмпирические – комбинируют оба подхода, однако часто не учитывают суперпозицию климатических факторов.

Программные комплексы (ANSYS, COMSOL) ориентированы на моделирование механических нагрузок, но не включают специализированные модули для арктических условий.

Научная новизна предлагаемого исследования заключается в разработке комбинированного полуэмпирического метода, учитывающего суперпозицию климатических воздействий, и валидации модели на полимерных волокнистых композитах

Метод позволит оптимизировать состав ПКМ для конкретных арктических регионов, снизить затраты на испытания и проектирование и повысить надёжность конструкций в экстремальных условиях.

Результаты найдут применение в судостроении, нефтегазовой отрасли и инфраструктурном строительстве Арктической зоны.

Исследование построено на комбинированном полуэмпирическом подходе, объединяющем физико-химические закономерности старения ПКМ и статистическую обработку экспериментальных данных.

Обобщённая модель для описания воздействия нескольких факторов может быть представлена в виде суммы изменений, вызванных каждым фактором независимо друг от друга:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^{p} F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t\right).$$

Каждая из функций $F_j\left(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t\right), (j = 1, 2, \dots, p)$, описывающая воздействие j-го фактора на полимерный композит, может быть представлена в виде разложения в ряд по некоторой системе базисных функций $\Psi_{kj}(\beta_{kj}; t)$, $(k = 1, 2, 3, \dots)$. Введенные функции в наиболее полной мере характеризуют особенности процесса увеличения поврежденности материала при воздействии экстремальных факторов внешней среды.

$F_j = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_{kj}\left(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}\right) \Psi_{kj}\left[\beta_{kj}\left(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}\right); t\right], (j = 1, 2, \dots, p)$.

В этих обозначениях: $\alpha_{kj}\left(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}\right)$, $\beta_{kj}\left(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}\right)$, $(j = 1,2, \dots p; k = 0, 1, 2, \dots)$ неопределенные параметры модели, описывающие воздействие j-го фактора.

Принцип суперпозиции позволяет агрегировать эффекты: суммарное изменение прочности рассматривается как сумма вкладов каждого фактора, взвешенных по их значимости.

Для минимизации погрешности прогноза применён численный метод, нацеленный на снижение среднеквадратического отклонения расчётных и экспериментальных значений прочности.

В рамках построенной обобщенной модели можно решать задачи прогнозирования остаточного ресурса, долговечности как при воздействии неопределенного числа экстремальных факторов, так и задачи прогнозирования при воздействии строго определенных заранее известных факторов. Имеется возможность решать задачи прогнозирования при воздействии фактора, связанного с климатическим воздействием и фактора, связанного с процессами упрочнения.

В качестве критерия эффективности выбираем среднеквадратическое отклонение аппроксимации экспериментальных данных $\Delta\overline{R}_t^{э}$ от теоретических значений $\Delta R(u; t)$:

$$J(u) = S^2 = \frac{1}{m}\sum_{t=1}^{m}\left(\Delta R(u; t) - \Delta\overline{R}_t^{э}\right)^2.$$

Задача восстановления параметров моделей изменения прочности композиционной конструкции от воздействия экстремальных факторов внешней среды и эксплуатационных нагрузок может быть сведена к решению следующей экстремальной задачи:

$$J(u^*) = \min_u J(u)$$

Разработанная программная реализация алгоритма в среде Delphi представляет собой компактный, но функциональный инструмент для оперативного расчёта остаточного ресурса полимерных композиционных материалов (ПКМ) в арктических условиях. Несмотря на лаконичность интерфейса, программа обеспечивает полный цикл вычислений – от ввода исходных данных до формирования расчётных значений для последующей визуализации. Программа генерирует структурированные выходные файлы с расчётными данными. Эти файлы легко импортируются в специализированные графические пакеты для построения графиков изменения прочности во времени. Такой подход сочетает точность расчётов и наглядность представления.

Полученные результаты позволяют оценить эффективность предложенного комбинированного полуэмпирического метода прогнозирования долговечности ПКМ в арктических условиях.

В работе изучено, как размер интервала ретроспекции $[0, T_{min}]$, влияет на стабильность и точность прогнозных оценок в диапазоне $[T_{min}, T_{max}]$ при использовании оптимизированных обобщённых моделей прогнозирования заданной сложности. В качестве показателя остаточного ресурса R для

полимерного волокнистого композита принята прочность в МПа. Максимальный рассматриваемый период анализа изменения ресурса составляет $T_{max} = 15$ лет.

Выявлены закономерности, связывающие параметры оптимальных моделей долговечности $R_\tau^*(t) = R(u_\tau^*; t)$, $(0 \le \tau \le T_{max}, 0 \le t \le T_{max})$ с размером интервала ретроспекции τ $(0 \le \tau \le T_{max})$. Модели построены на основе подхода, использующего множество прогнозных моделей в рамках уточнённой вариационной постановки обратных задач. Здесь u_τ^* – оптимальный вектор параметров, задающий структуру и сложность модели для конкретного τ.

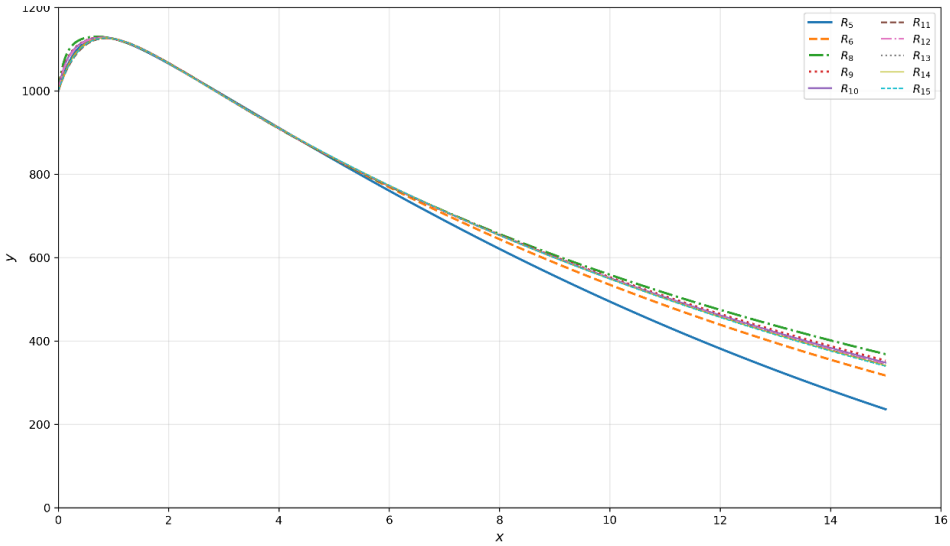


Рис. 1. Зависимость параметрического семейства оптимальных моделей прогнозирования от величины интервала ретроспекции

Результаты показали: эффективность прогноза остаточного ресурса композитов напрямую определяется тем, насколько полно в моделях учтены базовые закономерности микро- и макропроцессов, влияющих на деградацию материала. Отсюда вытекает необходимость объективно определить минимальный размер интервала ретроспекции τ_r, при котором эти закономерности проявляются в достаточной мере для достоверного прогноза.

Параметрическое семейство моделей $R^*(\tau_r; t)$ демонстрирует колебательную зависимость от τ_r (размера интервала ретроспекции). Характер колебаний коррелирует с полнотой проявления микро- и макропроцессов, определяющих изменение ресурса композита на рассматриваемом временном отрезке.

На рис. 1 представлен график, иллюстрирующий устойчивый колебательный процесс: при интервале в 7 лет ключевые закономерности микро- и макроуровня проявляются достаточно явно, что позволяет учесть их в модели. Предложенный подход даёт возможность строить адекватные модели оптимальной структуры и сложности, которые при увеличении τ_r сходятся к реальной динамике изменения ресурса.

Типы колебательных процессов (устойчивых и неустойчивых), наблюдаемые при варьировании τ_r в моделях $R^*(\tau_r; t)$, аналогичны переходным процессам в устойчивых и неустойчивых системах автоматического управления (САУ).

Выполнен анализ многопараметрической прогнозной модели с применением условий экстремума для сокращения размерности задачи. Исследована связь между структурой, сложностью моделей и точностью прогноза долговечности. Предложенный метод опирается на множественность прогнозных моделей в рамках вариационной постановки обратных задач. Такой подход эффективен и позволяет сбалансировать длительность экспонирования и точность прогноза, сохраняя практическую значимость результатов.

Список литературы

1. Уржумцев Ю.С., Черский И.Н. Научные основы инженерной климатологии полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов. 1985. №4. С. 708–704.
2. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика молекулярного разрушения и стабилизации полимеров. М.: Наука, 1988. 368 с.
3. Варбанская Р.А., Генкина Л.К., Ясина Л.Л., Штукарева В.Б., Пудов В.С. Метод прогнозирования срока службы полимерных изделий. // Высокомолекулярные соединения. Сер. Б. 1979. Т. 21. № 10. С. 748–751.
4. Гусев Е.Л. Математические методы прогнозирования определяющих характеристик композитов в вариационной постановке, основанные на принципе множественности моделей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2018. № 3(62). С. 23–29.

УДК 53.09; 691.714
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-287-289

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННЫХ И КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Иванов С.А.[1], Лепов В.В.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: sadxxsaas@mail.ru

Аннотация. *В работе рассматриваются вопросы коррозионной и радиационной стойкости сталей при низкотемпературных условиях эксплуатации, характерные для Крайнего Севера. Проведён обзор существующих исследований, где анализировалось изолированные аспекты, показано, что такие подходы ограниченно применимы для северных регионов. Подчёркивается необходимость в разработке многоуровневой мультифизической модели, или комплекса моделей, способных объединить термические, радиационные и коррозионные процессы для прогнозирования работоспособности и деградации сталей в экстремальных климатических условиях.*

Ключевые слова: *коррозия, радиация, низкая температура, многоуровневая мультифизическая модель, сварные швы*

PROSPECTS FOR RESEARCH ON RADIATION AND CORROSION DAMAGE OF STEELS IN THE ARCTIC REGION

S.A. Ivanov[1], V.V. Lepov[2]
[1]FRC «The Yakut Scientific Centre» SB RAS
[1]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the SB RAS

Abstract. *This article focuses on the corrosion and radiation resistance of steels under low-temperature conditions typical of the Yakut Region. A review of existing research demonstrates their limited applicability to Artic Region. The study emphasizes the need for multilevel multiphysics model or model system for integration of the thermal, radiation and corrosion processes to ensure reliable forecasting of steel performance and degradation in extreme northern environments.*

Keywords: *corrosion, radiation, low temperature, multilevel multiphysical model, welds*

Известно, что в условиях Крайнего Севера энергетические установки испытывают более жёсткий тепловой цикл, и материалы конструкций подвержены более высокому износу и авариям вследствие сочетания ряда неблагоприятных факторов [1]. Например, в котельных в результате перегрева развиваются коррозионные повреждения, провоцирующие аварийные разрушения теплообменников [2]. В Якутии запланировано строительство ряда малых атомных станций [3], в энергетических установках (АЭУ) которых, как известно, материалы одновременно подвергаются воздействию радиации, агрессивной коррозионной среды, значительным перепадам температур и высоким механическим напряжениям. Ожидаемые условия эксплуатации АЭУ в Усть-Алданском районе РС(Я) характеризуются низкими температурами окружающей среды, до –50 °С и ниже, вследствие чего материалы внешнего контура реактора могут подвергаться низкотемпературную вязко-хрупкому переходу. В этих условиях важным является выбор соответствующих хладостойких сталей, хорошо проявивших себя при эксплуатации в энергетической отрасли РС(Я), например низколегированные стали 09Г2С, 10ХНДП, либо стали аустенитного класса AISI 304, 316, сохраняющие пластичность при –50 °С и ниже, и соответствующие модельные расчёты.

Современные технико-экономические оценки эффективности использования АЭУ в арктических регионах подтверждают их возможности и востребованность [4], демонстрируя в то же время, что проекты развития арктических регионов всё ещё остаются институционально и экономически изолированными от иных регионов страны. В частности, отмечается, что подобные проекты не всегда учитывают специфику регионов, а также слабо интегрированы в инфраструктурные и логистические цепочки с другими территориями России.

Учёт совместного действия радиации и низких температур на процессы коррозии сталей критически важен. Радиоактивное облучение изменяет микроструктуру металла и оксидных слоёв, а низкие

температуры снижают трещиностойкость и меняют кинетику коррозионных реакций. В ряде исследований рассматривались лишь отдельные составляющие этой задачи. Так, в работах Choi и Kim [5] изучался процесс коррозия низкоуглеродистой стали при низких температурах с применением иммерсионных и солевых аэрозольных испытаний, и обнаружено, что при низких температурах основной металл сильнее подвержен коррозии, чем материал сварного шва, причём термическое расширение материала влияет на характер коррозии. Отдельно рассматривалось и влияние климата: например, отмечено, что при экстремальном охлаждении стали резко снижается ударная вязкость, из-за чего для конструкций на Севере рекомендуется применять малоуглеродистые низколегированные (Ni, Mn) и стали аустенитного класса [6]. Также отдельно рассматриваются эффекты радиационного воздействия на свойства сталей [7,8].

В то же время известно, что в реальных условиях комплексного воздействия могут наблюдаться синергетические эффекты [7]. Например, в работе Hui Liu [7] отмечается, что выявление и учёт синергетического эффекта облучения и коррозии является важной задачей современного материаловедения. В работе Schmidt F. [8] подчёркивается важность фундаментального обоснования влияния радиационных дефектов на свойства слоя пассивации и скорости коррозии, хотя известны отдельные проявления этого явления (радиолиз, коррозия под напряжением при облучении). Таким образом, модели, учитывающие какой-либо из отдельных факторов, оказываются недостаточными, особенно для условий Крайнего Севера, когда необходимо учитывать комплексное влияние радиации, низкотемпературной хрупкости и коррозионных агентов. При этом важен учёт структуры материалов, которая может сложной, гибридной, а также испытывать фазовые переходы в процессе эксплуатации [9], не говоря уже о наличии сварных швов [10].

Возникает необходимость создания многоуровневой мультифизической модели (или системы моделей), которая одновременно учитывает радиационное облучение, коррозионную среду и эффект низкой температуры. В частности, важно учесть тепловыделение и изменение теплового расширения в металле, изменение структуры пассивных оксидов под облучением, и механическое поведение при охлаждении. В качестве одного из подходов предлагаются градиентные модели повреждений. Так, в работе Huang H. [11] разработана термомеханическая модель разрушения в рамках локального подхода и градиентной теории повреждений, учитывающей тепловое расширение материала и связь между объёмными деформациями и эволюцией микроповреждений. Результаты моделирования показали, что модельный учёт интенсивного теплового воздействия при накоплении повреждений позволяет точнее описать трещинообразование при резком охлаждении, тогда как в ограниченных учётом лишь одного фактора моделях недооценивается температурный градиент и неверно оценивается плотность трещин. Подобные подходы могут быть адаптированы для сталей: градиентное моделирование позволит учесть не только механические и температурные напряжения, но и оценить накопление дефектов под облучением.

Математическое моделирование должно подтверждаться экспериментальными результатами, полученными, в частности, и методами неразрушающего контроля. Например, акустическая эмиссия применяется для раннего детектирования зарождения трещин и изменений структуры в металле под нагрузкой. Она позволяет выявлять акустические сигналы, возникающие при образовании микротрещин в стали, что способствует управлению уровнем коррозионных и радиационных повреждений. При этом важно также учитывать технологические остаточные напряжения и возможные фазовые превращения при низких температурах. В работе Махутова [12] показано, что технологические макро- и микронапряжения, возникающие при изготовлении и эксплуатации конструкций, существенно влияют на характеристики цикла деформации и стабилизируют поведение конструкции. Поэтому модель должна включать начальные остаточные напряжения и описывать их эволюцию. Кроме того, фазовые превращения (например, мартенситное превращение при закалке) могут изменять коррозионную стойкость поверхности, что должно учитываться в физической модели материала.

Для численного описания подобных комплексных эффектов используются многоуровневые и мультифизические численные модели на основе метода конечных элементов и разностей, а также стохастические методы [9]. При этом существует устойчивая тенденция к созданию вместо феноменологических физически обоснованных моделей. Универсальные модели необходимо строить на физических представлениях о микромеханизмах деформации и разрушения, однако создание таких моделей пока затруднено. Решение задачи состоит в сочетании упрощённых физически мотивированных моделей для различных режимов деформации, и в дальнейшем уточнении расчётов на основе экспериментальных данных. В итоге необходим комплексный подход: численное моделирование, опирающееся на физические законы (учёт накопления радиационных дефектов, диффузионных процессов, фазовых переходов), и калибровку моделей с помощью экспериментов (например, по акустической эмиссии или мониторингу коррозии).

Комплексная система моделирования радиационной и коррозионной стойкости сталей при низких температурах необходима для надёжного прогнозирования ресурса материалов в экстремальных условиях Крайнего Севера. Такая система позволит учитывать одновременно множество факторов – от технологических остаточных напряжений до радиационных дефектов и влияния низких температур – и тем самым улучшить планирование работ по эксплуатации и ремонту стальных конструкций в северном климате.

Список литературы

1. Lepov V.V., Petrov N.A., Prokhorov D.V., Pavlov N.V., Zakharov V.E. Concept of integrity, reliability and safety of energy and transport systems for cold climate regions. E3S Web of Conferences. Сер. «ENERGY-21 – Sustainable Development and Smart Management» 2020. С. 05009. DOI: 10.1051/e3sconf/202020905009
2. Лепов В.В., Ачикасова В.С., Махарова С.Н., Захаров В.Е., Павлов Н.В. Анализ разрушения материала трубы поддува котельной, эксплуатируемой в экстремальных условиях Арктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(3):143-151. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-14
3. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года / Под ред. Н.А. Петрова, Б.Г. Санеева, Г.Ф. Алексеева и др. – Правительство Респ. Саха (Якутия). – Якутск; Иркутск: Медиа-холдинг «Якутия» и др.; 2010. – 328 с.
4. Степанова Е.Л., Донской И.Г. Технико-экономическое обоснование эффективности режимов работы теплофикационного ядерного энергоблока малой мощности в условиях низких температур арктических регионов России // Арктика: экология и экономика. 2025. Т. 15, №2. С. 246-254. DOI:10.25283/2223-4594-2025-2-246-254
5. Choi YY, Kim MH. Corrosion behaviour of welded low-carbon steel in the Arctic marine environment. vol. 8(53):30155-30162. DOI: 10.1039/c8ra05371e.
6. Yan J-B. Materials and structures at cold-region and Arctic low temperatures: a state-of-the-art review. Earthq Eng Resil. 2024; vol. 3: 519-547. DOI:10.1002/eer2.98
7. Liu, H., Lei, GH. & Huang, HF. Review on synergistic damage effect of irradiation and corrosion on reactor structural alloys. NUCL SCI TECH 35, 57 (2024). DOI: 10.1007/s41365-024-01415-3
8. Schmidt, F., Schmidt, F., Hosemann, P., Scarlat, R. O., Schreiber, D. K., Scully, J. R., & Uberuaga, B. P. (2021). Effects of Radiation-Induced Defects on Corrosion. Annual Review of Materials Research, vol. 51(1), 293–328. DOI: 10.1146/ANNUREV-MATSCI-080819-123403
9. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023;28(1):156-171. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171
10. Бисонг М.С., Лепов В.В., Сивцев П.В., Голиков Н.И., Махарова С.Н. Моделирование повреждений сварных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017;22(3).
11. Huang, Hanwei & Yu, Hao & Xu, Wenlong & Wang, Quan & Wu, Hengan. (2025). A Thermo-Mechanical Localizing Gradient Damage Model With Modified Mazars Strain. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 126. DOI: 10.1002/nme.7652.
12. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Чернявский О.Ф., Чернявский А.О., Европин С.В. Процессы малоциклового деформирования конструкций АЭС и методы их расчёта. Атомная энергия, 2009, Т. 107, № 3, С. 135–143.

УДК 69.07
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-290-293

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ В АРКТИКЕ

Карпов И.Д.[1], Ялыгин С.А.[2], Альхименко А.А.[1], Ермаков С.Б.[3]
[1]Научно-технологический комплекс «Новые технологии и материалы», СПбПУ
[2]ПАО «Газпром нефть»
[3]Центр технологических инициатив, ТИУ
E-mail: karpov_id@spbstu.ru

Аннотация. *В работе представлено численное моделирование поведения буроопускной стальной сваи с цементно-песчаным заполнением в условиях многолетнемерзлых грунтов Арктики. Использованы физически обоснованные модели грунтов (MO Granular и Cam-Clay) в программном комплексе ANSYS Workbench. Рассмотрены вертикальное и комбинированное нагружение, характерные для опор трубопроводов. Проведено сопоставление расчётных данных с результатами натурных испытаний в г. Якутске. Показано удовлетворительное качественное совпадение, подтверждающее адекватность предложенного подхода для проектирования и мониторинга свайных фундаментов в криолитозоне.*

Ключевые слова: *свайный фундамент, многолетнемерзлые грунты, численное моделирование, ANSYS, трубопровод, цементно-песчаная смесь.*

MATHEMATICAL MODELING OF OPERATING CONDITIONS OF PILE FOUNDATIONS IN THE ARCTIC

Karpov I.D.[1], Yalygin S.A.[2], Alkhimenko A.A.[1], Ermakov S.B.[3]
[1]Scientific and Technological Complex «Advanced Technologies and Materials», Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
[2]Gazprom Neft PJSC
[3]Center for Technological Initiatives, TIU

Abstract. *This paper presents a numerical simulation of the behavior of a cast-in-place steel pile filled with cement-sand grout under the conditions of permafrost soils in the Arctic. Physically based soil models (MO Granular and Cam-Clay) were employed within the ANSYS Workbench software suite. Both vertical and combined loading scenarios typical for pipeline supports were considered. Computational results were compared with field test data obtained in Yakutsk. A satisfactory qualitative agreement was demonstrated, confirming the adequacy of the proposed approach for the design and monitoring of pile foundations in permafrost regions.*

Keywords: *pile foundation, permafrost soils, numerical modeling, ANSYS, pipeline, cement-sand mixture.*

Введение. Строительство в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) требует особых подходов к проектированию фундаментов [1–5]. Учёт криогенных деформаций, морозного пучения и температурной нестабильности грунтового массива делает традиционные методы расчёта недостаточно точными [6–8]. Особенно это актуально для линейных объектов, таких как трубопроводы, где фундаменты подвергаются не только вертикальным, но и горизонтальным усилиям, а также изгибающим моментам [9].

В настоящей работе рассмотрена конструкция буроопускной стальной сваи с внутренним заполнением и внешней оболочкой из цементно-песчаной смеси (ЦПС), установленной в условиях вечной мерзлоты. Целью исследования стало численное моделирование её поведения под действием реальных нагрузок с использованием физически обоснованных моделей грунтов в программном комплексе *ANSYS Workbench*, а также сопоставление результатов с данными натурных испытаний.

Конструктивные и геотехнические характеристики. Свая имеет следующие параметры:

- длина – 10 м;
- наружный диаметр – 219 мм;
- толщина стенки – 8 мм;
- материал – сталь марки 09Г2С;
- внутреннее заполнение – ЦПС на всю длину;

▪ внешняя оболочка – ЦПС толщиной 50 мм на глубине 0–9 м.

Геологическое строение площадки (г. Якутск) включает два инженерно-геологических элемента:

▪ сезонно-талый пылеватый песок (0–2 м), водонасыщенный, средней плотности;

▪ многолетнемерзлый суглинок (2–15 м), твёрдомерзлый, слабольдистый, с сетчато-слоистой криотекстурой.

Методика численного моделирования. Моделирование выполнено в CAE-комплексе ANSYS Workbench (модуль Static Structural). Использованы следующие модели материалов:

▪ сталь 09Г2С и ЦПС – линейно-упругие изотропные тела;

▪ сезонно-талый песок – упругопластическая модель MO Granular, учитывающая нелинейное поведение гранулированных грунтов при сдвиге и уплотнении;

▪ мерзлый суглинок – модель Cam-Clay, адаптированная для описания связных криогенных грунтов.

Рассмотрены два сценария нагружения:

▪ сценарий 1 – вертикальная нагрузка: N = 98,1 кН (соответствует массе 10 т).

▪ сценарий 2 – комбинированная нагрузка: N = 118 кН, Q_x= 34 кН, M_x= 28,3 кН·м.

Эти усилия характерны для опор линейной части трубопровода.

Граничные условия: нижняя и боковые поверхности грунтового массива зафиксированы по всем степеням свободы. Учтён собственный вес конструкции (g=9,81 м/с²).

Конечно-элементная модель состоит из 776 753 элементов (включая тетраэдры и переходные клиновые элементы). Качество сетки: более 95 % элементов имеют показатель 0,8–1,0. Минимальный размер элемента – 10–15 мм.

Результаты расчётов. Осадка при вертикальной нагрузке. Максимальная осадка составила 4,67 мм. Распределение перемещений носит линейный характер, что свидетельствует о равномерной передаче усилия по длине сваи.

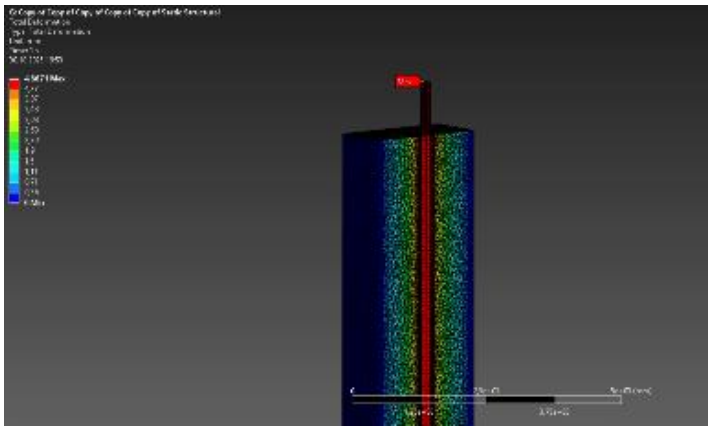


Рис. 1. Поле общих перемещений (Total Deformation) при вертикальной нагрузке

Напряжения при вертикальной нагрузке. Максимальные эквивалентные напряжения (по фон Мизесу) – 22,24 МПа, сосредоточены у головы сваи. В зоне контакта «сталь–ЦПС» наблюдается плавный переход напряжений, что указывает на эффективное взаимодействие материалов.

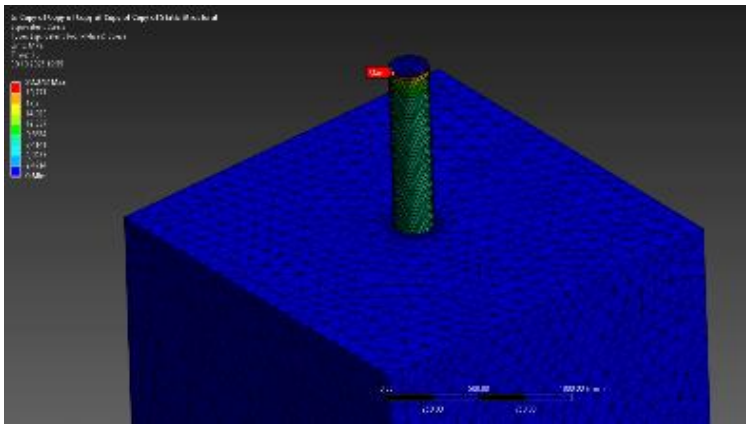


Рис. 2. Распределение напряжений von Mises при вертикальной нагрузке

Осадка при комбинированной нагрузке. Максимальная осадка возросла до 16,5 мм, с чётко выраженным наклоном сваи. Это свидетельствует о значительном влиянии горизонтальной силы и изгибающего момента на устойчивость конструкции.

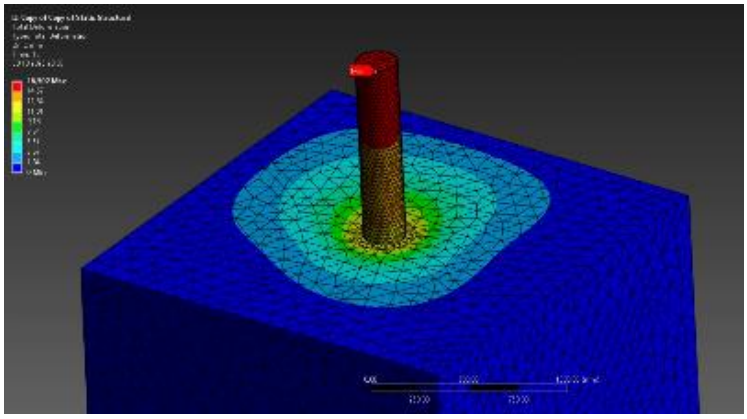


Рис. 3. Поле перемещений при комбинированном нагружении

Напряжения при комбинированной нагрузке. Максимальные напряжения достигли 23,5 МПа и локализованы в зоне контакта «свая–ЦПС–воздух» – критической области, где возможны локальные разрушения при длительной эксплуатации.

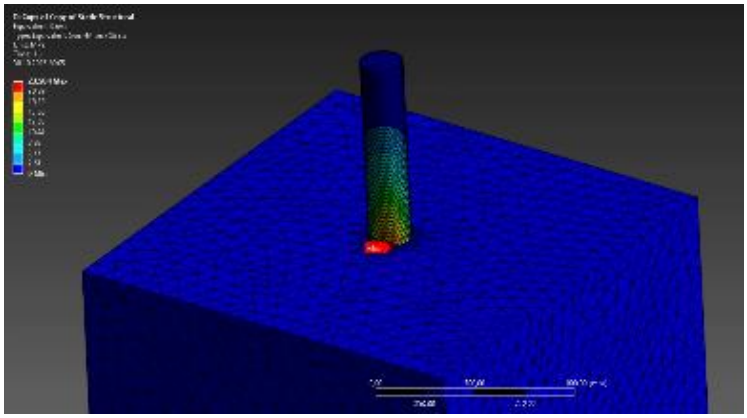


Рис. 4. Распределение напряжений при комбинированной нагрузке

Во всех случаях напряжения остаются в несколько раз ниже предела текучести стали 09Г2С (345 МПа), что подтверждает работоспособность конструкции.

Сопоставление с натурными данными. На опытном полигоне в Якутске проведены испытания аналогичных свай. Диапазон измеренных осадок – составил 1,4–69,0 мм.

Расчётное значение 4,67 мм лежит в нижней части этого диапазона. Это объясняется идеализацией модели: в расчёте не учтены локальные неоднородности грунта (льдинки, трещины), дефекты монтажа и микронеровности поверхности сваи, которые в натуре усиливают деформации.

Аналогично, измеренные напряжения варьировались от 25 до 101 МПа, тогда как расчёт дал 23,5 МПа. Расхождение связано с тем, что численная модель не включает концентраторы напряжений (например, дефекты основного металла и сварных соединений), присутствующие в реальных конструкциях.

Тем не менее, совпадение качественной картины – концентрация напряжений у головы, устойчивость при комбинированном нагружении – подтверждает адекватность подхода.

Таблица 1. Сравнение расчётных и натурных данных

Параметр	ANSYS (расчёт)	Натурные испытания
Осадка, мм	4,67	1,4–69,0
Макс. напряжение, МПа	23,5	2 –101

Заключение. Применение физически обоснованных моделей грунта (MO Granular, Cam-Clay) в ANSYS позволяет достоверно описать поведение свайного фундамента на ММГ, включая реакцию на горизонтальные усилия и моменты. Предложенный подход может быть интегрирован в цифровые двойники инфраструктурных объектов в Арктике, обеспечивая прогнозную оценку надёжности на этапе проектирования и эксплуатации.

Благодарность: *работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).*

Список литературы

1. Особенности применения ПКМ в оборудовании для северных территорий РФ / Б. С. Ермаков, О. В. Швецов, Н. И. Голиков, И. Д. Карпов // Целостность и ресурс в экстремальных условиях : сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. – С. 30-33. – DOI 10.24412/cl-37269-2024-1-30-33. – EDN NWFWKY.
2. Fu, Y., & Yao, X. (2022). A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites. *Composites Part C: Open Access, 8*. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100276
3. Гриневич Д. В., Яковлев Н. О., Славин А. В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) //Труды ВИАМ. – 2019. – №. 7 (79). – С. 92-111.
4. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур / Б. С. Ермаков, О. В. Швецов, С. А. Вологжанина [и др.] // Горная промышленность. – 2024. – № S5. – С. 198-203. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203. – EDN MGOZNZ.
5. Оценка возможности замены стальных элементов обустройства на элементы обустройства из ПКМ для производственных процессов на объектах нефтедобычи / А. С. Ровбо, С. Б. Ермаков, И. Д. Карпов [и др.] // PROнефть. Профессионально о нефти. – 2024. – Т. 9, № 2(32). – С. 130-135. – DOI 10.51890/2587-7399-2024-9-2-130-135. – EDN ANSCCA.
6. Использование полимерных композиционных материалов при строительстве и обустройстве месторождений на многолетнемерзлых грунтах / О. В. Швецов, М. П. Лебедев, Б. С. Ермаков [и др.] // Глобальная энергия. – 2024. – Т. 30, № 4. – С. 74-86. – DOI 10.18721/JEST.406. – EDN AIIMYY.
7. Бондарев Б.А. Экспериментальные исследования циклической долговечности полимерных композиционных материалов / Б. А. Бондарев, П. В. Борков, П. В. Комаров, А. Б. Бондарев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 136.
8. Бобрышев А.Н. Анализ долговечности полимерных композитов с позиций кинетической концепции разрушения / А. Н. Бобрышев, Э. Р. Галимов, А. В. Лахно [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 14. – С. 23-26.
9. Бояринцев А.В. Репрезентативный анализ опыта строительства фундаментов на многолетнемёрзлых грунтах // Вестник НИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. –Т.10, №1. –С. 57-68.

СЕКЦИЯ 5. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ ИЗ НИХ: ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ, ИСПЫТАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

УДК 678.01:537.311
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-294-296

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ КАНИСТР НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аргунова А.Г., Петухова Е.С., Федоров А.Л.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН Институт проблем нефти и газа СО РАН
E-mail: ag_argunova@mail.ru

Аннотация. *В данной работе представлены результаты исследования электропроводящих композитов на основе полиэтиленов низкого давления, созданных с использованием электропроводных марок технического углерода (ТУ), предназначенных для изготовления пластиковых топливных канистр методом экструзионно-выдувного формования. В ходе исследования были оценены деформационно-прочностные свойства, удельное объемное электрическое сопротивление, показатель текучести расплава и плотность полученных материалов. Показано, что для достижения электропроводности, обеспечивающей эффективное рассеивающее статическое электричество сопротивление (<10^6 Ом·см), необходимо вводить в полимерные матрицы 12,5–15,0 масс. % ТУ, в зависимости от марки композита.*

Ключевые слова: *удельное объемное электрическое сопротивление, относительное удлинение, показатель текучести расплава, технический углерод, канистра для топлива*

DEVELOPMENT OF ELECTRICALLY CONDUCTIVE MATERIALS BASED ON POLYETHYLENE FOR THE PRODUCTION OF FUEL CANISTERS BASED ON DOMESTIC RAW MATERIALS

Argunova A.G., Petukhova E.S., Fedorov A.L.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», a separate division Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

Abstract. *This paper presents the results of a study of conductive composites based on low-density polyethylene. To create fuel canisters, conductive grades of carbon black were injected into the polyethylene using extrusion blow molding. During the study, the deformation and strength properties, specific volume electrical resistance, melt flow index and density of the obtained materials were assessed. It has been shown that 12.5–15.0 wt.% carbon black must be added to polymer matrices to achieve electrical conductivity sufficient to provide effective static-dissipative resistance (<10^6 Ohm cm). The carbon black concentration depends on the grade of polyethylene composite.*

Keyword: *measured volume electrical resistance, relative elongation, melt flow index, carbon black, fuel canister*

Разработанная компанией АО «Саханефтегазсбыт» система доставки топлива в пластиковых канистрах показала высокую эффективность при эксплуатации в условиях практически полного бездорожья и низкой населенности Республики Саха (Якутия). Помимо этого, использование многоразовой тары является предпочтительным с точки зрения реализации концепции экологической ответственности. До настоящего времени производство такой тары осуществляется на линии розлива светлых нефтепродуктов предприятия с использованием импортного сырья. В текущих политико-экономических условиях перед компанией встала острая необходимость обеспечить его импортозамещение. Однако рынок отечественных полиэтиленовых электропроводящих концентратов, предназначенных для переработки методом экструзионно-выдувного формования, весьма ограничен. В связи с этим целью работы является разработка новых марок электропроводящих полиэтиленовых материалов для производства топливных канистр с использованием сырья отечественного производства.

При транспортировке топлива существует большая угроза воспламенения вследствие возникновения статического электричества, вызываемого его трением о стенки тары, поэтому тара должна обладать свойствами, рассеивающими накапливаемое статическое электричество [1]. Полиэтилен (ПЭ)

сам по себе является диэлектриком и использовать его в чистом виде для производства топливных канистр нельзя. Для придания ПЭ электропроводящих свойств в него вводят различные добавки. Наиболее распространенными являются специальные марки технического углерода (ТУ), от свойств и концентрации которых зависят эксплуатационные и технологические свойства композита и изделий. При этом согласно [2] удельное объемное электрическое сопротивление материалов из которых изготавливают канистры для транспортировки топлив, не должно превышать 10^6 Ом·см.

В качестве полимерной матрицы были выбраны наиболее распространённые в Российской Федерации марки экструзионно-выдувного назначения 273-83, ПЭ2НТ74-15, ПЭ2НТ76-17 (ПАО «Казаньоргсинтез»), производство которых также осуществляется на предприятиях ООО «ЗапСибНефтехим» и ООО «Ставролен», а также ПЭНД марки PE 6252J (ПАО «Нижнекамскнефтехим»).

В качестве электропроводящих добавок, использовались следующие электропроводящие марки ТУ: СН85, С140, СН210 и СН600 (ООО «Омсктехуглерод»).

Для придания материалу удовлетворительных технологических свойств и для обеспечения равномерного распределения ТУ в полимерной матрице в состав композитов вводили пластифицирующие добавки – дибутилсебацинат (ДБС) (ООО «ВитаХимСибирь») и диоктилсебацинат (ДОС) (ПАО СИБУРхолдинг).

Опытные образцы композитов изготавливали с использованием лабораторного пластикордера PL2200 Brabender (Германия). ПЭНД и наполнители смешивали в роторном смесителе пластикордера при температуре 180 °С и скорости вращения валков 30 об/мин в течение 10 мин. Полученную смесь после смешения измельчали с помощью дробилки. Затем измельченную смесь экструдировали в ленты шириной 2–2,5 см и толщиной 1,8–2,5 мм. Длина лент определялась количеством материала. Концентрацию ТУ в ПЭНД варьировали в диапазоне 12,5–20,0 мас.%.

Физико-механические характеристики полученных материалов при растяжении определяли по ГОСТ 11262-2017 на универсальной разрывной машине UTS-20K (Германия). Испытания проводили на образцах-лопатках Тип 5 при скорости движения траверс машины 50 мм/мин при комнатной температуре.

Удельное объемное электрическое сопротивление определяли по ГОСТ 20214-74. Измерение производилось по схеме, состоящей из источника постоянного напряжения, измерителя напряжения, измерителя тока, электродов и образца. Источником постоянного тока был источник питания постоянного тока Б5-49, с возможностью регулировки выходного напряжения в интервале 0,1–99,9 В, измерителем напряжения и силы тока – цифровой мультиметр Victor VC9805A+. Образцы для исследования представляли собой полоски длиной 100 мм, шириной 10 мм.

Плотность определяли по ГОСТ 15139-69 методом гидростатического взвешивания в спирте. Для исследования использовали небольшие фрагменты полиэтиленовых лент заданного состава, изъятые из разных участков испытываемого материала.

Значения показателя текучести расплава (ПТР) определяли на экструзионном пластомере XNR-400B (Китай) по ГОСТ 11645-2021 при температуре 190 °С и нагрузке 5,0 кгс (49,0 Н).

В таблице 1 представлены результаты исследования физико-механических свойств плотности, объемного удельного электрического сопротивления и показателя текучести расплава импортного аналога, ПЭНД и саженаполненных композитов.

Таблица 1. Результаты исследования физико-механических характеристик, плотности, объемного удельного электрического сопротивления и показателя текучести расплава импортного аналога, ПЭНД и саженаполненных композитов

Состав композитов, мас.%		$\sigma_р$, МПа	$\sigma_т$, МПа	$\varepsilon_р$, %	$\varepsilon_т$, %	E, МПа	ρ, г/см^3	ρ_v, Ом·см	ПТР, г/10 мин (5 кг)
ТУ	Пластификатор								
Импортный аналог		**17,7**	**28,5**	**263**	**-**	**1305**	**1,013**	**160-170**	**0,78**
273-83		24,6	24,0	786	8,1	1232	0,950-0,955	-	0,48
СН85 – 15	ДБС – 5	24,6	22,5	659	13,4	765	1,019	Не проводит	0,12
СН85 – 20	ДБС – 5	21,6	22,6	588	13,1	844	1,047	1521,9	0,07
С140 – 15	ДБС – 5	23,2	23,1	610	11,6	898	1,020	10250,3	0,08
С140 – 20	ДБС – 5	15,8	23,8	527	48	1037	1,045	160,5	0,03
СН210 – 15	ДБС – 5	15-22	22,8	589	12,2	866	1,022	14714,3	0,11
СН210 – 20	ДБС – 5	16-22	24,1	539	12,3	992	1,049	44,0	0,04
СН600 – 20	ДОС – 5	6,5	25,5	140	9,1	1225	1,037	54,6	0,16
ПЭ2НТ76-17		-	28,6	639	7,7	1485	0,955-0,961	-	2,3-3,3
СН210 – 12,5	-	1-4	29,7	16-206	5,3	1513	1,009	Не проводит	2,04

CH210 – 15	-	1-9	30,6	9-36	5,0	1578	1,025	10379	1,66
CH210 – 20	-	3-32	32,5	7-37	4,6	1613	1,044	29,8	0,86
CH210 – 12,5	ДОС – 5	1-13	24,7	71-794	11,5	1032	1,010	Не проводит	2,72
CH210 – 15	ДОС – 5	2-11	24,8	44-565	11,0	1042	1,025	2437	2,32
CH210 – 20	ДОС – 5	3-25	26,3	14-28	10,8	1198	1,053	27,4	1,33
ПЭ2НТ74-15		25,4	25,8	858,8	8,0	1316	0,946-0,953	-	1,5-2,0
C140 – 15	ДОС – 5	20,0	24,8	788	10,9	1078	1,014	123702	1,16
C140 – 20	ДОС – 5	7,8	25,8	223	10,1	1288	1,042	37,7	0,66
C140 – 20	ДБС – 5	2,9	27,7	118	9,4	1333	1,039	23,7	0,62
CH600 – 15	ДОС – 5	17,9	25,1	629	10,0	1174	1,015	535,8	1,00
CH600 – 20	ДОС – 5	9,1	26,9	321	9,0	1296	1,039	21,9	0,49
PE6252J		27,1	25,8	709	7,8	1264	0,950-0,954	-	0,3-05
C140 – 15	ДОС – 5	23,7	24,0	628	10,7	1099	1,017	6421	0,39
C140 – 20	ДОС – 5	25,2	25,1	637	10,5	1253	1,038	84,2	0,15
CH600 – 15	ДОС – 5	21,6	24,6	610	9,8	1201	1,015	1971	0,30
CH600 – 20	ДОС – 5	19,3	26,3	527	9,2	1201	1,039	45,1	0,16

Примечание: $\sigma_р$ – прочность при разрыве; $\sigma_т$ – предел текучести; $\varepsilon_р$ – удлинение при разрыве; $\varepsilon_т$ – удлинение при пределе текучести; E – модуль упругости; ρ – плотность; ρ_v – удельное объемное электрическое сопротивление; ПТР – показатель текучести расплава

Исследования физико-механических характеристик, удельного объемного электрического сопротивления и прочих параметров изготовленных композитов показали, что для создания полиэтиленовых электропроводящих материалов целесообразно применять полиэтилены марок 273-83, ПЭ2НТ74-15 и PE6252J. Анализ удельного объемного электрического сопротивления композитов и цен на указанные марки ТУ продемонстрировал, что для дальнейших исследований наиболее подходящими являются марки C140 (оптимальное соотношение цена/качество) и CH600 (наилучшие показатели электропроводности). Также установлено, что использование других марок вполне допустимо.

Концентрация ТУ в композите должна составлять не менее 12 мас.% для марки C140 и 11 мас.% для марки CH600, что очевидно связано с большей удельной площадью поверхности использованных ТУ, которая играет важную роль в формировании электропроводной «сетки» в объеме полимера. Это обусловлено вытеснением частиц ТУ в межкристаллическую аморфную область в процессе охлаждения расплава при упорядочивании макромолекул полимера при кристаллизации [3]. Чем развитее удельная поверхность ТУ, тем лучше проявляются электропроводные свойства при одинаковой концентрации ТУ [4].

Исследование влияния пластифицирующей добавки на ПТР композитов, проведенное на примере смеси ПЭ2НТ74-15 + 20 мас.% C140, показало, что химическая структура пластификатора практически не влияет на исследуемые характеристики, допускается использование как ДБС, так и ДОС.

Таким образом, возможно варьирование содержания компонентов в разрабатываемых электропроводящих композитах в пределах допустимых норм и при необходимости подбирать материалы с учетом специфики технологического оборудования, которое будет использоваться для производства конечной продукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН. Авторы выражают благодарность ООО «Омсктехуглерод» и АО «Саханефтегазсбыт» за любезно предоставленные материалы.

Список литературы

1. Воронин С.В. Защитные меры от воздействия статического электричества при транспортировке нефтепродуктов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сб. науч. статей шестой межд. научной конференции. 2019 Часть 1. С. 26-27
2. Гуль В.Е., Шенфиль Л.В. Электропроводящие полимерные композиции. – М.: Химия, 1984. – 240 с.
3. Аллахвердиева Х.В. Физико-механические свойства нанокомпозитов на основе технического углерода и полиолефинов // Материаловедение. 2022. №6. С. 42−48.
4. Аллахвердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Дадашева Э.В. Электропроводящие нанокомпозиты на основе полиэтилена высокой плотности и различных типов углеродсодержащих наполнителей // Пластические массы. 2023. Т.1. С. 53-56.

УДК 678
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-297-300

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЦЕОЛИТА NAX НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Афанасьева Н.Н., Сивцева-Гладкина Н.П., Спиридонов А.М.
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: nadezdaa782@gmail.com

Аннотация. *Исследовано влияние механоактивации и термического обжига на текстурные характеристики цеолита NaX. Установлено, что механоактивация приводит к агрегации частиц, снижению удельной поверхности и объема пор, не влияя на их средний диаметр. Прокаливание при 600 °C увеличивает удельную поверхность и объем пор. Введение модифицированного цеолита в ПТФЭ (до 2 мас.%) положительно влияет на пластичность и прочность композита, однако дальнейшее увеличение концентрации наполнителя приводит к их снижению из-за агломерации частиц. Показана перспективность использования модифицированного цеолита NaX в качестве наполнителя для композиционных материалов.*

Ключевые слова: *Политетрафторэтилен, синтетический цеолит, физико-механическая характеристика, надмолекулярная структура, композит, NaX, обжиг*

STUDY OF THE INFLUENCE OF SYNTHETIC ZEOLITE NaX ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

Afanasyeva N.N., Sivtseva-Gladkina N.P., Spiridonov A.M.
North-Eastern Federal University

Abstract. *The effects of mechanical activation and thermal annealing on the textural characteristics of NaX zeolite were studied. Mechanical activation was found to lead to particle aggregation, a reduction in specific surface area, and a decrease in pore volume, without affecting the average pore diameter. Calcination at 600°C increased the specific surface area and pore volume. The introduction of the modified zeolite into PTFE (up to 2 wt%) positively impacted the ductility and strength of the composite; however, further increases in filler concentration resulted in a decrease due to particle agglomeration. The potential for using modified NaX zeolite as a filler for composite materials was demonstrated.*

Keyword: *Polytetrafluoroethylene, synthetic zeolite, physical and mechanical characteristics, supramolecular structure, composite, NaX, calcination*

Современные требования к материалам в таких критически важных отраслях, как химическая и электрохимическая промышленность, стимулируют поиск путей модификации традиционных полимеров с целью придания им новых или улучшения существующих эксплуатационных характеристик. Одним из таких высокоценных полимеров является политетрафторэтилен (ПТФЭ), обладающий уникальным комплексом свойств, включая химическую инертность и широкий рабочий температурный диапазон. Однако широкому применению ПТФЭ в ряде случаев препятствуют его присущие недостатки.

В качестве модифицирующей добавки особый интерес представляют цеолиты – микропористые алюмосиликаты, обладающие строгорегулярной кристаллической структурой. Синтетический цеолит типа NaX является одним из наиболее эффективных сорбентов благодаря своей высокоразвитой удельной поверхности, однородному размеру пор и высокой ионообменной способности, обусловленной наличием катионов натрия в его каркасе. При введении в ПТФЭ синтетический цеолит может целенаправленно снижать газо- и паропроницаемость композита. Цеолит сохраняет свою кристаллическую структуру при температурах, превышающих температурный диапазон эксплуатации ПТФЭ. В таком случае он выступает в роли термостабилизирующего наполнителя. Именно эти свойства предопределяют его функциональный потенциал в полимерных матрицах.

Цель: Исследование физико-механических характеристик композитов на основе политетрафторэтилена, наполненного синтетическим цеолитом NaX.

Объекты и методы исследования. В данной работе для изготовления композитов был использован ПТФЭ марки ПН-90 (ГалоПолимер, Россия) со средним размером частиц 50-500 мкм, степенью

кристалличности до спекания 95–98 %, после спекания 50–70 %, плотностью 2,150–2,260 г/см3 и температурой плавления кристаллов 327 °С. В качестве полимерной матрицы был выбран синтетический цеолит NaX с плотностью 1,895 г/см^3. Механоактивацию наполнителя проводили в планетарной шаровой мельнице «Активатор 2S» (Активатор, Россия) в течении 1, 2 и 3 мин. Обжиг наполнителя проводили в программируемой муфельной печи (ELSKLO, Чехия) при 200, 400 и 600 °С в течение 4 ч. Содержание наполнителя в композитах составляло 0,5, 1,0, 2,0 и 5,0 мас.%. Было проведено по 5 параллельных испытаний на каждый композит.

Площадь поверхности, размер пор и средний размер частиц наполнителя определяли с помощью анализатора NOVAtouchTM компании «Quantachrome Instruments» (США). Адсорбатом выступал азот марки ОСЧ, масса навески адсорбента для анализа составляла ~ 0,2000 г. Обработку данных проводили по программе TouchwinTM. Физико-механические свойства композитов, такие как относительное удлинение при разрыве и предел прочности при растяжении определяли согласно ГОСТ 11262-80 на универсальной испытательной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония). Надмолекулярную структуру композитов в объеме исследовали сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) JSM7800F (Jeol, Япония).

Обсуждение результатов. Данные таблицы 1 демонстрируют, что процесс механоактивации оказывает существенное влияние на морфологию частиц цеолита NaX.

Таблица 1. Текстурные характеристики NaX после м/а

Время м/а, мин	$d_{ср}$, нм	$S_{уд}$, м^2/г	V_{Σ}, см^3/г	$D_{ср}$, нм
1	6,6	482,4	0,2218	1,8
2	7,3	436,9	0,1980	1,8
3	8,4	374,8	0,1693	1,8

Примечание:

$d_{ср}$ – средний размер частиц;
$S_{уд}$ – удельная поверхность по БЭТ;
V_{Σ} – общий объем пор при p/p0 = 0,99;
$D_{ср}$ – средний размер пор.

С увеличением времени обработки с 1 до 3 минут наблюдается закономерный рост среднего размера частиц с 6,6 до 8,4 нм, что свидетельствует о процессе агрегации и укрупнения частиц под действием механических воздействий. Вероятно, агломерация частиц является следствием стремления к уменьшению свободной поверхностной энергии [1]. Параллельно с этим происходит снижение удельной поверхности с 482,4 до 374,8 м²/г и уменьшение общего объема пор с 0,2218 до 0,1693 см³/г. Важно отметить, что средний диаметр пор оставался на уровне 1,8 нм для всех исследуемых времен механоактивации, что указывает на то, что механическая обработка не сильно изменяет диаметр первичных пор цеолитной матрицы, но влияет на межчастичную пористость и площадь внешней поверхности за счет агломерации. Таким образом, оптимальное время механоактивации наполнителя является 1 минута.

Как следует из данных таблицы 2, процесс прокаливания при температурах 200, 400 и 600 °С в течение 4 часов приводит к значительным потерям массы образцов, что связано с удалением адсорбированной воды и, возможно, дегидроксиляцией поверхности, т. е. удаление гидроксильных групп, химически связанных с поверхностью материала.

Таблица 2. Режим обжига NaX

Температура обжига, ºС	Время обжига, ч	Масса до обжига, г	Масса после обжига, г	Потери, г
200	4	10,481	8,772	1,709
400	4	10,419	8,743	1,676
600	4	10,051	8,375	1,676

Известно [2], что при обжиге до температуры 200 ºС молекулы цеолитов не претерпевают химических превращений, а при 400–600 ºС происходит частичное удаление химически связанной воды.

Таблица 3. Текстурные характеристики NaX после обжига

Время м/а, мин	$d_{ср}$, нм	$S_{уд}$, м²/г	V_{Σ}, см³/г	$D_{ср}$, нм
200	6,6	483,2	0,2351	1,9
400	6,6	480,4	0,2245	1,9
600	6,1	517,6	0,2418	1,9

Примечание:

$d_{ср}$ – средний размер частиц;
$S_{уд}$ – удельная поверхность по БЭТ;
V_{Σ} – общий объем пор при p/p0 = 0,99;
$D_{ср}$ – средний размер пор.

Текстурные характеристики обожженных образцов (Таблица 3) претерпевают заметные изменения. При обжиге до 400 °С средний размер частиц и удельная поверхность остаются неизменными. Однако прокаливание при 600 °С приводит к уменьшению среднего размера частиц до 6,1 нм и, что наиболее значимо, к увеличению удельной поверхности до 517,6 м²/г и объема пор до 0,2418 см³/г. Это свидетельствует о процессах структурной перестройки, возможно, при удалении химически связанной воды с последующим формированием дополнительной мезопористости, что делает цеолит более доступным для сорбции.

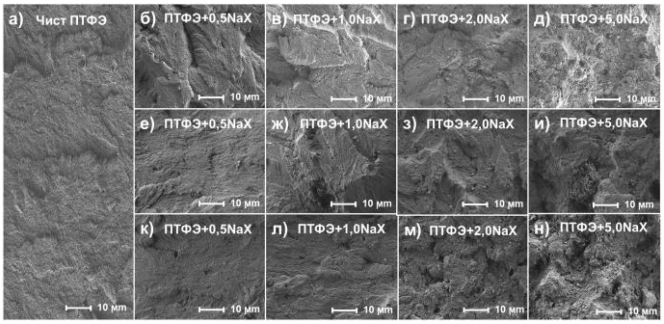


Рис. 1. Надмолекулярная структура ПТФЭ (а) и композитов на его основе в зависимости от мас.% NaX: б)в)г)д) обжиг 200ºС; е)ж)з)и) обжиг 400ºС; к)л)м)н) обжиг 600ºС при х500 увеличении

Одним из наиболее эффективных методов исследования надмолекулярной структуры полимеров является сканирующая электронная микроскопия [3].

Результаты исследования показали, что при введении в ПТФЭ NaX с 0,5 до 5 мас.% происходит значительное изменение морфологии полимерной матрицы. С увеличением концентрации и температуры обработки наполнителя наблюдается значительное разрыхление структуры. При этом на поверхностях скола исследуемых образцов хорошо видны пустоты и частицы NaX в матрице с повышением содержания наполнителя.

Введение NaX до 2 мас.% в ПТФЭ приводит к повышению относительного удлинения при разрыве, что указывает на пластичность композитов, но уже при введении 5 мас.% NaX значение относительного удлинения снижается (рис. 2а).

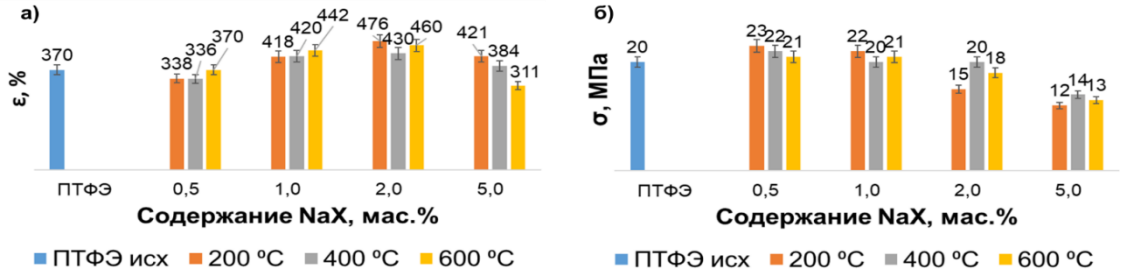


Рис. 2. Физико-механические характеристики ПТФЭ и композитов на его основе в зависимости от содержания NaX: а) относительное удлинение; б) прочность при растяжении

Это типичный эффект для полимерных композитов с жестким наполнителем, который ограничивает способность полимерной матрицы к пластической деформации. При малых содержаниях цеолит может оказывать упрочняющее действие за счет дисперсного армирования и эффективного перераспределения нагрузки. Однако после достижения определенного критического содержания наполнителя прочность начинает снижаться, что, вероятно, связано с агломерацией частиц и возникновением концентраторов напряжений (рис. 2б).

Заключение. В ходе экспериментальных исследований выявлено, что механоактивация и последующий термический обжиг позволяют целенаправленно модифицировать текстурные характеристики NaX. Прочностные свойства демонстрируют сложную зависимость от концентрации наполнителя, требующую оптимизации для достижения наилучшего комплекса свойств. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования механоактивированного и прокаленного цеолита NaX в качестве функционального наполнителя для создания износостойких композиционных материалов на основе ПТФЭ.

Список литературы

1. Бебия А. Г., Гуляев П. Ю., Милюкова И. В. Исследование сорбционных свойств цеолитов разноуровневого залегания в зависимости от удельной поверхности частиц //Вестник Югорского государственного университета. 2014. №. 2 (33). С. 15-23.
2. Размахнин К. К., Хатькова А. Н. Современные технологии переработки и модификации цеолитсодержащих пород Восточного Забайкалья // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2018. Т.5. №2. С.196-201
3. Чемисенко О. В. Структура и свойства нанокомпозита на основе политетрафторэтиле-на, модифицированного диоксидом кремния и скрытокристаллическим графитом // диссертация на соискание ученой степени к.т.н.: 05.16.09 / Чемисенко Олег Владимирович. Омск, 2018. 145 с.

УДК 668.44:637.652:569.114
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-301-304

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ БИВНЕЙ МАМОНТА III-IV СОРТА ПОСРЕДСТВОМ ПРОПИТКИ СМОЛАМИ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА СУВЕНИРНОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТОДОМ ЧПУ-ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Ботвин Г.В., Петров В. В., Чириков А.А., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Платонов Б.Р., Аргунова А.Г., Петухова Е.С.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: gleb-0379@mail.ru

Аннотация. *Представлена методика пропитки бивней мамонта III-IV сорта полимерными смолами для создания заготовок для дальнейшей обработки на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Установлено, что оптимальным способом достижения монолитности заготовок из бивня мамонта низкого сорта является чередование стадий вакуумирования со стадией выдержки образца при избыточном давлении во время пропитывания.*

Ключевые слова: *бивень мамонта, полимерные смолы, стабилизация, пропитывание, фрезерование.*

INTEGRITY RESTORATION OF GRADE III-IV MAMMOTH TUSKS BY RESIN TREATMENT FOR SUBSEQUENT SOUVENIR PRODUCTION VIA CNC MILLING

Botvin G. V., Petrov V. V., Chirikov A. A., Isakova T. A., Solov'ev T. M., Platonov B.R., Argunova A.G.,and Petukhova E. S.
Yakutsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Abstract. *A method for the treatment of grade III-IV mammoth tusks with polymer resins has been developed to produce blanks suitable for subsequent processing on computer numerical control (CNC) machines. The procedure consists of alternating vacuum treatment stages with a stage in which the sample is maintained under excess pressure during treatment. This sequence has been identified as the most effective approach for preserving the structural integrity of low-grade mammoth tusk blanks.*

Keyword: *mammoth ivory, polymer resins, stabilization, impregnation, milling.*

Введение. Бивень мамонта является природным материалом животного происхождения, обладающим особыми декоративными качествами, которые делают его востребованным в художественной резьбе для производства украшений, сувениров и т. д. Это связано с запретом на охоту на слонов, чьи бивни тоже использовались для производства дорогих изделий ручной работы и сувениров [1, 2]. Климатические условия Арктики Якутии способствуют отличной сохранности ископаемых останков мамонтовой фауны, заключённых в слоях многолетнемерзлой почвы [3–5]. Природные процессы ежегодно приводят к разрушению ледяных пластов, высвобождая ископаемые останки, а прямое воздействие факторов окружающей среды негативно влияет на их сохранность [6, 7].

Качество сохранившихся бивней сильно варьируется. Оно ухудшается вследствие воздействия климатических факторов, таких как эрозия, влажность, перепады температур и периодичность покрытия снегом [8–10]. На рисунке 1 представлены БМ III и IV сортов, мало востребованные среди резчиков по кости.

Рис. 1. БМ III и IV сортов

В деревообработке используют специальные составы для пропитки древесины, чтобы повысить её прочность и эстетичность и сохранить ее декоративные качества. Данные методики могут быть применены для восстановления целостности растрескавшихся низкосортных БМ, превращая их в качественные монолитные заготовки. Такие изделия идеально подходят для серийного производства недорогой сувенирной продукции, а также продукции, отличающейся новыми эстетическими качествами.

Цель настоящей работы – разработка эффективных методов пропитки БМ низкого сорта полимерными смолами, позволяющих расширить сферу их применения при производстве сувенирной продукции.

Методика пропитывания. Исследование проводилось на образцах БМ III-IV сортов. Материал предварительно очищался от загрязнений в ультразвуковой ванне и просушивался.

Для пропитывания были выбраны три вида полимерных смол: двухкомпонентная эпоксидная смола Элакор-ЭД(ТэоХим, Россия), полиэфирная смола CRYSTIC 196PA(Scott Bader, Великобритания) и состав для стабилизации древесины 100Терм(Gagarin Composite, Россия).

Пропитывание проводилось в вакуумной камере «Эрствак 9» (ERSTEVAK Ltd., Россия) при чередовании пониженного давления, создаваемого с применением вакуумного насоса «GL Ltd 3.0 CFM» (Zensen, Китай), и избыточного давления, нагнетаемого посредством воздушного компрессора «OLS 280/50 CM2» (Fubag, Германия/Китай). Режим чередования вакуума и давления представлен на рисунке 2.

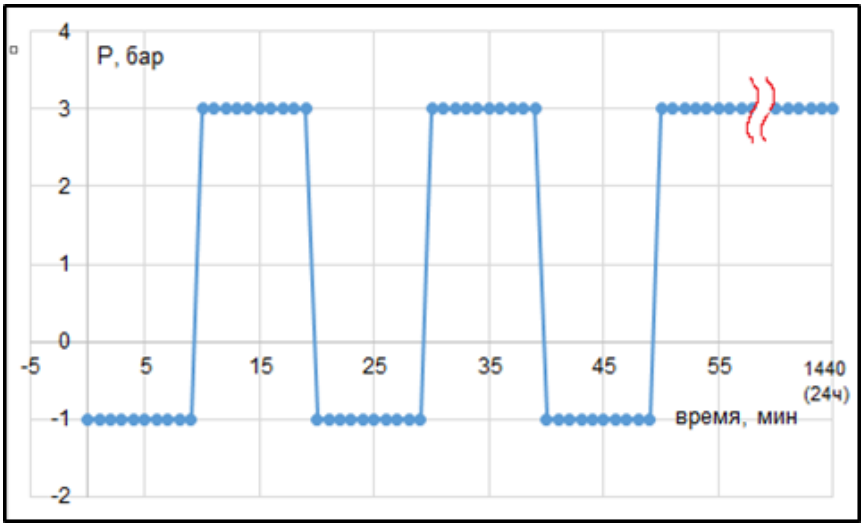
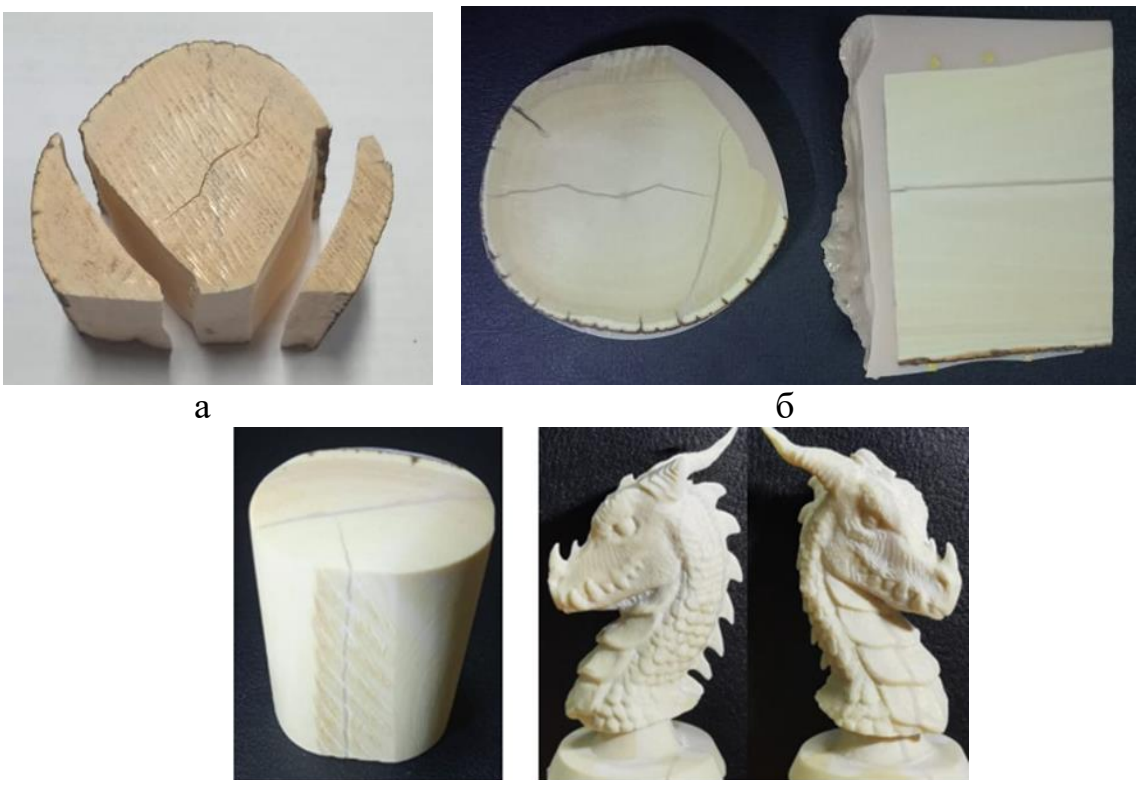


Рис. 2. Режим чередования пониженного и избыточного давления

Результаты. Эксперименты показали, что Элакор-ЭД не полностью заполняет трещины и полости в образцах БМ, что вероятно вызвано высокой вязкостью данной марки смолы. Удовлетворительные результаты показала смола CRYSTIC без добавления состава для стабилизации 100 ТЕРМ, который приводит к охрупчиванию затвердевшего состава. Смола CRYSTIC равномерно распределяется внутри образца БМ и заполняет все пустоты.

После завершения процесса были изготовлены тестовые изделия на станке с ЧПУ. Заготовки, прошедшие такую обработку, позволили изготовить как плоскорельефные, так и объемные изделия высокого качества.

Фрезерование. Результаты фрезерования на станке с ЧПУ показали, что пропитанный БМ III сорта хорошо поддаётся обработке. На рисунке 3 представлен исходный образец БМ, пропитанная заготовка, а также полученное фрезерованием объемное изделие. Видно, что на фигурке дракона детализировано прорисовываются даже очень мелкие элементы. Однако при обработке некоторых тонких деталей наблюдались незначительные дефекты (например, откол мелких частей), что обусловлено низкой степенью сцепления смолы с БМ.



а б

в

Рис. 3. Пропитывание образца БМ III сорта: а – исходный фрагмент БМ; б – пропитанная заготовка; в – заготовка для фрезерования и готовое изделие

При фрезеровании объёмной фигуры из пропитанного БМ IV сорта (рис. 4, г), откололся значительный сегмент фигуры, что также свидетельствует о низком уровне адгезионного взаимодействия между смолой и БМ.

Рис. 4. Объемное изделие из БМ IV сорта

Заключение. Разработана технология стабилизации III-IV сортов бивней мамонта с использованием комплексного подхода, включающего процессы очистки, сушки, пропитывания полимерными смолами в камере с чередованием вакуумирования и выдержки под давлением.

Использование метода восстановления целостности бивней мамонта III-IV путем пропитывания полимерными смолами позволит вовлечь большее количество низкосортного сырья в производство серийной сувенирной продукции.

Список литературы

1. Охота на слонов: история и современность [Электронный ресурс]. URL: https://vk.com/wall-31922085_203255?ysclid=lvx2uj7va5308868996 (дата обращения 21.10.2025).
2. Джон Гейгер. Африканский слон. Охота – это сохранение видов и защита экологии? [Электронный ресурс]. URL: https://www.ohotniki.ru/hunting/article/2023/06/02/663874-afrikanskiy-slon-ohota-eto-sohranenie-vidov-i-zaschita-ekologii.html?ysclid=lvx30nj76c197935967 (дата обращения 21.10.2025).
3. Шпанский А.В. О мамонтах и их спутниках: палеоэкология мамонтовой фауны. – М.: Фитон XXI, 2021. 152 с.
4. Kuznetsova T.V., Matthes H., Tumskoy V.E., Schirrmeister L. Mammoth Fauna Remains From Late Pleistocene Deposits of the Dmitry Laptev Strait South Coast (Northern Yakutia, Russia) // Frontiers in Earth Science. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.757629
5. Baker, Barry W., Rachel L. Jacobs, Mary-Jacque Mann, Edgard O. Espinoza, and Giavanna Grein. 2020. CITES Identification Guide for Ivory and Ivory Substitutes, 4th edition, edited by Crawford Allan. World Wildlife Fund Inc., Washington DC. Commissioned by CITES Secretariat, Geneva, Switzerland.
6. Schneider von Deimling T., Meinshausen M., Levermann A., Huber V., Frieler K., Lawrence D.M., Brovkin V. Estimating the permafrost-carbon feedback on global warming // Biogeosciences Discussions. 2011. no.8. pp.4727–4761.
7. Кириллин Н. Д., Ноговицын Р. Р. Ископаемая мамонтовая кость – особый природный ресурс // Наука и техника в Якутии. 2010. №1(18) (дата обращения: 21.10.2025). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/iskopaemaya-mamontovaya-kost-osobyy-prirodnyy-resurs
8. Рябчикова Э.Д. Палеонтология. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 136 с.
9. Янина Б.Т. Методическое руководство по тафономии позвоночных организмов. М.: Изд-во МГУ, 1994. 144 с.
10. Care of Ivory, Bone, Horn and Antler [Электронный ресурс]. URL: https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/canadian-conservation-institute-notes/care-ivory-bone-horn-antler.html (дата обращения 21.10.2025).

УДК 678:537.31
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-305-307

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Глуховеря Е. Г.
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»
E-mail: jon31_1992@yahoo.com

Аннотация. *В работе исследованы электрическое сопротивление и его температурная зависимость у электропроводны полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена низкой плотности, наполненного электропроводным техническим углеродом. При изготовлении композитов использовали низко- и высокодисперсная фракции технического углерода. Для исследованных композитов определены отношение максимального сопротивления к сопротивлению при комнатной температуре и температура перехода от положительного температурного коэффициента сопротивления к отрицательному. Установлено, что использование технического углерода в низко дисперсной форме для изготовления композитов обеспечивает значительное увеличение максимального сопротивления вблизи температуры плавления матрицы при температуре перехода от положительного температурного коэффициента сопротивления к отрицательному.*

Ключевые слова: *электропроводные полимерные композиты, полиэтилен низкой плотности, электропроводный технический углерод, дисперсность технического углерода, температурная зависимость электрического сопротивления.*

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CARBON BLACK DISPERSION ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF ELECTRICAL RESISTANCE OF CONDUCTIVE COMPOSITES BASED ON LOW-DENSITY POLYETHYLENE

Glukhoverya E.G.
Omsk State Technical University

Annotation. *This study investigated the electrical resistance and its temperature dependence of conductive polymer composite materials based on low-density polyethylene filled with conductive carbon black. Low- and highly dispersed fractions of carbon black were used in the fabrication of the composites. The ratio of maximum resistance to room-temperature resistance and the temperature of the transition from a positive to a negative temperature coefficient of resistance were determined for the studied composites. It was found that the use of low-dispersed carbon black in the fabrication of composites provides a significant increase in maximum resistance near the melting point of the matrix at the temperature of the transition from a positive to a negative temperature coefficient of resistance.*

Keywords: *conductive polymer composites, low-density polyethylene, conductive carbon black, carbon black dispersion, temperature dependence of electrical resistance.*

Электропроводные полимерные композиционные материалы, в том числе на основе полиэтилена, с углеродными наполнителями, применяются в различных электротехнических системах, в частности в качестве саморегулирующихся нагревателей. В качестве электропроводны углеродных наполнителей, как правило, используются углеродные нанотрубки, углеродное волокно, технический углерод (ТУ), графит. Задачам исследования электропроводных полимерных композитов посвящено много работ [1–6], однако, к настоящему времени не сформирован общепризнанный подход к рациональному выбору наполнителей и полимера в качестве матрицы, что затрудняет проектирование электропроводных полимерных композитов с заранее заданными свойствами.

В основе особых термоэлектрических свойств электропроводных полимерных композиционных материалов (ПКМ) с ТУ, используемых в саморегулирующихся нагревателях, лежит эффект повышенного положительного температурного коэффициента электрического сопротивления (ПТК), который заключается в резком повышении электрического сопротивления композита при приближении к тем-

пературе плавления полимерной матрицы. Однако при более высоких температурах у подобных композитов наблюдается резкое падение электрического сопротивления, что может привести к перегреву и разрушению композита. Данное явление получило название – отрицательный температурный коэффициент электрического сопротивления (ОТК) [7–9].

Для регулировки ПТК и ОТК в электропроводных полимерных композитах используются различные методы: применение в качестве полимерной матрицы смеси полимеров, различные виды сшивания матрицы, варьирование марок ТУ с различной дисперсностью и структурностью. Возможность регулировать значение ПТК в электропроводных ПКМ варьированием дисперсности технического углерода, используемого в качестве наполнителя, практически не исследована. Установлено комплексное влияние на ПТК дисперсности и структурности при использовании различных марок ТУ [8, 9], однако, выделить фактор влияния дисперсности по результатам таких исследований невозможно. Поэтому вопрос о влиянии дисперсности ТУ на термоэлектрические свойства электропроводных ПКМ остается открытым. Данное исследование проводилось с целью выявить закономерности влияния дисперсности ТУ на температурную зависимость электрического сопротивления ПКМ.

В работе исследовались электрическое сопротивление и его температурная зависимость для ПКМ на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) марки 10803-020, производства ОАО «Уфаоргсинтез», наполненного электропроводным ТУ С140 серии OMCARB [10] производства ООО «Омсктехуглерод». Используемая марка ТУ относится к специальным электропроводным маркам ТУ. Предоставленный образец ТУ характеризуется удельным сопротивлением 0,0032 Ом□м, показателем абсорбции масла (ДБФ) 135 см^3/100 г, площадью поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA) 307 м^2/г и внешней площадью поверхности по азоту (STSA) 137 м^2/г [10]. В качестве низко дисперсного (НД) наполнителя использовался ТУ в гранулированном виде, поставляемом производителем. Для получения высокодисперсной (ВД) формы ТУ гранулы измельчали в ножевой мельнице в течение 15 секунд.

ПКМ изготавливали с содержанием наполнителя в полимерной матрице 20 масс.% ТУ, что обеспечивает электропроводность ПКМ и незначительно превышает порог перколяции, как было показано ранее [11]. ПКМ с низко дисперсным ТУ обозначен 20НД, а с высокодисперсным – 20ВД. Перед изготовлением ПКМ, компоненты выдерживались в муфельной печи: в течение четырех часов при 120 °С – наполнитель (ТУ) и при 80 °С – полимер (ПЭНП). Гранулят ПКМ получали методом тройного экструдирования на лабораторном экструдере SCAMEX RHEOSCAM Micro-extruder при температурах нагревательных зон (170 ± 20) °С. Образцы ПКМ для лабораторных испытаний изготавливали методом прямого прессования в термопрессе Joos LAP 40 используя пресс-формы с размером ячеек 147x147x2 мм, температура прессования 190 °С.

Для измерения удельного электрического сопротивления ПКМ использовался милли-тераомметр Milli-TO3. Температурные зависимости электрического сопротивления ПКМ получали при нагревании образцов в муфельной печи WiseTherm FHP-05 (DAIHAN Scientific). Нагревание образцов проводили по схеме: от комнатной температуры (~23 °С) до 60 °С со скоростью 3 °С/мин, далее от 60 до 110 °С со скоростью 1 °С/мин.

На рисунке 1 приведена температурная зависимость сопротивления образца 20НД. Характер аналогичной зависимости для образца 20ВД качественно совпадает с зависимостью, приведенной на рисунке 1, однако, количественно указанные зависимости для двух исследованных образцов существенно отличаются.

Установлено, что использование высокодисперсного ТУ приводит к значительному уменьшению сопротивления ПКМ при комнатной температуре. Сопротивление образца 20ВД при 23 ºС в 3 раза меньше, чем образца 20НД. Таким образом, использование высокодисперсной фракции ТУ в отличие от низко дисперсной фракции ТУ позволяет получить ПКМ с большей проводимостью при одинаковой концентрации наполнителя в ПЭНП.

При внешнем нагреве у всех образцов наблюдается характерный максимум на температурной зависимости сопротивления в интервале температур 106–107 °С. Данный максимум соответствует переходу от ПТК к ОТК в композите, наблюдается при температуре плавления матрицы и обусловлен перестройкой электропроводящих цепочек из частиц наполнителя в расплавленных кристаллических областях матрицы. Отношение максимального сопротивления к сопротивлению при комнатной температуре для исследуемых образцов значительно отличается в зависимости от дисперсности ТУ. Для образца 20ВД указанное отношение сопротивлений составило 23, а для образца 20НД – 442. Таким образом, интенсивность ПТК зависит от размера фракции наполнителя, у образца с низкодисперсной фракцией ТУ она значительно больше, чем у образца с высокодисперсной фракцией наполнителя. В работах [8, 9] подобная закономерность установлена в комплексе с влиянием показателей структурности ТУ

при исследовании различных марок наполнителя. В данной работе установлено влияние дисперсности ТУ на зависимость сопротивления от температуры ПКМ независимо от структурности наполнителя.

Полученные данные могут быть использованы при разработке электропроводных ПКМ, применяемых в саморегулирующихся нагревателях.

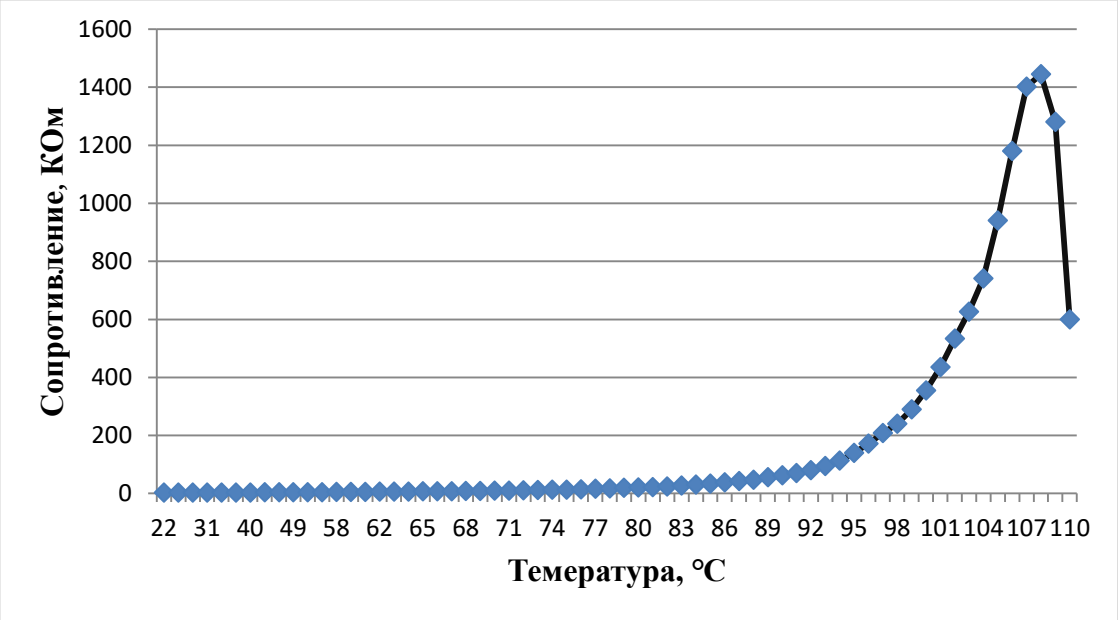


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления образца 20НД от температуры

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

Список литературы

1. Zhong H., Haiping H., (2023) Review on Material Performance of Carbon Nanotube-Modified Polymeric Nanocomposites. Recent Progress in Materials, vol.5, no.3, DOI: 10.21926/rpm.2303031
2. Yi L., Han Z., (2018) Pyroresistivity in conductive polymer composites: a perspective on recent advances and new applications. Society of Chemical Industry, vol.68, pp.299-305, DOI: 10.1002/pi.5735
3. Huan P., Ling X., Ding-Xiang Y., Zhong-Ming L., (2014) Conductive polymer composites with segregated structures. Progress in polymer science, vol.39, pp.1908-1933, DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007
4. Setnescu R., Lungulescu E.-M., Marinescu V. (2023) Polymer composites with self-regulating temperature behavior: properties and characterization. Properties and Characterization, vol.16, no.157, DOI: 10.3390/ma16010157
5. Farah B., Khairul A. Abdul H., (2021) Preliminary investigation on the correlation between mechanical properties and conductivity of low-density polyethylene/carbon black (LDPE/CB) conductive polymer composite (CPC). Journal of Physics: Conference Series, vol. 2169, DOI: 10.1088/1742-6596/2169/1/012020
6. Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б., Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы, 2021, №3-4, С.6-9. DOI:10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9.
7. Марков А.В., Марков В.А., Чижов А.С., Влияние характеристик полиэтилена на термоэлектрические свойства полиэтиленовых композитов с техническим углеродом // Пластические массы, 2021, №5-6, С.18-23, DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23.
8. Ji-Zhao L., Quan-Quan Y., (2017) Effects of carbon black content and size on conductive properties of filled high-density polyethylene composites. Advances in Polymer Technology, vol.37, no.6, pp.2238-2245. DOI:10.1002/adv.21882.
9. Shijian L., Wong C.P., (2000) Study on effect of carbon black on behavior of conductive polymer composites with positive temperature coefficient. IEEE transactions on components and packaging technologies, vol.23, no.1, pp.151-156, DOI: 10.1109/TCPMT.2000.824158
10. Кропотин О.В., Рогачев Е.А., Дроздова Е.А., Каленчук А.А., Глуховеря Е.Г. Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-механических характеристик технического углерода// Ползуновский вестник. 2024, №3, С.228-233. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.033
11. Rogachev E.A., Danshina V.V., Kropotin O.V., Egorova V.A., Glukhoverya E.G., Stavrov D.A., Nesov S.N., Drozdova E.A. (2025) Calendar ageing of electrically conductive carbon black: changes in physicochemical properties and possibilities for further use. Azerbaijan chemical journal, no.3, pp.90-104, DOI: 10.32737/0005-2531-2025-3-90-104

УДК 678:537.31
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-308-311

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ, НАПОЛНЕННОГО СВЕРХЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УГЛЕРОДОМ

Дроздова Е.А.
Омский государственный технический университет
E-mail: ea_ntk@mail.ru

Аннотация. *В работе исследовались удельное электрическое сопротивление и структура электропроводящих полимерных композиционных материалов на основе полиэтилена высокой плотности, наполненного сверхэлектропроводным техническим углеродом. При изготовлении композитов использовали мелкодисперсные компоненты наполнителя и матрицы. Для исследованных композитов определены значения переходов электрофизических характеристик из области «изолятор – полупроводник» с последующим переходом «полупроводник – проводник». Установлено, что использование полиэтилена высокой плотности и технического углерода в мелкодисперсных формах для изготовления композитов обеспечивает равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице во всей линейке исследуемых образцов.*

Ключевые слова: *электропроводящие полимерные композиты, полиэтилен высокой плотности, сверхэлектропроводный технический углерод, дисперсность исходных компонентов, структура полимерных композитов.*

INVESTIGATION OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF COMPOSITES BASED ON HIGH DENSITY POLYETHYLENE FILLED WITH SUPERCONDUCTIVE CARBON BLACK

Drozdova E.A.
Omsk State Technical University

Abstract. *The work investigated the electrical resistivity and structure of electroconductive polymer composites based on high density polyethylene filled with superconductive carbon black. Fine filler and matrix components were used in the composites. For the studied composites, values of transitions of electrophysical characteristics from the «insulator-semiconductor» region are determined, followed by the «semiconductor-conductor» transition. It was found that the use of high-density polyethylene and carbon black in finely dispersed forms for the manufacture of composites ensures uniform distribution of filler in the polymer matrix in the entire line of samples under study.*

Keyword: *electroconductive polymer composites, high density polyethylene, superconductive carbon black, dispersion of components, structure of polymer composites*

Последние несколько десятилетий электропроводящие композиционные материалы стали неотъемлемой частью мира полимеров. При этом одним из наиболее эффективных наполнителей, обеспечивающим гибкую регулировку электропроводности и механических свойств электропроводящих полимерных композиционных материалов (ПКМ) остается технический углерод (ТУ), который используется как мононаполнитель, так и как компонент комплексных наполнителей [1-4]. Однако, зачастую для достижения требуемого уровня электрического сопротивления необходимо изготавливать ПКМ с содержанием технического углерода от 15 масс.% и более [4–6], что приводит к снижению прочностных характеристик изготавливаемых материалов. С целью повышения уровня электропроводности ПКМ при сниженной степени наполнения в сравнении со стандартными марками ТУ, создаются новые типы ТУ, например, так называемый ультрапроводящий или сверхэлектропроводный ТУ с общей площадью поверхности по многоточечной адсорбции азота (NSA) более 1050 м^2/г и абсорбцией масла более 350 см^3/100 г [7, 1].

Требования к электропроводящим ПКМ, которые предъявляются в современной промышленности, определяются не только задачей достижения требуемого уровня электропроводности, но и сохранением или повышением прочностных характеристик.

Необходимость придания электропроводных свойств ПКМ имеет важнейшее значение для предотвращения образования электростатических разрядов, исключения риска взрыва, например, при изготовлении кабельной продукции, тары для транспортировки горючих материалов, особенно в климатических условиях Крайнего Севера, и т. д. [1–4]. На формирование и стабильность электропроводной структуры ПКМ оказывают влияние не только свойства ТУ и полимерной матрицы, но и процесс переработки и изготовления композиций, а также дисперсность исходных компонентов. Равномерное распределение технического углерода в полимерной матрице оказывает значительное влияние на свойства композитов. Одним из методов повышения степени диспергирования является изменение дисперсности компонентов композиционной смеси в процессе создания материалов. Этот подход особенно актуален для электропроводящих ПКМ, содержащих ТУ. С целью регулирования дисперсности ТУ может быть использовано предварительное измельчение гранулированного материала или применение «пылящего» ТУ. Технологический процесс получения полиолефинов также позволяет использовать мелкодисперсную фракцию, отобранную до процесса гранулирования в экструдере, для изготовления композитов. Применение компонентов смеси в мелкодисперсных формах увеличивает площадь поверхности межфазного взаимодействия, что должно положительно влиять на физико-механические и электрофизические характеристики ПКМ.

В работе исследовались удельное электрическое сопротивление и структура электропроводящих ПКМ на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) марки HD03490PE, произведенного компанией ПАО «СИБУР», и сверхэлектропроводного ТУ марки OMCARB CH1000 производства ООО «Омск Карбон Групп» [8]. ПКМ изготавливались из ПЭВП в форме мелкодисперсного порошка и ТУ в форме порошка (система «порошок-порошок»). Товарная форма поставки технического углерода – гранулы размером 2–4 мм, поэтому в рамках исследований гранулированный ТУ измельчали с использованием ножевой мельницы для твёрдых продуктов DM-6 в течение 2 минут. Размер частиц ТУ после измельчения составил 0,2–10 мкм. ПЭВП в виде мелкодисперсного порошка с размером частиц 12–13 мкм был предоставлен компанией ПАО «СИБУР». Композиционные материалы изготавливали с содержанием ТУ в полимерной матрице от 4 масс.% до 16 масс.% с шагом 2 масс.%.

Гранулят ПКМ был получен методом двойного экструдирования на лабораторном экструдере SCAMEX RHEOSCAM Micro-extruder при температурах нагревательных зон (170 ± 20) °С. Образцы ПКМ для лабораторных испытаний изготавливали на основании ГОСТ 16338 методом прямого прессования в термопрессе Joos LAP 40 используя пресс-формы с размером ячеек 147×147×2 мм, температура прессования 190 °С.

Для измерения удельного электрического сопротивления ПКМ использовался милли-тераомметр Milli-TO3. Структура ПКМ исследовалась методом растровой электронной микроскопии.

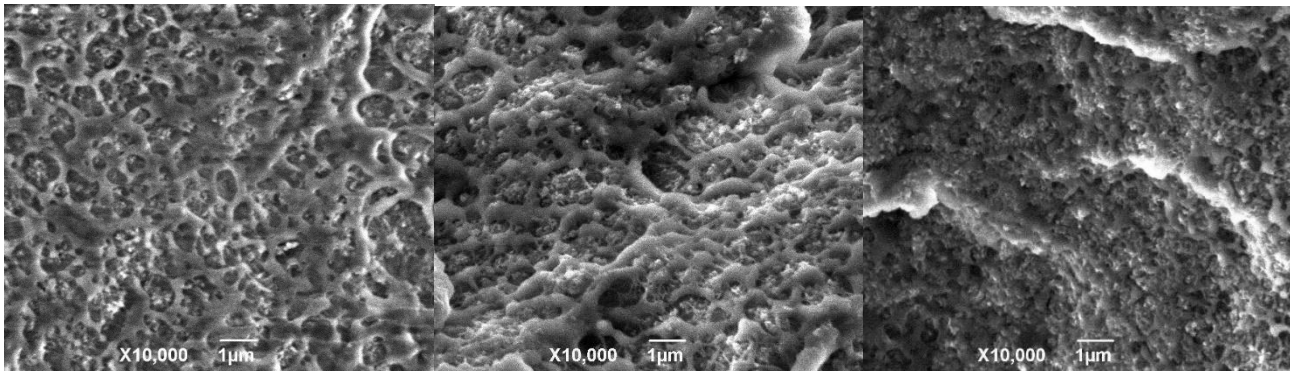
С увеличением концентрации ТУ удельное электрическое сопротивление ПКМ закономерно снижается. По мере увеличения доли содержания сверхэлектропроводного технического углерода CH1000 в полимер-углеродном композите происходит уменьшение значения удельного объемного электрического сопротивления с переходами электрических свойств из области «изолятор – полупроводник» с последующим переходом «полупроводник – проводник» [2]. Диапазоны значений удельного электрического сопротивления ПКМ ПЭВП – ТУ и их классификация по уровню электропроводности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Классификация электропроводящих композитов ПЭВП – ТУ

φ CH1000, масс.%	ρ, Ом·м	Классификация материалов в соответствии с удельным электрическим сопротивлением	Потенциальное применение
6 – 8	$1{,}77 \cdot 10^4 – 10^9$	Электростатическое рассеивание	Тара для хранения и транспортировки ГСМ, трубопроводы нефте- и газодобычи, антистатические контейнеры для хранения и др.
10 – 16	0,42 – 239,49	Проводящие материалы	Саморегулируемые нагревательные элементы, сенсоры, изделия для экранирования от электромагнитных помех и др.

Процесс формирования электропроводящей структуры исследованных ПКМ начинается при концентрации ТУ 6 масс.%. В межфазной области ПКМ образуются цепочечные структуры из частиц ТУ, разделенные слоем полиолефинового диэлектрика. Подобные структуры обеспечивают проводимость туннельного характера [9-11]. При последующем увеличении содержания ТУ и при достижении 10–12 масс.% наполнителя в составе ПЭВП происходит образование «цепочечных кластеров», в результате чего исключительно за счет электронной проводимости достигается максимум электропроводности композитов. Дальнейшее повышение содержания углерода вплоть до 16 масс.% не приводит к значительным изменениям значения удельного сопротивления. Минимальный уровень удельного сопротивления для исследуемых композитов составляет 0,422 Ом·м при содержании техуглерода 16 масс.%.

Предположение об изменении структуры ПКМ подтверждается результатами электронно-микроскопического анализа исследуемых образцов (рис. 1). При содержании ТУ 4 масс.% наполнитель находится внутри ячеистой структуры ПЭВП. Расстояние между частицами СН1000 превышает 5–10 нм [12–13], при этом частицы ТУ отделены слоем диэлектрика, что препятствует переходу электронов ТУ через диэлектрические слои полимера за счет туннелирования. С увеличением содержания ТУ до 6–8 масс.% и более происходит уменьшение толщины слоя полимера и увеличивается число потенциальных контактов наполнителя, повышая вероятность образования электропроводящей цепочечной структуры, однако, уровень удельного электрического сопротивления позволяет предположить, что основной вклад в электропроводность ПКМ обеспечивается за счет туннельной проводимости. При последующем увеличении содержания СН1000 до 10 масс.% и более образуются электропроводящие кластеры, где за счет непосредственного контакта частиц ТУ друг с другом возникает электронная проводимость, поэтому после достижения максимального уровня удельного объемного сопротивления дальнейшее увеличение концентрации ТУ существенно не влияет.



а б в

Рис. 1. Изображение РЭМ ПКМ ПЭВП+СН1000 (порош./порош.): а – 4 масс.%, б – 10 масс.%, в –16 масс.% при увеличении ×10 000

В ходе проведенных исследований выявлены закономерности, определяющие формирование структуры и электрофизических свойств исследуемых ПКМ. Установлено, что удельное электрическое сопротивление зависит от концентрации наполнителя, порог перколяции равен примерно 6 масс.%. При дальнейшем увеличении концентрации ТУ до 10 масс.% и более в ПКМ образуется устойчивая электропроводящая система. Минимальный уровень электросопротивления для исследуемых композитов составил 0,422 Ом·м при содержании ТУ 16 масс.%.

В рамках выполненной работы установлено, что ПКМ на основе ПЭВП с использованием СН1000 переходят из области «изолятор – полупроводник» с последующим переходом «полупроводник – проводник» при кратном снижении степени наполнения ТУ в сравнении со стандартными марками ТУ. Использование ПЭВП и ТУ в мелкодисперсных формах для изготовления ПКМ обеспечивает равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице во всей линейке исследуемых образцов.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке электропроводящих ПКМ, применяемых в различных технических устройствах и системах.

Автор выражает благодарность компаниям ООО «Омсктехуглерод» и ПАО «СИБУР» за предоставленные образцы для проведения исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

Список литературы

1. Carbon black: science and technology / Donnet J.-B. (ed.). CRC Press, Marcel Dekker, N.-Y. Basel, USA, 1993. 460 p.
2. Pang H., Xu L., Yan D.-X., Li Z.-M. Conductive polymer composites with segregated structures // Progress in polymer science. 2014, vol.39(11). pp.1908–1933. DOI:10.1016/j.progpolymsci. 2014.07.007
3. Аллахвердиева Х.В., Кахраманов Н.Т., Дадашева Э.В. Электропроводящие нанокомпозиты на основе полиэтилена высокой плотности и различных типов углеродсодержащих наполнителей // Пластические массы. 2023. №5-6. С.53-56. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56
4. Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы. 2021. №3-4. С.6-9. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9
5. Calendar ageing of electrically conductive carbon black: changes in physicochemical properties and possibilities for further use / E.A. Rogachev, V.V. Danhina, O.V. Kropotin, V.A. Egorova, E.G. Glukhoverya, D.A. Stavrov, S.N. Nesov, E.A. Drozdova // Azerbaijan Chemical Journal. 2025, vol.3. pp.90-104.
6. Effects of POE and Carbon Black on the PTC Performance and Flexibility of High-Density Polyethylene Composites / Feng Xue, Kangcai Li, Lei Cai, Enyong Ding // Advances in Polymer Technology, vol. 2021, Article ID 1124981, 11 pages https://doi.org/10.1155/2021/1124981
7. Раздьяконова Г.И., Суровикин В.Ф. Синтез разновидностей электропроводного технического углерода путем термоокислительного пиролиза углеводородов. Феноменологическая и математическая модели процесса синтеза // Каучук и резина. 2012. №5. С.24-29
8. Кропотин О.В., Рогачев Е.А., Дроздова Е.А., Каленчук А.А., Глуховеря Е.Г. Зависимость электрического сопротивления от параметров кристаллической структуры и физико-механических характеристик технического углерода// Ползуновский вестник. 2024. №3. С.228-233.
9. Gao J. Fabrication of conductive polymer composites and their applications in sensors // Polym. Nanocomposite Mater. 2021, pp.21–52. https://doi.org/10.1002/9783527826490.ch2
10. Njuguna J., Pielichowski K., Desai S. Nanofillerreinforced polymer nanocomposites // Polym. Adv. Technol. 2008, vol.19, no. 8, pp.947–959. https://doi.org/10.1002/pat.1074
11. Кахраманов Н.Т., Аллахвердиева Х.В., Мустафаева Ф.А. Структура и свойства электропроводящих композитов на основе полиолефинов и технического углерода // Композиционные материалы. Журнал прикладной химии. 2022. Т.95. Вып.8. С.1011-1018. https://doi.org/10.31857/S0044461822080084
12. А.В. Марков, В.А. Марков, А.С. Чижов, Влияние характеристик полиэтилена на термоэлектрические свойства полиэтиленовых композитов с техническим углеродом, Пластические массы. 2021. №5-6. С.18-23. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-5-6-18-23
13. Н.Н. Комова, Г.Е. Заиков, Термодинамическая модель изменения электрической проводимости полиэтилена высокой плотности, наполненного техническим углеродом, Вестник технологического университета. 2015. Т.18. №11. С.8 -14.

УДК 579.26
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-312-315

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО ПЕЙЗАЖА С ПОВЕРХНОСТЕЙ ПКМ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. ЯКУТСКА

Ерофеевская Л.А.[1], Далбаева Е.А.[2], Кычкин А.К.[3], Дьяконов А.А.[4], Салтыкова А.А.[2]
[1]Институт проблем нефти и газа СО РАН
[2]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[3]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[4]Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: aselka-333@mail.ru

***Аннотация**. В статье исследована биодеградация полимерных композитов (стекло-, угле-, базальтопластики) бактериями, плесневыми грибами и их консорциумами при различных температурах, влажности и времени экспозиции. Биозаражение оценено с помощью микроскопии, выявлены структурные изменения: образование новых функциональных групп и расщепление полимерных цепей, обусловленные климатическим старением и биодеградацией.*

***Ключевые слова:** полимерные композитные материалы, биодеградация, биозаражение, плесневые грибы, бактерии, микроскопия.*

INVESTIGATION OF THE MICROBIOLOGICAL LANDSCAPE FROM THE SURFACES OF PCMS IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF YAKUTSK

Erofeevskaya L.A.[1], Dalbaeva E.A.[2], Kychkin A.K.[3], Dyakonov A.A.[4], Saltykova A.A.[2]
[1]Institute of Oil and Gas Problems SB RAS
[2]FIC «Yakut Scientific Center» SB RAS
[3]Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS
[4]North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

***Abstract**. The article examines the biodegradation of polymer composites (glass, carbon, and basalt plastics) by bacteria, mold fungi, and their consortia at various temperatures, humidity, and exposure time. The biological contamination was assessed using microscopy, and structural changes were revealed: the formation of new functional groups and the cleavage of polymer chains caused by climatic aging and biodegradation.*

***Keyword:** polymer composite materials, biodegradation, bio-contamination, mold fungi, bacteria, microscopy.*

Отбор проб для микробиологических исследований выполнен согласно стандартным методикам [1–4]. Микробную контаминацию образцов полимерных композитных материалов (ПКМ) оценивали путем взятия смывов с последующим посевом на твердые питательные среды и подсчетом колоний. Результаты выражали в КОЕ, посев и учет проводили по методическим рекомендациям [5].

Методы исследования микробиологического поражения полимерных материалов регламентированы нормативами [6–12]. Образцы ПКМ перед испытаниями очищали от посторонних веществ и микроорганизмов для исключения искажений результатов.

После этого опытные образцы подвергались биозаражению.

Варианты биозаражения:

– плесневые грибы
– бактерии
– плесневые грибы+бактерии

В качестве контроля служили образцы ПКМ из той же партии.

При выборе микробных культур руководствовались следующими критериями:

1. Микроорганизмы должны быть стабильными и сохранять свою жизнеспособность в условиях посева и применения в испытаниях на ПКМ.

2. Микроорганизмы должны быть безопасны для людей, животных и ОС [13].

Для биозаражения ПКМ использовали штаммы бактерий рода (р.) *Bacillus* плесневых грибов р. *Aspergillus*. Селектированные культуры не относятся к микроорганизмам 1–4 групп патогенности, что очень важно для безопасного использования микроорганизмов при проведении испытаний.

В работе использованы лабораторный поляризованный микроскоп AxiolabPol, производство фирма «Карл Цейсс» Германия с увеличением до х130000 ед; биологический микроскоп «Biomed-3» с увеличением до х1000 крат; Растровый электронный микроскоп JEOLJSM-7800F с диапазоном увеличений – от х25 до х1000000.

Микробиологические исследования поверхностей образцов ПКМ

Мониторинг микробиологического пейзажа ПКМ, экспонируемых в открытой экосистеме станции низкотемпературных испытаний ИФПТС СО РАН (Якутск, пр. М. Николаева, 20), является ключевым для оценки влияния ОС на физико-химические свойства материалов. Расположение полигона рядом с автотрассой потенциально влияет на микробиологическое разнообразие и состав почвы.

Мониторинг микрофлоры объектов ОС и экспонируемых материалов проведён с 2018 по 2024 гг. через сезонный отбор смывов с поверхностей ПКМ для оценки влияния абиотических факторов на распространение микроорганизмов и потенциальное повреждение материалов. Смывы анализировали на наличие микроорганизмов.

Анализ включал культуральное выращивание для идентификации и количественной оценки микроорганизмов на поверхности материала, а также микроскопию для визуализации их морфологии и структуры. Периодический мониторинг фиксировал динамику частоты высеваемости микроорганизмов.

На рисунке 1 показано изменение микрофлоры на поверхностях ПКМ с 2018 по 2024 гг. С 2018 по 2020 преобладали бактерии, превышавшие плесневые грибы и актинобактерии на 1–2 порядка. С 2021 г. доминирование перешло к плесневым грибам и сохранялось до 2024 г.

Изменения обусловлены факторами среды, включая трансформации загрязнителей почвы и воздуха, а также абиотические параметры (например, влажность). Климатический мониторинг (2021–2023 гг.) фиксирует рост среднегодовых осадков, указывая на связь между климатическими изменениями и динамикой микробного состава ПКМ [14].

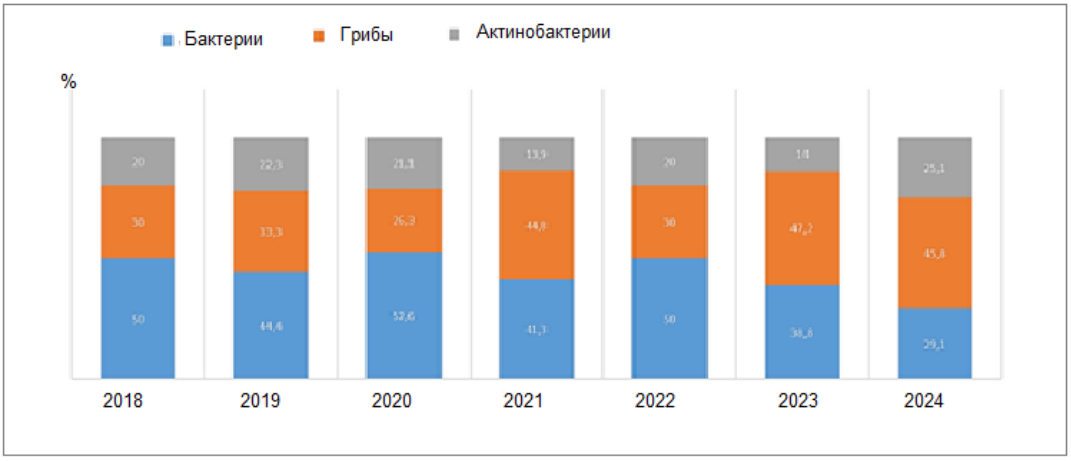


Рис. 1. Динамика изменения микробного пейзажа на поверхностях ПКМ, экспонируемых в условиях открытой экосистемы станции низкотемпературных испытаний ИФПТС СО РАН

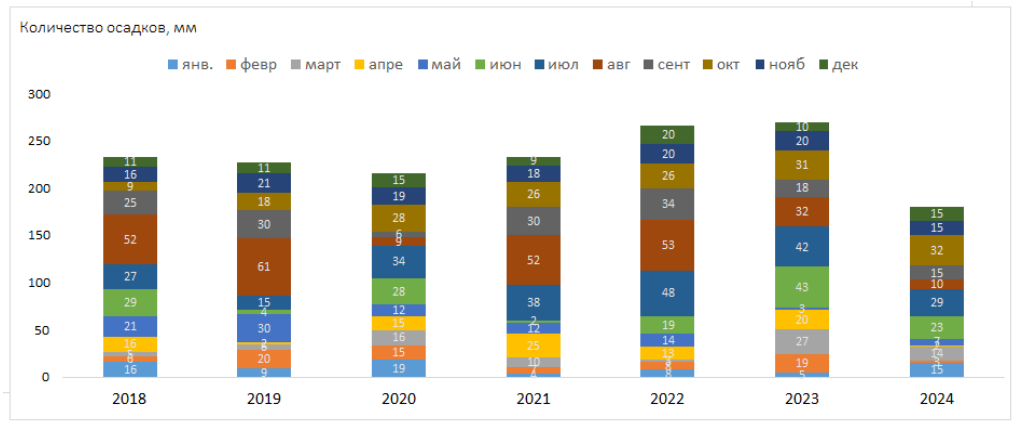
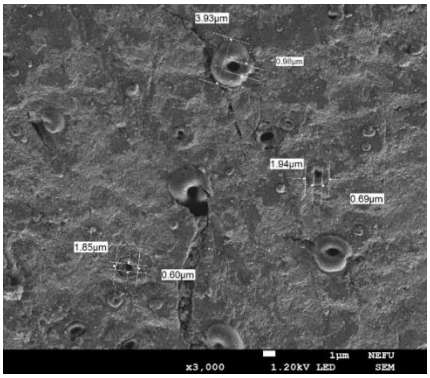


Рис. 2. Годовые суммы выпавших осадков в Якутске за 7 лет

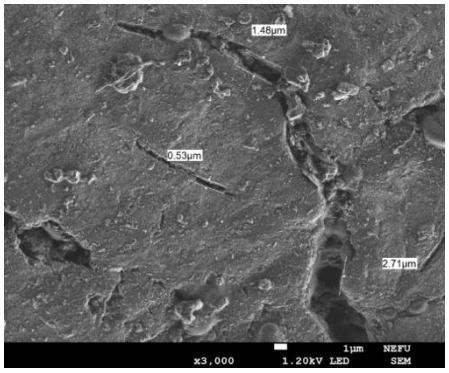
Результаты микробиологического анализа свидетельствуют о том, что некоторые микроорганизмы проявляют повышенную адаптивность и приспособленность к экстремальным климатическим условиям. Они успешно оседают на поверхностях ПКМ и активно метаболизируют в данной среде. Выявлена интересная тенденция, заключающаяся в том, что определенные виды микроорганизмов регулярно обнаруживаются как в окружающей среде, так и в ПКМ на протяжении длительного времени. Год от года выделяются бактерии рода *Bacillus (B. atropheus, B. cereus, B. subtilis, B. vallismortis),* плесневые грибы рода *Aspergillus (A. niger),* а также актинобактерии рода *Streptomyces (S. albus)* и *Nocardia* sp.

При изучении биозаражения ПКМ необходимо учитывать размеры клеток микроорганизмов и трещин материала после климатических испытаний, поскольку они определяют взаимодействие микроорганизмов с ПКМ. Микроскопия показала широкий диапазон размеров клеток: бактерии – 0,5–8,0 мкм, актинобактерии (диаметр гиф) – 0,5–2,0 мкм; плесневые грибы имеют диаметр гиф 2–10 мкм, хламидоспоры – 2–30 мкм, макроконидии – 4–30 мкм.

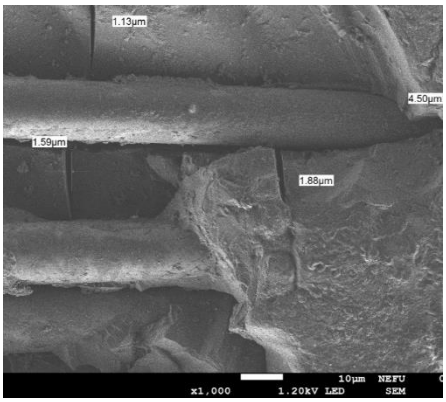
Эти данные подчеркивают важность понимания размеров микроорганизмов для оценки их способности к колонизации и взаимодействию с поверхностями ПКМ, а также для разработки методов борьбы с биозаражением (рис. 3).



а)



б)



в)

Рис. 3. Сравнительные размеры трещин и спор плесневых грибов на ПКМ: а – базальтопластик, б – углепластик, в – стеклопластик

Исследование в Якутске показало, что в почвенной микрофлоре доминируют микроскопические грибы (39,86%). В 2024 году традиционные методы выделили 14 микогенных культур, включая 2 дрожжеподобных, а метагеномное секвенирование – 56 грибковых культур. Однако анализ совпадения генетического материала микроскопических грибов, идентифицированных с помощью классической микробиологии и метагеномики, показал лишь 9% сходства на уровне родовой принадлежности.

Исследования показывают широкий спектр микомицетов в почвенных образцах, подверженных воздействию пониженных температур, что указывает на потенциальные ограничения традиционных методик культивирования в точном отображении всего разнообразия микробиома [15].

Получены новые данные о механизмах биозаражения ПКМ под воздействием микроорганизмов (бактерии: Pseudomonas aeruginosa, Bacillus spp.; грибы: Aspergillus niger, Penicillium spp. и др.) в естественных и контролируемых условиях. В отличие от прежних исследований с визуальной оценкой

[6], в статье представлен метагеномный анализ микроорганизмов из объектов ОС, раскрывающий генетические и таксономические особенности штаммов, проявивших высокую активность в биозаражении ПКМ в камеральных и полевых опытах.

В ходе проводимого исследования была создана система инокуляции полимерных композитных материалов (ПКМ). Эта система играет ключевую роль в углубленном изучении биозаражения и биологического разложения композитов в условиях, максимально приближенных к природным. Она обеспечивает возможность воспроизводства различных экологических сценариев и позволяет в режиме реального времени отслеживать как изменения в микробной экосистеме на поверхности композитов, так и динамику биозаражения. Такой подход значительно улучшает качество и надежность исследовательских данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. FWRS-2024-0058) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. FWRS-2024-0095) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. ГОСТ ИСО 14698-1-2005. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Контроль биозагрязнений. Часть 1. Общие принципы и методы.
2. ГОСТ 17.4.2.01 – 2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с Поправкой).
3. ГОСТ 17.4.2.02. – 2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 N 202-ст).
4. МУК 4.2.3695-21. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. Методические указания» (утв. Роспотребнадзором 02.06.2021).
5. МР 4.2.0220-20. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы санитарно-бактериологического исследования микробной обсемененности объектов внешней среды. Методические рекомендации» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 04.12.2020)
6. ГОСТ Р 57859-2017 «Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов»
7. ГОСТ 9.048-75 «ЕСЗКС. Материалы и изделия. Методы испытаний на микробиологическую стойкость».
8. ГОСТ 9.049-75 «ЕСЗКС. Материалы полимерные. Методы лабораторных испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов
9. ГОСТ 9.051-75 «ЕСЗКС. Компоненты полимерных материалов. Методы лабораторных испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов
10. ГОСТ 9.053-75 «ЕСЗКС. Материалы полимерные. Методы испытаний в природных условиях в атмосфере на микробиологическую устойчивость»
11. ГОСТ Р МЭК 60068-2-10-2009. Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2-10. Испытания. испытание J и руководство. Грибостойкость (IEC 60068-2-10:2005 Environmental testing – Part 2-10: Tests – Test J and guidance: Mould growth (IDT)
12. ASTM G21-15. Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi
13. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. №4 «Об утверждении СанПиН 3.3686-21 «Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней» (СанПиН 3.3686-21)
14. Омелянский В. Л. Краткий курс общей и почвенной микробиологии / В. Л. Омелянский. Москва: Издательство Юрайт, 2025. 173 с.
15. Тепеева А.Н., Марфенина О.Е. Структурное и функциональное разнообразие микобиоты городских почв в условиях пониженных температур // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 5.

УДК 620.18; 579.6
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-316-319

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ БИОЗАЩИТЫ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА

Ерофеевская Л.А.[1], Салтыкова А.Л.[2], Лукачевская И.Г.[2,3], Кычкин А.К.[3], Далбаева Е.А.[1,2], Вит А.А.[1]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН
[3]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: lora-07.65@mail.ru

***Аннотация**. В работе приведены результаты оценки эффективности полимерной композиции для биозащиты материалов на основе базальтового волокна от грибных поражений. Преимуществом предлагаемого способа является то, что он обладает простотой исполнения и экономичностью, поскольку для своего осуществления не требует сложного технологического оборудования и дорогостоящих компонентов, а полученная защитная полимерная композиция, применяемая в способе повышает устойчивость базальтопластиковой арматуры в микологической среде и может быть использована для защиты материалов от биопоражения при контакте с почвой и почвенными микроскопическими грибами.*

***Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, базальтовое волокно, биоповреждения, микроорганизмы, биозащита.*

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF A POLYMER COMPOSITION FOR BIOPROTECTION OF MATERIALS BASED ON BASALT FIBER

Erofeevskaya L.A.[1], Saltykova A.L.[2], Lukachevskaya I.G.[2,3], Kychkin A.K.[3], Dalbayeva E.A.[1,2], Vit A. A.[1]
[1]Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[2]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[3]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

***Abstract.** This work presents the results of an assessment of the effectiveness of a polymer composition for the bioprotection of materials based on basalt fiber against fungal attack. An advantage of the proposed method is its simplicity and cost-effectiveness, since its implementation does not require complex technological equipment or expensive components. The protective polymer composition obtained and used in the method increases the resistance of basalt-fiber reinforced plastic reinforcement in a mycological environment and can be used to protect materials from biological damage when in contact with soil and soilborne microscopic fungi.*

***Keywords:** polymer composite materials, basalt fiber, biological damage, microorganisms, bioprotection.*

Введение. В настоящее время в мире, более 50% общего объема регистрируемых повреждении, связано с деятельностью микроорганизмов [1]. Наиболее часто возбудителями биоповреждений полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются микроскопические грибы из родов *Alternaria, Aspergillus, Chaetomium, Cladosporium, Mucor, Fusarium, Penicillium, Rhizopus, Scopulariopsis, Trichoderma* и др. [2, 3].

При благоприятных условиях (температура, влажность, pH, солевой и минеральный состав среды или субстрата) грибной мицелий способен проникать в микротрещины, накапливать там свою биомассу, в результате чего происходит расширение и разветвление трещин, которые вызывают уже механические повреждения. И далее, в процессе жизнедеятельности микромицеты выделяя продукты метаболизма, вызывают коррозию и разрушение изделий [4].

В этой связи, исследования биозаражения ПКМ должно идти параллельно с изучением влияния факторов окружающей среды на процессы повреждений, вызываемых микроорганизмами. Это необходимо для разработки эффективного применения микробных технологий, направленных на длительную эксплуатацию готовых изделий. Недостаточное исследование влияния различных факторов на микроорганизмы–биодеструкторы полимерных композитов снижают эффективность приемов их защиты от биозаражений и биоповреждений.

Бактерии и вирусы, дрожжи и микромицеты являются самой древней микрофлорой, обитающей на Земле. Сегодня не существует материала, который бы не подвергался микробному заражению. В процессе эволюции их метаболизм адаптировался к различным условиям окружающей среды. Обживая субстраты, они становятся агентами биологических повреждений, вызывая необратимые изменения в структурных и функциональных свойствах различных материалов. Результатом воздействия микроорганизмов является снижение процессов эксплуатации изделий. Такое воздействие и принято называть биоповреждением [5].

Различают три процесса биоповреждений, вызываемых микроорганизмами: механический, ассимиляционный и диссимиляционный [6, 7]. При ассимиляционном и механическом процессах сами материалы являются источником питания для микроорганизмов. При диссимиляционном процессе происходит взаимодействие материалов с продуктами метаболизма микроорганизмов (ферменты, кислоты, соли и др.).

Н.Г. Кац с соавторами охарактеризовали механизм микробиологического повреждения материалов шестью этапами [8, 9]:

1. Перенос микроорганизмов из воздушной, водной сред или из почв на поверхность материала. Этот этап предшествует возникновению биоповреждений.

2. Адсорбция микроорганизмов и загрязнений на поверхностях материалов. Процесс достаточно сложен и определяется следующими факторами: активностью микроорганизма; свойствами, основным из которых является шероховатость поверхности; характером среды, например, наличием кислорода в воздухе, температурным интервалом; относительной влажностью воздуха; увлажнением поверхности и pH водных пленок; условиями контакта между микроорганизмами, загрязнениями и поверхностями материалов.

3. Образование и рост микроколоний до видимых невооруженным глазом. Процесс сопровождается появлением коррозионно-активных метаболических продуктов.

4. Воздействие продуктов метаболизма, образующихся в результате жизнедеятельности колоний микроорганизмов, на материал (кислотное, щелочное, окислительное и ферментативное).

5. Стимулирование сопутствующих биоповреждениям коррозионного разрушения металлов и старения полимеров. Стимулирование электрохимической коррозии происходит в результате появления концентрационных элементов на поверхности материала при накоплении продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, повышающих агрессивность среды. При этом происходят разрушение защитных пассивных пленок на металле и деполяризация катодного и (или) анодного процессов. Стимулирование старения полимеров микроорганизмами происходит в основном в направлении усиления химической деструкции продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, а затем и прямым потреблением ими веществ распада полимерных цепей или некоторых ингридиентов полимеров.

6. Синергизм повреждений, который происходит в результате наложения ряда факторов и взаимного стимулирования процессов разрушения материалов (собственно биоповреждений, старения, коррозии, изнашивания, усталостных явлений), а также развития биоценозов. Это важнейший этап биоповреждения материалов, протекающие во время которого процессы редко учитываются в результатах исследований. Между существующими на поверхности материала микроорганизмами возникают новые связи, в результате которых формируются взаимно функционирующие ассоциации, обеспечивающие выживание и адаптацию отдельных видов. Функциональные взаимосвязи между микроорганизмами могут существенно влиять на процесс повреждения материала. В период жизнедеятельности одни микроорганизмы могут создавать условия для развития других видов.

Цель исследований: разработать и оценить эффективность полимерной композиции для биозащиты материалов ПКМ на основе базальтового волокна.

Материалы для исследований: опытные образцы ПКМ на основе базальтового волокна, в частности базальтопластиковую арматуру (БПА) и полимерную композицию для защиты БПА от грибного поражения [10].

Методы исследований. Пробоподготовку и микробиологические исследования проводили согласно общепринятым в микробиологии методическим рекомендациям и методическим указаниям [11–17].

В работе использован лабораторный поляризованный микроскоп Axiolab Pol, производство фирма «Карл Цейсс» Германия, объектив N-Achromat 5×/0.13 (цветовой код – красный, свободное рабочее расстояние (FOD) – 11,2 мм). Числовая апертура × 1000. Максимальное полезное увеличение микроскопа – 130000.

Результаты и обсуждение. Испытание БПА, после обработки защитной эпоксидно-полимерной композицией, на воздействие плесневыми грибами в почвенной среде проводили в течение шести месяцев в условиях полевого и лабораторного опытов.

После экспонирования опытных образцов было установлено, что эпоксидная полимерная композиция повышает устойчивость БПА к грибному поражению в почвенной среде, о чем свидетельствуют приведенные результаты испытаний (табл.1).

Таблица 1. Результаты определения поражений плесневыми грибами опытных образцов БПА в почвенной среде в условиях полевого и лабораторного опытов

Наименование опытного образца	Повторность опыта	Балл (полевой опыт)	Балл (лабораторный опыт)
Образец № 1 – Стерильные образцы БПА высотой 20 см, обработанные защитной композицией	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
Образец № 2 – Стерильные образцы БПА высотой 0,5 см, диаметром 2 см, обработанные защитной композицией	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
Образец № 3 – Стерильные образцы БПА высотой 20 см, шириной 0,5 см, обработанные защитной композицией	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
Образец № 4 – Стерильные образцы БПА высотой 0,5 см, диаметром 2 см, полученные из БПА, не обработанные защитной композицией	1	1	1
	2	1	1
	3	1	1
Образец № 5 – Стерильные образцы БПА высотой 20 см, не обработанные защитной композицией	1	0	1
	2	0	1
	3	1	1
Образец № 6 – Стерильные образцы БПА высотой 20 см, шириной 0,5 см, не обработанные защитной композицией	1	0	1
	2	0	1
	3	1	1
Образец № 1 – Не стерильные образцы БПА высотой 20 см, обработанные защитной композицией	1	0	0
	2	0	0
	3	0	0
Образец № 2 – Нестерильные образцы БПА высотой 0,5 см, диаметром 2 см, обработанные защитной композицией	1	1	0
	2	0	1
	3	0	0
Образец № 3 – Нестерильные образцы БПА высотой 20 см, шириной 0,5 см, обработанные защитной композицией	1	0	0
	2	0	0
	3	0	1
Образец № 4 – Нестерильные образцы БПА высотой 0,5 см, диаметром 2 см, не обработанные защитной композицией	1	2	2
	2	1	3
	3	1	2
Образец № 5 – Нестерильные образцы БПА высотой 20 см, не обработанные защитной композицией	1	1	1
	2	1	1
	3	1	1
Образец № 6 – Нестерильные образцы БПА высотой 20 см, шириной 0,5 см, не обработанные защитной композицией	1	1	2
	2	1	2
	3	1	2

Таким образом, показано, что предлагаемый способ защиты БПА от грибного поражения позволяет повысить устойчивость к поражению арматуры плесневыми грибами при контакте с почвой.

Преимуществом предлагаемого способа является то, что он обладает простотой исполнения и экономичностью, поскольку для своего осуществления не требует сложного технологического оборудования и дорогостоящих компонентов, а полученная защитная эпоксидно-полимерная композиция повышает устойчивость материала в микологической среде и может быть использована для защиты БПА от грибного поражения.

Исследования выполнены при финансировании Проекта РНФ № 25-69-00009 на 2025-2028 гг. с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Дергунова А.В. Биоповреждения конструкций зданий, сооружений и оценка ущерба от биоповреждений [Текст] / А.В. Дергунова, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: материалы XIV научно-метод. конф. ВИТУ СПб. 2010. С.175-179.
2. Сухревич В.И. Защита от биоповреждений, вызываемых грибами [Текст] / В.И. Сухаревич, И.Л. Кузикова, Н.Г. Медведева // СПб: ЭЛБИ-СПБ. 2009. 207 с.
3. Role of fungi in biodeterioration process of stone in historicbuildings [Text] / M.V/ Grbic, J.B. Vukojevic // Zbornik Matice srpske za prirodne nauke. Proc. Nat. Sci, Matica Sprska Novi Sad. 2009, vol.116, pp.245-2514.
4. Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Кычкин А.А. Инновации и инвестиции. 2019. №6. С. 202-206.
5. Пехташева Е.Л. Биоповреждения и защита непродовольственных товаров: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. А.Н. Неверова. М.: Мастерство, 2002. 219 с.
6. Allsopp D. Introduction to Biodeterioration [Text] / D. Allsopp, S. Seal Kenneth, C. Christine // 2 end edition. Gambridge University Press. 2004. 237 p.
7. Jaykumar S. Studies on the biodeterioration of concrete by marine algae. Shodhganga Repository of Indian Electronic Theses and Dissertations. INFLIBNET Pondicherry University School of Engineering. 2012. URL: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/559 (дата обращения 30.10.2025).
8. Кац Н.Г. Химическое сопративление материалов и защита оборудования нефтегазопереработки от коррозии / Н.Г. Кац, В.П. Стриков, С.Н. Парфенова. М.: Машиностроение, 2011. 436 с.
9. Iverson W.P. Biological corrosion / W.P. Iverson // Adv. Corros. Sci. And Technol, 1972, vol.2, pp. 1-42.
10. Патент № 2757053 C1 Российская Федерация, МПК C09D 5/14, C09D 163/00. Способ защиты базальтопластиковой арматуры от грибного поражения: заявл. 03.07.2020: опубл. 11.10.2021 / Л. А. Ерофеевская, А. К. Кычкин, А. А. Кычкин, М. П. Лебедев. – EDN LREHHR.
11. Градова, Н. Б. Лабораторный практикум по общей микробиологии / Н. Б.Градова, Е. С. Бабусенко, И. Б. Горнова, Н. А. Гусарова. М.: ДеЛи принт, 2001. 131 с.
12. Bergey’s Manual of Systematic Bacteriology Book Review // Int. J. of Syst. Bact. July, 1985. 408 p.
13. Kim, O. S. Introducing EzTaxon-e: a prokaryotic 16S rRNA Gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species / O. S. Kim, , Y. J. Cho, K. Lee, et al. // Int. J. Syst. Evol. Microbiol., 2012, vol.62, pp. 716-721.
14. Ausubel, F. M. Current protocols in Molecular Biology / F. M. Ausubel, R. Brent, R. E. Kingston, et al. N.Y. : John Wiley and Sons, 1994. 68 p.
15. Lane, D. J. 16/23S sequencing / D. J. Lane // Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics / eds. E. Stackebrandt, M. Goodfellow. Chichester: Wiley, 1991, pp. 115-175.
16. Medlin, L. The characterisation of enzymatically amplified eukaryotic 16S-like rRNA coding regions / L. Medlin, H. J. Elwood, S. Stickel, M. L. Sogin // Gene, 1998, vol.71, pp.491-499.
17. ГОСТ Р 57859-2017 «Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов».

УДК 620.18
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-320-323

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ВЛАГИ В ЭПОКСИДНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Копырин М.М.[1], Семенов С.О.[1], Кычкин А.К.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]ИФТПС СО РАН
E-mail: mkopyrin91@gmail.com

Аннотация. *В работе представлены результаты исследования влияния влаги на диэлектрические свойства эпоксидных материалов. Измерения проводились гравиметрическим и диэлькометрическим методами с использованием LCR-метра при 10 кГц. Установлена высокая корреляция между изменением диэлектрической проницаемости и влагосодержанием, что подтверждает применимость метода для количественного контроля влаги in situ. Дополнительно с помощью ИК-спектроскопии выявлены признаки гидролитической модификации и пластификации эпоксидной сети. Диэлькометрический метод показал высокую чувствительность к структурным изменениям и перспективность для диагностики ответственных полимерных элементов в условиях эксплуатации.*

Ключевые слова: *диэлькометрия, эпоксидный полимер, влажность, связанная и свободная вода, ИК-спектроскопия, сорбция*

EXPRESS ASSESSMENT OF MOISTURE IN EPOXY MATERIALS

Kopyrin M.M.[1], Semenov S.O.[1], Kychkin A.K.[2]
[1] Federal Research Center “Yakut Scientific Center”, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
[2] Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This study presents the results of investigating the effect of moisture on the dielectric properties of epoxy materials. Measurements were carried out using gravimetric and dielcometric methods with an LCR meter at 12 kHz. A strong correlation was established between changes in dielectric permittivity and moisture content, confirming the applicability of the method for quantitative in situ moisture monitoring. Additionally, FTIR spectroscopy revealed signs of hydrolytic modification and plasticization of the epoxy network. The dielcometric method demonstrated high sensitivity to structural variations and proved to be a promising tool for diagnosing critical polymer components under operating conditions.*

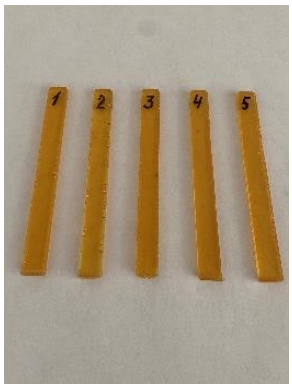
Keyword: *dielectrometry, epoxy polymer, moisture, bound and free water, IR spectroscopy, sorption*

Полимерные материалы и конструкции на их основе рассматриваются как перспективные для использования в ответственных узлах авиационной, судостроительной и автомобильной техники благодаря их высокой удельной прочности и возможности варьирования эксплуатационных характеристик. Однако в процессе эксплуатации данные материалы подвергаются воздействию комплекса внешних факторов, включая колебания влажности и температуры, ультрафиолетовое излучение, а также механические эксплуатационные нагрузки, что в совокупности может приводить к изменению их структуры и деградации функциональных свойств. Среди перечисленных факторов наибольшее влияние на долговечность и эксплуатационную надежность полимерных материалов оказывает влага окружающей среды. Водные молекулы, проникая в полимерную матрицу, инициируют ряд внутренних превращений, таких как пластификация, набухание, последующее доотверждение, а также гидролитическое разрушение полимерных цепей. Совокупность этих процессов приводит к снижению механической прочности, образованию микротрещин и, в конечном счёте, к прогрессирующему разрушению материала [1, 2].

Основным методом определения влагосодержания в полимерных и композиционных материалах является гравиметрический метод, основанный на измерении изменения массы образца [3]. Для контроля влажности в полимерных системах перспективным считается диэлькометрический метод, основанный на регистрации изменений ёмкости и диэлектрических потерь при варьировании влагосодержания. Современные исследования диэлектрической спектроскопии полимеров показывают, что при увлажнении возрастает эффективная поляризуемость материала, что приводит к увеличению его ёмкости и, соответственно, к монотонному росту реальной части диэлектрической проницаемости (ε') при одновременных изменениях её мнимой части (ε'') [4, 5]. Данные электрические характеристики хорошо

коррелируют с гравиметрическими данными водопоглощения. Таким образом, диэлькометрические измерения (ε', ε'') могут применяться как неразрушающий метод количественного определения влагосодержания *in situ* – без перемещения образцов, изменения условий экспонирования и использования высокоточных весов, что делает данный подход практически эффективным для мониторинга состояния ответственных полимерных элементов.

В работе исследован отверждённый многокомпонентный эпоксидный полимерный материал следующего состава: эпоксидная смола DY-128 – 56,7 % (аналог ЭД-20), отвердитель Изо-МТГФА – 42,5 % и ускоритель УП-606 – 0,8 %. Смешение, дегазация и отверждение проводились в соответствии с техническим регламентом и требованиям. Количество образцов в серии составило 5 штук, толщина образцов – 3,7 мм. Испытания выполнялись для образцов, кондиционированных в нормальных комнатных условиях, после сушки и после сорбции влаги. Изменение влагосодержания определялось гравиметрическим методом и параллельно регистрировалось с использованием LCR-метра при 10 кГц – измерительного прибора, предназначенного для определения основных параметров электронных компонентов: индуктивности (L), ёмкости (C) и сопротивления (R), а также связанных характеристик, таких как тангенс угла диэлектрических потерь. С учётом температурной чувствительности диэлектрических параметров все измерения проводились при одинаковых условиях после стабилизации температуры образцов на уровне комнатной. Для анализа структурных изменений в материале дополнительно применялся метод ИК-спектроскопии. На рисунке 1 представлены образцы для исследования и съем диэлектрических показателей.



а)

б)

Рис. 1. Образцы отвержденных эпоксидных образцов и съем диэлектрических показателей LCR-метром

Действительная (ε') и мнимая (ε'') части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) рассчитывались по формулам:

$$\varepsilon' = \frac{C*d}{\varepsilon_0*A},$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' * \delta,$$

где d – расстояние между электродами, A – площадь электродов, ε_0 – электрическая постоянная, δ – тангенс угла потерь, по модели идеального плоского конденсатора. В таблице 1 представлены усредненные значения изменения массы образцов, при этом масса образцов при комнатном кондиционировании берется как начальная (100 %).

Таблица 1. Изменения массы образцов по массе согласно условиям

Условие	Сушка	Сорбция
Ср. изменение массы, %	-0,21 %	+0,69 %

Сушка образцов проводилась при температуре 50–60 °C до достижения стабильной массы. Влагонасыщение осуществлялось в эксикаторе при 60 °C и относительной влажности RH = 95–100 %. На рисунке 2 приведена кривая сорбции влаги на примере образца № 1, сопоставленная с теоретической зависимостью, описываемой моделью диффузии Фика. Аппроксимация экспериментальных данных выполнена по упрощённой формуле для условно бесконечной пластины толщиной d:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{4}{d}\left(\frac{Dt}{\pi}\right)^{1/2}$$

где M_t – масса влаги, поглощённая к моменту времени t, M_∞ – масса при насыщении, D – коэффициент диффузии влаги, мм²/сут.

где M_t – масса влаги, поглощённая к моменту времени t, M_∞ – масса при насыщении, D – коэффициент диффузии влаги, мм²/сут.

Как видно, диффузия влага довольно линейна и соответствует механизму фикианской диффузии. Коэффициент сорбции влаги составила для образца № 1 – 4,16 мм²/сут, в среднем по серии – 4,11 мм²/сут. Адекватность аппроксимации оценивалась по коэффициенту детерминации (R^2) и составил 0,989 в среднем по серии образцов. Средний прирост массы для всех высушенных образцов после сорбции составил 0.9 масс.%.

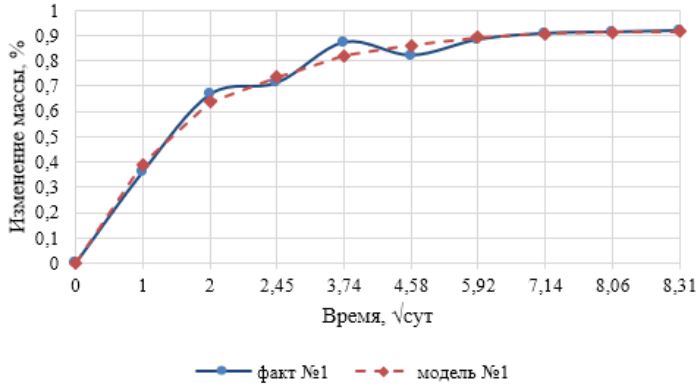


Рис. 2. Кривая сорбция влаги на примере образца № 1

В таблице 2 представлены усредненные по серии значения КДП.

Таблица 2. Показатели действительная (ε') и мнимой (ε'') проницаемости

Показатель/Условие	Комнатное	Сушка	Сорбция влаги
ε'	4,85	4,70	4,88
ε''	0,0608	0,0734	0,0457

Используя измеренные значения ε', объёмная доля воды определялась по уравнению Брашера–Кингсбери [6], обычно применяемому к тонким покрытиям/полимерным плёнкам (где ε'_{H_2O} ~ 80 при комнатной температуре) с поправкой на использование натурального логарифма:

$$\upsilon_{H_2O} = \frac{\ln \varepsilon'_{\text{влаж}} - \ln \varepsilon'_{\text{сух}}}{\ln \varepsilon'_{H_2O}} * 100\%. \quad (1)$$

Из уравнения (1) объёмная доля воды составила υ = 0,86 об.%. Принимая во внимание, что плотность воды при 20–25 °C условно равна 1,00 г/см³, её массовая доля также составляет 0,86 масс.%, что хорошо согласуется с гравиметрическими данными. Согласно литературным источникам, увеличение влагосодержания на 1 масс.% приводит к росту диэлектрической проницаемости на 5–10% [7].

Помимо высокой достоверности количественного определения влаги, выраженный через уравнение Брашера-Кингсбери, диэлькометрический метод позволяет проследить внутренние структурные изменения материала, через мнимую часть диэлектрической проницаемости (ε″). При переходе от исходного состояния к высушенному наблюдается её увеличение (ε″ ≈ 0,0608 → 0,0734), что типично для дегидратированных эпоксидных систем и связано с усилением низкочастотных потерь вследствие вкладов квазистационарной проводимости и межфазной поляризации, возникающих на микропорах и сухих границах фаз. При переходе от высушенного к увлажнённому состоянию ε″ снижается для всех образцов, что на частоте 10 кГц свидетельствует о снижении вклада низкочастотных потерь. Это может быть обусловлено заполнением микрополостей влагой, выравниванием межфазного контраста и перераспределением воды в связанную форму [4]. На рисунке 3 представлены ИК-спектры образцов, кондиционированных при комнатных условиях (сорбировавших атмосферную влагу) и после влагонасыщения.

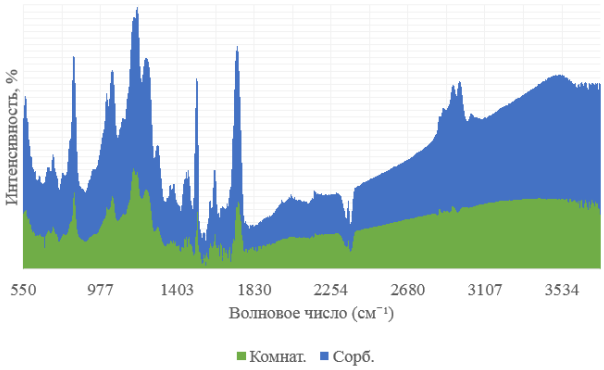


Рис. 3. ИК спектры образцов, стабилизированных при комнатных условиях (зеленая) и после сорбции влаги (синяя)

В обоих случаях наблюдаются характерные полосы для эпоксидных полимеров: 915 см$^{-1}$ (оксирановое кольцо), 830 см$^{-1}$ (п-замещённое ароматическое кольцо), 1508 и ~1600 см$^{-1}$ (ароматическое C=C), интенсивные C–O/C–O–C в 1240–1100 см$^{-1}$. После сорбции влаги фиксируется рост широкого OH-континуума 3600–3200 см$^{-1}$ и усиление карбонильной полосы ~1730 см$^{-1}$ при одновременном снижении относительного вклада зоны C–O (≈1160 см$^{-1}$) и более умеренном уменьшении ~1240 см$^{-1}$. Полоса 915 см$^{-1}$ сохраняется в обоих спектрах, что указывает на присутствие остаточной эпоксидности. Совокупность изменений (↑ν(OH), ↑ν(C=O), ↓C–O/C–O–C) согласуется с гидролитической модификацией эпоксидной сети и её пластификацией при увлажнении: вода, преимущественно в «связанной» форме, одновременно повышает подвижность сегментов и служит реагентом, приводящим к частичному расщеплению эфирных связей с образованием карбонильных фрагментов [8–10].

Проведённые исследования показали, что диэлькометрический метод может эффективно применяться для неразрушающего определения влагосодержания и оценки состояния влаги в эпоксидных материалах. Установлено, что результаты измерений действительной части диэлектрической проницаемости (ε′) хорошо коррелируют с гравиметрическими данными, что подтверждает достоверность метода. Анализ мнимой части (ε″) показал характерные изменения при сушке и увлажнении, отражающие влияние и состояние влаги на поляризационные и проводящие процессы в материале. Совокупность диэлькометрических и ИК-спектральных данных свидетельствует о гидролитической модификации и пластификации эпоксидной сети под действием влаги, что подтверждает физико-химическую чувствительность метода к микроструктурным изменениям.

Список литературы

1. Zhang X., Yin Z., Xiang S., Yan H., Tian H. Degradation of polymer materials in the environment and its impact on the health of experimental animals: a review // Polymers. 2024. vol.16, no.19, pp.2807. DOI: 10.3390/polym16192807
2. Нармания Б. Е., Низин Д. Р., Низина Т. А. и др. Влияние влажностного состояния на из-менение свойств полимерных материалов // Огарёв-Online. 2023. № 7 (192).
3. Васильева Е. Д., Васильева А. А., Кычкин А. К. К вопросу о методах исследования воздействия влаги на полимерные композиционные материалы // Материаловедение. Энергетика. 2022. Т. 28, № 1. С. 21–31. DOI: 10.18721/JEST.28102
4. Dodd S. J., Chalashkanov N. M., Dissado L. A., Fothergill J. Influence of absorbed moisture on the dielectric properties of epoxy resins // Annual Report – Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2010, pp.1–4. DOI: 10.1109/CEIDP.2010.5723953
5. Das P. P., Vadlamudi V., Raihan R. Dielectric state variables as qualitative indicators of moisture absorption-caused mechanical property degradation in GFRP composite structures // Composites Part C: Open Access. 2022, 9(290):100295. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100295
6. Vosgien Lacombre C., Bouvet G., Trinh D., Mallarino S., Touzain S. Water uptake in free films and coatings using the Brasher and Kingsbury equation: a possible explanation of the different values obtained by electrochemical impedance spectroscopy and gravimetry // Electrochimica Acta. 2017, vol.231, pp.162–170. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.02.051
7. Ma L., Sood B., Pecht M. Effects of moisture content on dielectric constant and dissipation factor of printed circuit board materials // ECS Transactions. 2010, vol. 27, no.1, pp.1–12. DOI: 10.1149/1.3360624
8. González González M., Cabanelas J. C., Baselga J. Applications of FTIR on epoxy resins – identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake // Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology / ed. by Theophile Theophanides. – London: IntechOpen, 2012, pp.261–284. DOI: 10.5772/36323
9. Ma J., Yang Y., Wang Q., Deng Y., Yap M., Chern W. K., Oh J. T., Chen Z. Degradation and lifetime prediction of epoxy composite insulation materials under high relative humidity // Polymers. 2023. vol.15, no.12, p.2666. DOI: 10.3390/polym15122666
10. Smith B. C. The infrared spectra of polymers V: epoxies // Spectroscopy. 2022, vol.37, no.3, pp.17–19. DOI: 10.56530/spectroscopy.mg2473z4

УДК 678
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-324-326

АНАЛИЗ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЭЛАСТОМЕРОВ

Марков А.Е.[1], Дьяконов А.А.[2], Копырин М.М.[1], Кычкин А.К.[1, 3], Туисов А.Г.[1], Охлопкова А.А.[2]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Северо-Восточный Федеральный Университет
[3]Институт Физико-Технических Проблем Севера СО РАН
E-mail: aital.markov@gmail.com

Аннотация. *В данной статье приводятся результаты исследования адгезионной прочности между эластомерной матрицей и армирующими базальто-, стекло-, углетканями. Сочетание свойств этих материалов позволяет получить композиты с новыми физико-механическими характеристиками, что может расширить ассортимент изделий. Рассматривалось два метода повышения адгезионной прочности между армирующими наполнителем и эластомером. Первый способ заключается в обработке растворенной резиновой смесью поверхности базальто-, стекло- и углетканей для лучшего контакта со слоями резины. Второй способ заключался в нанесении праймера и адгезива Хемосил предназначенный для приклеивания резины к металлу. В ходе испытания на расслоение повышение адгезионной прочности в сравнении наблюдалось у образца с поверхностной обработкой Хемосил.*

Ключевые слова: *базальтоволокно, стекловолокно, углеволокно, эластомер, адгезия*

ANALYSIS OF THE ADHESIVE STRENGTH OF HIGH-MODULUS COMPOSITE ELASTOMERS

Markov A.E[1]., Dyakonov A.A.[2], Kopyrin M.M.[1], Kychkin A.K.[1,3], Tuisov A.G.[1], Okhlopkova A.A.[2]
[1]Federal Research Center YSC SB RAS
[2]North-Eastern Federal University
[3]Institute of Physical Technical Problems of the North SB RAS

Abstract. *This paper investigates the adhesive strength of elastomeric matrix materials and reinforcing fabrics. The production of materials based on two incompatible components to obtain a composite and, in turn, improve its physical and mechanical properties, is a pressing issue. The effect of surface treatment on high-modulus fabrics and rubbers based on butadiene rubber SKD-B was studied. Two methods were used to increase adhesive strength. The first method involved treating the surface of basalt, glass, and carbon fabrics with a rubber mixture to improve contact with the rubber layers. The second method involved applying a primer and Chemocil adhesive, which is used to bond rubber to metal. During the delamination test, an increase in adhesive strength compared to the original rubber was observed in the sample with Chemocil surface treatment.*

Keyword: *basalt fiber, glass fiber, carbon fiber, elastomer, adhesion*

Эластомерные материалы применяются при изготовлении широкого спектра изделий, имеющее первостепенное значение для техники и повседневной жизни. К числу основных типов относятся: различные виды шин, передаточные элементы для перемещения различных материалов, гибкие тяговые связи передач, устройства безопасности в авто- и авиатранспорте, строительные конструкции, средства защиты человека. Работоспособность резинотехнических изделий при циклическом деформационном воздействии зависит прежде всего от сохранения прочного адгезионного соединения армирующих тканей с резиной [1, 2]. Одними из наиболее распространённых высокомодульных тканей являются материалы на основе базальто-, стекло- и углеволокон, которые обладают высокими физико-механическими характеристиками [3].

Целью исследования является повышение адгезионного взаимодействия бутадиеновой эластомерной матрицы с высокомодульными базальто-, стекло- и углетканями.

Объектами исследования являются эластомерные материалы, армированные высокомодульными тканями. В качестве эластомерной матрицы использовали резиновую смесь на основе морозостойкого бутадиенового каучука [4–6] марки СКД-В (Сибур, Россия) (ТУ 38.403750-2001). В виде армирующего слоя использовались: базальтовая ткань (БТ) марки БТ-11 (100) (Фабрика технических тканей, Россия) (ТУ 23.99.19.012-12334516-2017), стеклоткань (СТ) марки ТР-560-30А (100) (Полоцк

Стекловолокно, Беларусь) (ТУ 6-48-00205009-97-96), углеткань (УТ) марки 2/2-1000-12К-400 (Препрег-СКМ, Россия) (ТУ 1916-038-38276489-2016).

Исследовалось два способа повышения адгезионной прочности соединения между армирующими тканями и эластомером. Для первого способа использовалась растворенная в толуоле резиновая смесь (РС), которая наносилась на поверхность армирующих тканей. Второй способ поверхностной обработки основан на нанесении слоев праймера Хемосил 211 и адгезива Хемосил 411. Как известно, праймер и адгезив на основе Хемосила применяется для склеивания полярных материалов или металлов с резиной [7]. После обработки из вышеуказанных способов, ткани подвергали сушке в течение 15 минут при 45 °С в термошкафу. Исследуемые образцы изготавливались методом послойной укладки: резиновая смесь – армирующий слой ткани – резиновая смесь. Вулканизация производилась в гидравлическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Иваново, Россия) в течение 20 мин при 155 °С.

Определение прочности связи между слоями при расслоении проведено согласно стандарту ISO 36-2017. Сущность метода заключается в расслоении образца и определения силы, необходимой для отделения слоя резины от армирующих волокон. Исследование проведено с помощью устройства для отслаивания клеевых соединений на испытательной машине «Autograph-AGS J» (Shimadzu, Tokyo, Япония), позволяющего сохранять направление приложенной нагрузки перпендикулярно к твердой полимерной подложке. Исследование проведено при комнатной температуре и скорости перемещения захватов 50 мм/мин. Количество исследованных образцов для каждой серии составляло не менее 3 шт. Образцы имели прямоугольную форму шириной 25 мм, толщиной 12 мм и длиной не менее 100 мм.

Исследование надмолекулярной структуры образцов проводили при помощи растрового электронного микроскопа JSM-7800F (JEOL, Akishima, Japan) в режиме вторичных электронов. Подготовка образцов, исследуемых в объеме, проводили путем получения хрупких сколов в среде жидкого азота.

На рисунке 1 представлена диаграмма адгезионной прочности в зависимости от поверхностной обработки армирующих тканей и их типа.

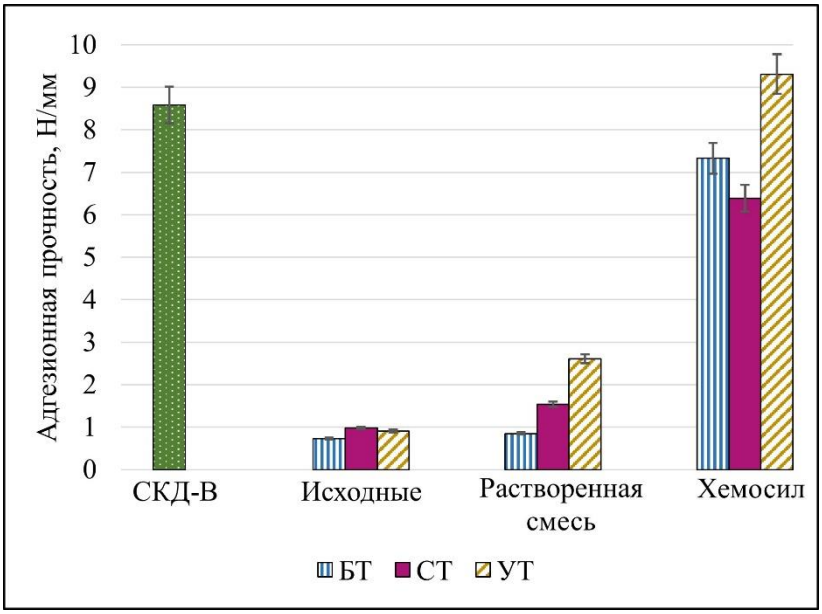


Рис. 1. Диаграмма расслоения эластомеров на основе эластомера СКД-В, СКД-В БТ, СКД-В СТ, СКД-В УТ с растворенной смесью и Хемосил

В результате расслоения исходных образцов наблюдается низкие показатели адгезионной прочности. Поверхностная обработка тканей РС приводит к росту прочности сцепления: для стеклоткани с 0,98 до 1,54 Н/мм, для углеткани с 0,91 до 2,61 Н/мм по сравнению с исходными образцами. Обработка высокомодульных тканей Хемосилом 211/411 повысили прочность соединения до 15 раз по сравнению с армированными образцами без поверхностной обработки. Это предположительно объясняется образованиями новых связей между материалами.

На рисунке 2 представлены микрофотографии армированных образцов после испытания на расслоение, исследуемая область была со стороны эластомера.

На данных микрофотографиях показаны исходные образцы, армированные базальто-, стекло- и углетканью (рис. 2, а-в). Наблюдаемые волокна на поверхности образцов свидетельствуют о плохом

адгезионном контакте с эластомером. После обработки тканей растворенной смесью (рис. 2, г-е), количество остаточных волокон на поверхности резины уменьшилось. Также видны четкие следы растворенной резиновой смеси от волокон. На рис. 2, ё-з, после применение Хемосила наблюдаются разрушение по резине, что свидетельствует о повышении адгезии на границе резина-волокно. Это объясняется тем, что во время поверхностной обработки праймер 211 и адгезив 411 проникают в пространство между волокнами, которые в процессе вулканизации сшиваются с образованием прочного соединения. Наибольшую прочность при испытании на расслоение показал образец СКД-В УТ/Хемосил. На поверхности образца (рис. 2, з) не наблюдаются следы отрыва и сами углеволокна, вследствие когезионного разрушения эластомера во время испытания.

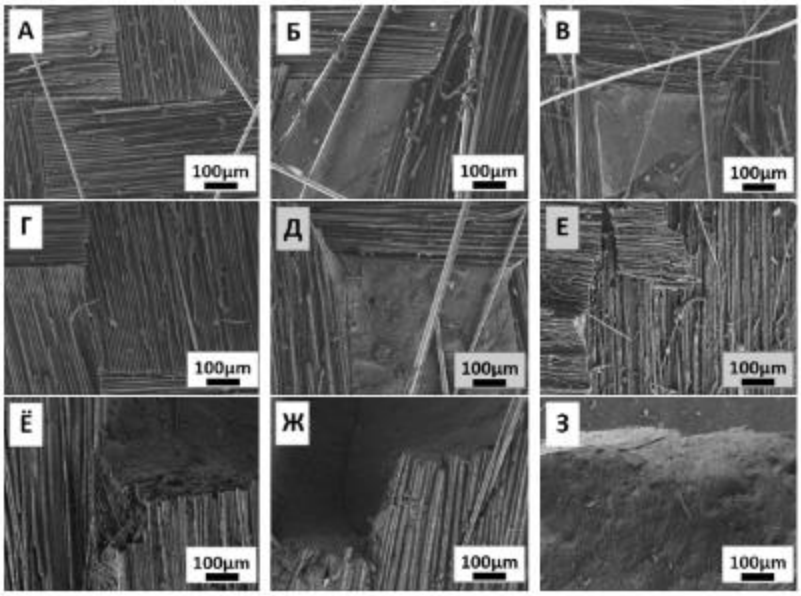


Рис. 2. Микрофотографии образцов после испытания на расслоение: а) СКД-В БТ; б) СКД-В СТ; в) СКД-В УТ; г) СКД-В БТ/РС.; д) СКД-В СТ/РС.; е) СКД-В УТ/РС; ё) СКД-В БТ/Хемосил; ж) СКД-В СТ/Хемосил; з) СКД-В УТ/Хемосил

По результатам работы можно сделать вывод о том, что поверхностная обработка клеевой смесью Хемосил 211/411 образовывает прочное адгезионное соединение между резиной и высокомодульными тканями. Увеличение показателей адгезионной прочности в сравнении с образцами без поверхностной обработки составило 9-15 раз.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНиВО FWRS-2025-0027 и FSRG-2023-0026.

Список литературы

1. Туребекова Г. З., Сагитова Г. Ф., Алпамысова Г. Б., Жаппарбергенова Э. Б., Абилхаймкызы Л., Сихимбаева М. Т. Способ повышения прочности связи резин с текстильными кордами из синтетических волокон// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. №5 (389). С.26-33.
2. Хачатуров А. А. Фионов А. С., Колесов В. В., Потапов Е. Э., Ильин Е. М. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука и магнетита // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2019. Т.11. № 2. С.189-198.
3. Пантелеева Н. Л. Панченко О. П. Влияние коротких обрезиненных кордных волокон на свойства резин // Ползуновский вестник. 2015. №4-2. С.85-89.
4. Timofeeva E.N., Petrova N.N., Nikolaeva K.N., Kuzmina E.S. (2019) The Research of the Effect of Single-Walled Carbon Nanotubes on the Properties of Epichlorohydrin Rubber. *Materials Science Forum*, vol.945, pp.428–432. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.428.
5. Petrova N.N., Lee J., Portnyagina V.V., Jeong D.-Y., Cho J.-H. (2015) Antiswelling and Frost-resistant Properties of a Zeolite-modified Rubber Mechanical Seal at Low Temperature. *Bull. Korean Chem. Soc.*, pp.464–467. DOI: 10.1002/bkcs.10075.
6. Davydova M.L., Sokolova M.D., Haldeeva A.R., Djakonov A.A. (2015) Modification of sealing rubber based on nitrile butadiene rubber by thermoexpanded graphite. *Journal of Friction and Wear*, vol.36, pp.23–28.
7. Crowther B. (2003) *Handbook of Rubber Bonding*. Shrewsbury: Rapra Technology Ltd, pp.163-195

УДК 53.093:620.193:67.017
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-327-331

СТАРЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКА ВПС-53/Т-25 В НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Нечаев А.А., Старцев В.О., Павлов М.Р.
Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов «Национального исследовательского центра «Курчатовский институт «Государственный научный центр Российской Федерации (г. Москва, Россия)
E-mail: nechaev33_3@mail.ru

Аннотация. *В работе проведены сравнительные испытания на стойкость стеклопластика ВПС-53/Т-25 к старению при экспозиции в натурных условиях умеренного теплого и умеренного климата в течение 12 месяцев и имитационных воздействий двумя режимами лабораторных ускоренных испытаний по показателям механической прочности, влагопереноса.*

Ключевые слова: *стеклопластик, климатическое старение, натурная экспозиция, ускоренные испытания, прочность, коэффициент диффузии влаги, сорбция*

AGING OF GLASS-FIBER REINFORCED PLASTIC VPS-53/T-25 IN NATURAL AND LABORATORY CLIMATIC CONDITIONS

Nechaev A.A., Starcev V.O., Pavlov M.R.
Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Institute of Aviation Materials» of the National Research Center «Kurchatov Institute,» State Scientific Center of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Abstract*. This paper presents comparative tests on the aging resistance of glass-fiber reinforced plastic VPS-53/T-25 under exposure to natural conditions in moderate warm and moderate climates for 12 months, as well as simulated impacts under two accelerated laboratory testing regimes. The tests were conducted to assess mechanical strength and moisture transfer properties.*

Keywords: *glass-fiber reinforced plastic, climatic aging, natural exposure, accelerated testing, strength, moisture diffusion coefficient, sorption*

Введение. Эксплуатация полимерных композиционных материалов (ПКМ) в реальных климатических условиях сопряжена с сорбцией атмосферной и дождевой влаги, что приводит к снижению механических характеристик, включая предел прочности при растяжении (σ_t), сжатии (σ_c) и изгибе (σ_b). Ухудшение свойств обусловлено явлением гидролитической пластификации полимерной матрицы, степень которой определяется объемом абсорбированной влаги, гидрофильностью связующего и морфологией поверхности материала. Особенно активно процесс пластификации распростараняется от кромки образца, что необходимо учитывать при испытаниях [1–4].

Для прогнозирования долговечности и определения остаточного ресурса ПКМ необходимо различать обратимые и необратимые изменения прочностных характеристик. Исследование [5] показало, что при старении ПКМ необходимо следить за количеством поглощенной влаги и измерять механические характеристики в двух состояниях: сразу после завершения испытаний без кондиционирования («мгновенное» состояние) и после высушивания образцов.

Ключевую роль в оценке кинетики и механизма старения играет исследование влагопереноса [6]. Определение коэффициента диффузии влаги позволяет количественно охарактеризовать скорость проникновения влаги в материал и выявить структурные изменения, такие как развитие микротрещин и деградация полимерной матрицы.

Комплексное изучение изменения необратимой прочности материала и кинетики влагопереноса, позволяет установить критический уровень повреждения материала и разработать модели прогнозирования срока службы ПКМ в условиях климатического старения.

Материалы и методы. Для исследований был выбран стеклопластик ВПС-53/Т-25 на основе стеклянной ткани Т-25(ВМП) и связующего ВСЭ-34 [9, 10].

Плиты стеклопластика экспонировались на открытых стендах в условиях умеренно теплого климата с мягкой зимой Геленджикского центра климатических испытаний ВИАМ (ГЦКИ) и умеренного климата Московского центра климатических испытаний ВИАМ (МЦКИ).

Имитационные лабораторные испытания были проведены по двум режимам.

Режим УКИ 1 – 1 год ускоренных климатических испытаний, имитирующих пребывание на открытом воздухе в условиях умеренного климата, выполняют путем проведения одного за другим следующих воздействий:

1) Повышенная температура 40 °С и влажность воздуха 93%, в течение 19 суток (ГОСТ Р 51369-99 метод 207-2 [11]);

2) Отрицательная температура по ГОСТ 9.707-81 [12], метод 2, п. 2.5.3. (при –41 °С согласно ГОСТ 16350-80 [13]) в течение 6 часов.

3) Перепады температуры с переходом через 0 °С по ГОСТ 9.707-81, метод 2, п. 2.5.4.7. [12] (56 часовых циклов с изменением температуры в диапазоне от минус 15 °С до плюс 25 °С, что согласно ГОСТ 16350-80 [13] соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение).

4) Солнечное излучение в течение 58 суток при интегральной плотности потока излучения 1120 Вт/м^2 и плотности потока излучения 65 Вт/м^2 в интервале длин волн 300-400 нм, до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5 612 МДж/м^2 в соответствии с ГОСТ Р 51370-99 [14].

Режим УКИ 2 – 1 год ускоренных климатических испытаний, имитирующих пребывание на открытом воздухе в условиях умеренного климата, выполняют путем проведения одного за другим следующих воздействий:

1) Солнечное излучение, в непрерывном режиме совмещенное с воздействием повышенной влажности воздуха. Испытания проводят в течение 47 суток при интегральной плотности потока излучения 1400 Вт/м^2 и плотности потока излучения 80 Вт/м^2 в интервале длин волн 300-400 нм, до достижения дозы суммарного солнечного излучения 5 612 МДж/м^2.

В течение первых 14 суток от начала воздействия поддерживают температуру воздуха 45 °С без контроля относительной влажности, затем в течение 9,5 суток поддерживают температуру воздуха 40 °С и относительную влажность воздуха 93 %, затем в течение 14 суток поддерживают температуру воздуха 45 °С без контроля относительной влажности, затем в течение 9,5 суток до конца воздействия поддерживают температуру воздуха 40 °С при относительной влажности воздуха 93 %.

2) Отрицательная температура по ГОСТ 9.707-81 [12], метод 2, п. 2.5.3. (при –41°С согласно ГОСТ 16350-80 [13]) в течение 6 часов.

3) Перепады температуры с переходом через 0 °С по ГОСТ 9.707-81, метод 2, п. 2.5.4.7. [12] (56 часовых циклов –15 °С до 25 °С согласно ГОСТ 16350-80 [13] соответствует максимальному количеству дней в году с переходом температуры через нулевое значение).

После экспозиции были проведены испытания на определение предела прочности при изгибе σ_b по ГОСТ Р 56805. Использовали исходные и экспонированные образцы, без дополнительного кондиционирования, а также образцы, высушенные при 60ºС до равновесного состояния.

Предварительно высушенные образцы размером 50х50х2 мм были использованы для исследования влагопереноса при температуре 60ºС и влажности 98±2% до достижения равновесного состояния массы.

Результаты и обсуждение. В работе рассмотрены результаты сравнительных климатических испытаний. В таблице 1 показано влияние режимов и продолжительности старения на предел прочности при изгибе сразу после снятия с экспозиции (без сушки) и после сушки при температуре 60ºС и относительной влажности менее 5 % до стабилизации массы образцов.

Таблица 1. Влияние режимов и продолжительности старения на предел прочности при изгибе стеклопластика ВПС-53/Т-25

Состояние	Время старения, мес.	Без сушки		После сушки		$\sigma_{b\ без\ сушки}$ / $\sigma_{b\ после\ сушки}$
		σ_b, МПа	$k=\sigma_b/\sigma_{b0}$	σ_b, МПа	$k=\sigma_b/\sigma_{b0}$	
Исходные	0	1322±21	1,00	1350±21	1,00	0,98
Старение в ГЦКИ	3	1220±66	0,92	1293±38	0,96	0,94
	6	1183±20	0,90	1253±30	0,93	0,94
	9	1160±47	0,87	1172±26	0,87	0,99
	12	1128±38	0,85	1145±40	0,85	0,96
Старение в МЦКИ	3	1193±35	0,90	1327±27	0,98	0,90
	6	1150±61	0,87	1330±35	0,99	0,87
	9	1177±24	0,90	1312±48	0,97	0,90
	12	1242±62	0,93	1287±35	0,95	0,97
	6	1155±100	0,87	1250±26	0,93	0,92

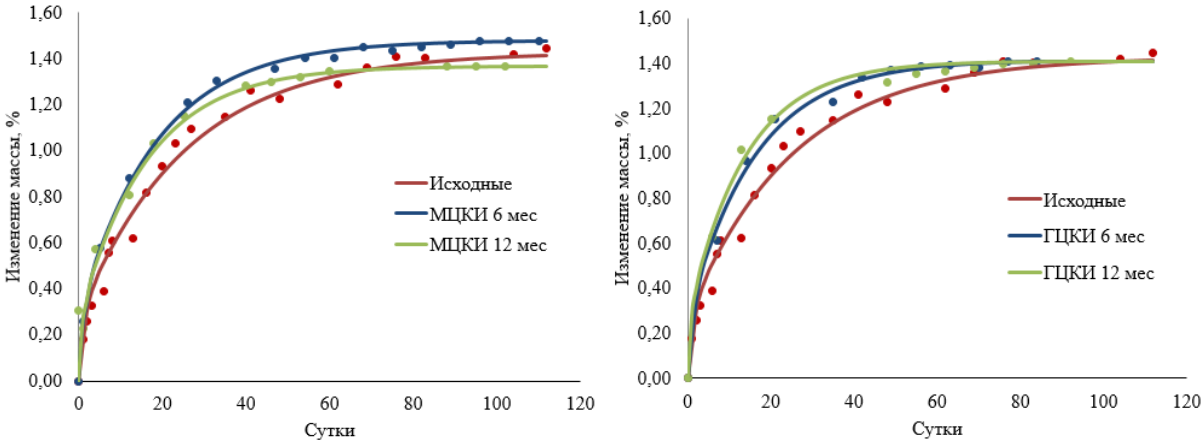
Старение по режиму УКИ 1	12	1257±42	0,95	1255±62	0,93	1,00
	18	1205±28	0,94	1245±38	0,92	1,00
	24	1053±76	0,79	1255±33	0,93	0,84
Старение по режиму УКИ 2	6	1158±38	0,88	1195±9	0,89	0,97
	12	1118±35	0,85	1160±74	0,86	0,96
	18	1186±44	0,90	1213±27	0,90	0,98
	24	1108±15	0,84	1222±64	0,91	0,91

После 12 месяцев натурных климатических испытаний в ГЦКИ и МЦКИ наблюдается необратимое уменьшение предела прочности при изгибе. Экспонирование в ГЦКИ демонстрирует снижение прочности на 15,1%, в то время как в МЦКИ необратимое снижение прочности составило 4,7%. Данный результат говорит об общей закономерности [15], согласно которой умеренно теплый климат с мягкой зимой по отношению к ПКМ более агрессивен, чем умеренный. Снижение k=0.93 после 12 месяцев экспонирования в МЦКИ вызвано пластифицирующим действием сорбированной влаги, которое перестает действовать после сушки.

Сравнение результатов после воздействия по режимам УКИ 1 и УКИ 2 по показателю k показывает их неэквивалентность (0,93 и 0,86, соответственно). Это позволяет предположить, что УФ облучение в сочетании с термовлажностным воздействием и температурными перепадами оказывает более активное воздействие на свойства материала при имитации 12 месяцев старения. Однако, после имитации 24 месяцев УКИ 1 и УКИ 2 оказывает одинаковое воздействие, в результате которого необратимое изменение составило 7–9%.

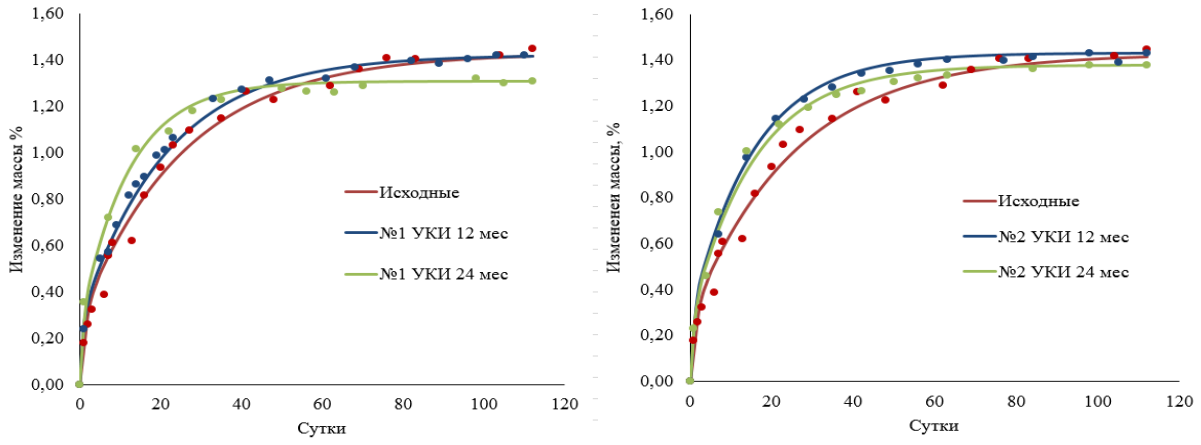
Сопоставление режимов УКИ 1 и УКИ 2 и натурных климатических испытаний в ГЦКИ и МЦКИ по показателю k показывает, что режим УКИ 1 в большей мере соответствует старению в условиях умеренного климата, а режим УКИ 2 соответствует натурному климатическому старению в условиях умеренного теплого климата с мягкой зимой.

На рисунках 3 и 4 представлен влагоперенос образцов стеклопластика ВПС-53/Т-25 в исходном состоянии и после натурного старения в ГЦКИ и МЦКИ в течение 12 месяцев и по ускоренным режимам УКИ 1 и УКИ 2 в течение 24 месяцев



а) б)

Рис. 3. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после натурной экспозиции в Геленджике (а) и Москве (б) в течение 12 месяцев; точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация моделью Фика



а) б)

Рис. 4. Сравнение кинетики влагопереноса в стеклопластике в исходном состоянии и после ускоренных испытаний по УКИ 1(а) и УКИ 2 (б) в течение 24 месяцев; точки – экспериментальные значения, линии – аппроксимация моделью Фика

С помощью вычислений [16-18] были определены значения коэффициента диффузии влаги D и предельного влагосодержания $w_{max}=[m_{max}-m_0/m_0] \times 100\%$, где m_0 – масса предварительно высушенного образца, m_{max} – масса образца с максимальным содержанием влаги. Результаты вычислений после всех видов экспозиций приведены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние режимов и продолжительности старения на показатели модели Фика

Состояние	Время старения, мес	D, мм^2/сут	w_{max}, %
Исходные	0	0,016	1,44
Старение по режиму УКИ 1	6	0,022	1,46
	12	0,019	1,42
	18	0,028	1,37
	24	0,034	1,31
Старение по режиму УКИ 2	6	0,021	1,47
	12	0,026	1,43
	18	0,022	1,45
	24	0,026	1,38
Старение в МЦКИ	3	0,020	1,49
	6	0,022	1,48
	9	0,025	1,38
	12	0,025	1,37
Старение в ГЦКИ	3	0,021	1,47
	6	0,025	1,42
	9	0,025	1,34
	12	0,029	1,41

Коэффициент диффузии влаги один из самых чувствительных параметров к физико-химическим превращениям в ПКМ после климатического старения. Увеличение D может указывать на развитие микротрещин, а также на изменение химической структуры на поверхности и внутри материала [19].

После 12 месяцев натурного старения в ГЦКИ и МЦКИ наблюдается увеличение коэффициента диффузии влаги на 82% и 57%, соответственно. Данные результаты также подтверждают, что умеренно теплый климат с мягкой зимой по отношению к ПКМ более агрессивен, чем умеренный.

Сравнение результатов по показателю D после 12 месяцев ускоренного климатического старения демонстрируют увеличение коэффициента диффузии влаги на 19% по режиму УКИ 1, а по режиму УКИ 2 наблюдается увеличение параметра на 63%. Однако после имитации 24 месяцев по режиму УКИ 1 коэффициент диффузии влаги увеличился на 113%, а по режиму УКИ 2 параметр практически не изменился. После продолжения испытаний до 24 месяцев натурного старения можно ожидать дальнейшего изменения показателей влагопереноса.

Заключение. По результатам работы подтверждено, что умеренно теплый климат с мягкой зимой по отношению к ПКМ более агрессивен, чем умеренный. После 12 месяцев экспозиции стеклопластика ВПС-53/Т-25 в ГЦКИ и МЦКИ наблюдается необратимое уменьшение предела прочности при изгибе на 4,7 и 15%, соответственно.

После 12 месяцев натурного старения в ГЦКИ и МЦКИ наблюдается увеличение коэффициента диффузии влаги на 82% и 57%, а по режимам УКИ1 и УКИ 2 после 12 месяцев ускоренного климатического старения наблюдается увеличение показателя составило на 19% и 63%

Список источников

1. Method of accounting for the accelerated destruction of coupon edges when determining the effectiveness of corrosion inhibitors Corrosion Reviews / G G Matishov, A B Laptev, R Zh Akhiyarov [et al.] // Corrosion Reviews. DOI 10.1515/corrrev-2024-0143
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors // Russian Metallurgy (Metally). 2012, no. 4, pp.323–329.
3. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие. II // Авиационные материалы и технологии. 2021. №4 (65). С.70 – 80.
4. Мишуров К.С., Павловский К.А., Имаметдинов Э.Ш. Влияние внешней среды на свойства углепластика ВКУ-27Л II // Труды ВИАМ. 2018. №3. С.60 – 67. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 15.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-60-67.
5. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №5 (65). С.110-118. URL: http://www.viam-works.ru.
6. Лукачевская И. Г., Гаврильева А. А., Кычкин А. К., Кычкин А. А., Стручков Н. Ф., Дьяконов А. А. Оценка начальной стадии климатического старения базальто- и стеклопластиков в условиях экстремально холодного климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т.26. №2. С.159-169.
7. Каблов, Е Н, Старцев В О, Лаптев А Б Старение полимерных композиционных материалов. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт», 2023. 536 с. ISBN 978-5-905217-90-6.
8. Старцев В.О., Молоков М.В., Постнов В.И., Старостина И.В. Оценка влияния климатического воздействия на свойства стеклопластика ВПС-53К // I Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. 2017. Т.19, №4(2). С.220-228.
9. ГОСТ Р 51369-99 Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности. М.: Госстандарт России, 2000.
10. ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. М.: Издательство стандартов, 1990.
11. ГОСТ 16350-80. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Издательство стандартов, 1981.
12. ГОСТ Р 51370-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытание на воздействие солнечного излучения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.
13. Старцев В. О., Славин А. В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата // Труды ВИАМ. 2021.
14. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
16. Crank J. The mathematics of diffusion. Second edi. Oxford: Clarendon press, 1975. 414 p.
17. Yang C, Xing X, Li Z, Zhang S. A Comprehensive Review on Water Diffusion in Polymers Focusing on the Polymer-Metal Interface Combination. Polymers (Basel). 2020 Jan 6; 12(1):138. doi: 10.3390/polym12010138. PMID: 31935864; PMCID: PMC7023388.

УДК 624.154.1
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-332-336

ПКМ-СВАИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ – МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА И ВЫЯВЛЕНИЯ ФАКТОРОВ РИСКА ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО И СУБАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНОВ

Нечаев Д.В., Ермаков С.Б.
Тюменский индустриальный университет
E-mail: danya.nechaev.94@mail.ru

***Аннотация**. В рамках настоящего исследования разработали программу испытаний, основанной на анализе условий работы свайных фундаментов в условиях Арктики, для определения типа материала и технологии производства ПКМ-свай. Показано, что наиболее значимым являются комплексное воздействие влажности, термоциклирования, засолённость воздуха и грунтов и УФ-излучения. При этом защитные покрытия позволяют минимизировать изменение свойств и поверхностные повреждения ПКМ. Определено, что для изготовления буроопускных свай могут быть применены базальтопластиковые или стеклопластовые трубные элементы, изготовленные методом мокрой намотки. На основании проведенных исследований провели анализ видов и последствий отказов ПКМ-сваи в условиях Арктики. Установили, что наиболее опасными зонами установленной ПКМ-сваи является надземная часть и участок, расположенные в зоне сезонного талого слоя. Данные результаты были верифицированы полигонными испытаниями на опытном полигоне ЯНЦ СО РАН.*

***Ключевые слова:** свая, деградация, Арктика, гео-климатические факторы, полимерный композитный материал*

PCM-PILES IN ARCTIC CONDITIONS – METHODOLOGY FOR ANALYSIS AND IDENTIFICATION OF RISK FACTORS DURING THEIR OPERATION IN THE ARCTIC AND SUBARCTIC REGIONS

Nechaev D.V., Ermakov S.B.
Tyumen Industrial University

***Abstract**. As part of this study, a testing program was developed based on an analysis of the operating conditions of pile foundations in Arctic conditions to determine the type of material and manufacturing technology for polymer composite piles. It was shown that the most significant factors are the combined effects of humidity, thermal cycling, air and soil salinity, and UV radiation. Protective coatings minimize changes in properties and surface damage to the polymer composite. It was determined that basalt-fiber reinforced plastic or fiberglass tubular elements manufactured using a wet winding method can be used for the manufacture of bored piles. Based on the conducted research, an analysis of the types and consequences of PCM pile failures in Arctic conditions was conducted. It was determined that the most hazardous areas of an installed PCM pile are the aboveground portion and the section located in the seasonal thaw zone. These results were verified by field tests at the Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

***Keyword**: pile, degradation, Arctic, geo-climatic factors, polymer composite material*

С освоением и развитием зон Арктики, добывающие компании столкнулись с большими проблемами в области обустройства свайного фундамента [1]. К ним относятся суровые климатические и геокриологические условиях эксплуатации, а также высокие капитальные и операционные затраты [2]. При этом ввод в эксплуатацию низкодебетных месторождений в значительной степени усугубил данные проблемы. Все эти вызовы сформировали необходимость в разработке и внедрения новых подходов и материалов для обеспечения надежности и снижения стоимости строительства свайного фундамента в условиях Крайнего Севера [3]. Одним из способов снижения затрат и повышения надежности является применение свай из полимерных композитных материалов (ПКМ-свай) [4]. Однако более активному их внедрению препятствует недостаточность понимания величины их деградации под воздействием внешних факторов и методов прогнозирования их срока эксплуатации. Поэтому целью настоящей работы являлась обоснование применения ПКМ-свай и анализ сохраняемости их механических и эксплуатационных свойств в ходе длительной эксплуатации свайного фундамента в гео-климатических условиях Арктического и Субарктического регионов.

Для разработки программы исследования провели анализ условий работы свайных фундаментов, эксплуатируемых в условиях Арктики. Определено, что к внешним факторам, влияющих на свойства ПКМ, относятся экстремально низкие климатические температуры, частые термоциклические воздействия, обильные атмосферные осадки и УФ-изучение [2, 5]. Многолетнемерзлый грунт, особенно в сезонно-талом слое, обладает высокой коррозионной активностью и повышенным уровнем влажности [6].

В результате оценки влияния низких температур на механические свойства ПКМ установлено, что падение предела прочности стеклопластика после 1000 часов холодного старения в среднем составило 6%, у базальтопластика 4%, у углепластика 3%. При этом отмечено, что механические свойства образцов, полученных методом мокрой намотки незначительно ниже по сравнению с методом вакуумной инфузии, а величина изменения предела прочности сопоставима.

В результате определения влияния водопоглощения определено отсутствие значимого различия влияния технологии производства ПКМ на сорбцию воды. Так, падение предела прочности для всех типов образцов, после выдержек в дистиллированной воде на протяжении 2500 часов составило в среднем 4–5%. Также установлено, что максимальная скорость поглощения воды происходит во время первых 500 часов испытаний, когда процесс поглощения воды протекает наиболее интенсивно.

При оценке влияния термоциклировании на механические свойства опытных ПКМ определено, что переходы через ноль оказывают существенное влияние на их механические свойства. Так, предел прочности ПКМ после 100 переходов через ноль, снизился у стеклопластика на 15%, базальтопластика на 11%, углепластика на 9%. Причина потери прочности при термоциклировании заключается в накопление влаги в поверхностных порах образцов с последующим образованием водонасыщенных кластеров в теле материала и появлением внутренних напряжений.

Анализ влияния заселенности воздуха и грунта на ПКМ показал, что данное воздействие достаточно резко снижает весь комплекс механических свойств ПКМ. Так, при нахождении образцов в модельной среде в первые 480 часов прочность стеклопластика и базальтопластика снижается на 23%, а углепластика на 15%. При этом это влияние со временем ослабевает. При этом отмечено, что применение водоотталкивающих защитных покрытий снижает воздействие всех вышеперечисленных геоклиматических факторов на структуру и свойства опытных образцов ПКМ.

На основании полученных результатов, для оценки совместного воздействия УФ-излучения, температуры и влажности, выбрали образцы из базальто- и стеклопластика, изготовленных методом мокрой намотки, так как данные материалы обладают оптимальным соотношением «цена-свойства». Установлено, что выдержка образцов в испытательной среде на протяжении 4320 часов приводит к падению предела прочности на 7% и относительного удлинения на 12%. Упругие свойства, с учетом доверительных интервалов, не изменяются. Причина деградации поверхности заключается в синергетическом эффекте эрозии, приводящей к микрорастрескиванию матрицы с последующим образованием объемных дефектов.

На основании всего выше сказанного представляется возможным ранжировать исследованные ПКМ по категориям условий эксплуатации объектов, приведённых в СП 16.13330.2017 и рекомендовать углепластики для конструкций 1 категорий ответственности, а для 2 и 3 группы конструкций, могут быть применены базальтопластовые или при их отсутствии – стеклопластовые трубные элементы. Анализ технологии производства полноразмерных макетов труб из всех видов ПКМ позволил установить, что в условиях трубного производства, намотка, как более дешевый и производительный метод представляется более рациональным.

Для более качественной классификации факторов риска, влияющих на надежность и долговечность свайного фундамента в условиях Арктики с применением ПКМ-свай провели анализ причин и последствий отказа на основании полученных результатов в лабораторных условиях, согласно ГОСТ Р 27.303–2021 (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализа видов и последствий отказов ПКМ-сваи в условиях Арктики (FMEA–анализ)

Внешний гео-климатический фактор			Отрицательные температуры	Влагопог-лощение	Термоциклическое воздействие	Соленая среда	УФ-излуче-ние
Надземная часть сваи	Время эксплуатации сваи, часы	1	3*	3	3	3	3
			3*	3	3	3	3
		250	3	3	6	12	6
			3	3	3	3	6
		1 000	3	12	18	36	18
			3	2	6	3	18
		2 500	12	18	36	45	54
			12	6	3	9	54
		10 000	18	45	96**	90	105
			18	18	27**	12	105
		20 000	18	72	150**	144	144
			18	24	60	24	144
		100 000	36	108	210	216	162
			36	45	90	45	162
		240 000	45	126	270	270	180
			45	45	108	45	180
Зона СТС		1	10	10	10	10	10
			10	10	10	10	10
		250	10	10	10	10	10
			10	10	10	10	10
		1 000	40	10	10	10	10
			40	10	10	10	10
		2 500	40	60	20	20	10
			40	20	10	10	10
		10 000	60	150	60	60	10
			60	60	20	30	10
		20 000	60	240	60	60	10
			60	80	40	40	10
		100 000	120	360	90	90	10
			120	150	60	60	10
		240 000	200	420	120	120	10
			200	150	90	90	10
Зона М		1	10	10	10	10	10
			10	10	10	10	10

Внешний гео-климатический фактор			Отрицательные температуры	Влагопог-лощение	Термоциклическое воздействие	Соленая среда	УФ-излуче-ние
		250	10	10	10	10	10
			10	10	10	10	10
		1 000	10	20	10	20	10
			10	10	10	10	10
		2 500	10	20	10	20	10
			10	10	10	10	10
		10 000	20	30	10	30	10
			20	10	10	10	10
		20 000	20	30	10	30	10
			20	10	10	10	10
		100 000	20	40	10	40	10
			20	10	10	10	10
		240 000	20	40	10	40	10
			20	10	10	10	10

*Примечание: *в числителе значения для ПКМ-сваи без защитного влагостойкого покрытия; в знаменателе с защитным влагостойким покрытием;*
***зеленый цвет – вероятность потенциального отказа и возникновения дефекта очень низкая, оранжевый цвет – ниже среднего, красный цвет – выше среднего.*

Установлено, что наиболее опасными зонами установленной ПКМ-сваи является надземная часть и участок, расположенные в зоне сезонного талого слоя. На участке, расположенного в зоне ММГ факторы возникновения дефекта и потенциального отказа ПКМ-сваи – минимальны.

Для верификации полученных результатов провели полигонные и опытно-промышленные испытания на опытном полигоне ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, заключающиеся в оценке влияния длительной эксплуатации на свойства полноразмерных макетов ПКМ-сваи разработали методику, заключающаяся в их погружении макетов свай в различные грунтовые условия и с различным способом заполнения внутритрубного и затрубного пространства. После выдержки макетов ПКМ-свай на протяжении 2 лет провели их выемку, очистку и визуально-измерительный контроль. Определено отсутствие дефектов видимых невооруженных глазом и при использовании 10-кратной лупы. Геометрические размеры сваи не изменились. В результате оценки изменения механических свойств после длительной эксплуатации определено, что падение свойств материала надземной части по пределу прочности при растяжении составило 3%. На участке трубы, расположенном в зоне СТС падение предела прочности на растяжение, составило 5,5%. На участке трубы, расположенном в зоне ММГ – свойства материала практически не изменились.

Таким образом срок эксплуатации ПКМ-сваи ограничивается участком, расположенным в зоне СТС, что полностью подтверждается обобщенными лабораторными результатами при помощи FMEA-анализа.

На основании полученных результатов исследований были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что к внешним факторам, влияющим на свойства ПКМ, относятся экстремально низкие климатические температуры, частые термоциклические воздействия, обильные атмосферные осадки. ММГ в зоне СТС обладает высокой коррозионной активностью и повышенным уровнем влажности и засоленности. В летний период к этим факторам добавляется еще УФ-излучение и достаточно высокая температура воздуха.

2. Определено влияние характерных для Крайнего Севера гео-климатических внешних факторов на механические и эксплуатационных свойства ПКМ. Показано, что наиболее значимым являются комплексное воздействие влажности, термоциклирования, засолённость воздуха и грунтов и УФ-излучения. При этом защитные покрытия позволяют минимизировать деградацию свойств и поверхностные повреждения ПКМ, и, в целом, значительно снизить влияние климатических факторов на деградацию их структуры и свойств. На основании проведенных исследований, представляется возможным ранжировать исследованные ПКМ по категориям в зависимости от условий эксплуатации объектов, приведённых в Приложении В СП 16.13330.2017 и рекомендовать углепластики для конструкций 1 (конструкции с динамическим нагружением) и особо нагруженные конструкции 2 категорий ответственности. Для конструкций, испытывающих в ходе эксплуатации сжимающие и изгибающие или только сжимающие нагрузки (2 и 3 группы конструкций), например, для изготовления буроопускных свай могут быть применены базальтопластиковые или стеклопластовые трубные элементы, изготовленные методом мокрой намотки.

3. По результатам полигонных исследований в характерных гео-криологических условиях Крайнего Севера показано, что повышенная обводненность и заселенность грунтов северных территорий может приводить к деградации механических свойств ПКМ, применяемых для свай, и требует дополнительного контроля их фактического состояния в ходе длительной эксплуатации.

Благодарность: *Работа выполнена в рамках НИОКТР за счет средств федерального бюджета на тему: «Разработка методик определения возможностей и условий применения полимеркомпозитных материалов в качестве строительных конструкций, деталей и узлов оборудования нефтедобывающих предприятий в Арктической и Субарктической зонах России» (FEWN-2025-0005).*

Список литературы

1. Минкин М. А., Потапова О. А. Особенности обустройства северных нефтяных и газовых месторождений России и основания и фундаменты зданий и сооружений объектов обустройства //Вестник МГСУ. 2006. №1. С.175-182.
2. Нечаев Д. В., Швецов О. В., Ермаков С. Б. Оценка деградации свайных полимерно-композитных труб под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности //Energy. 2025. Т.31. №01. С.136-145.
3. Алексеев А. Г., Сазонов П. М., Зорин Д. В. К вопросу усовершенствования технологии устройства и расчета различных видов свай //Вестник НИЦ «Строительство». 2019. Т.20. №.1. С.5-13.
4. Коринько И. В. и др. Перспективы использования полимерных композиционных материалов //Коммунальное хозяйство городов. №.67. С.56-63.
5. Ермаков Б. С. и др. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур //Горная промышленность. 2024. №. S5. С.198-203.
6. Долгих Д. Г. Экономия при строительстве на вечной мерзлоте должна быть эффективной: рекомендации заказчику //Экспозиция Нефть Газ. 2015. №.4 (43). С.10-13.

УДК 550.47:569.614
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-337-340

ВЛИЯНИЕ УЛОВИЙ ЗАЛЕГАНИЯ И ХРАНЕНИЯ НА СВОЙСТВА БИВНЯ МАМОНТА mammuthus primigenius

Петухова Е.С., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Петров В.В.,
Чириков А.А., Платонов Б.Р., Аргунова А.Г., Ерофеевская Л.А.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: evgspar@rambler.ru

Аннотация. *В статье изложены результаты исследования свойств бивня мамонта Mammuthus primigenius после экспонирования в различных условиях, имитирующих естественные и искусственные факторы среды. Показано, что условия хранения оказывают значительное влияние на поражение тканей микроорганизмами. Установлено, что физико-механические свойства зависят от влажности тканей бивня. Особенности растрескивания определяются температурой окружающей среды, воздействием ветра и микроорганизмов окружающей среды.*

Ключевые слова: *бивень мамонта, условия хранения, физико-механические свойства, растрескивание, биозаражение*

THE INFLUENCE OF DEPOSITION AND STORAGE CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF THE MAMMOTH TUSK MAMMUTHUS PRIMIGENIUS

Petukhova E.S., Isakova T.A., Solov'ov T.M., Botvin G.V. Chirikov A.A.,
Platonov B.R., Argunova A.G., Erofeevskaya L.A.
Yakutsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This article presents the results of a study on the properties of mammoth tusks (Mammuthus primigenius) after exposure to various conditions simulating natural and artificial environmental factors. It has been shown that storage conditions have a significant impact on the infection of tissues by microorganisms. It was established that the physicomechanical properties depend on the moisture content of the tusk tissues. The characteristics of cracking are determined by the ambient temperature, the influence of wind, and microorganisms present in the environment.*

Keyword: *mammoth tusk, storage conditions, physicomechanical properties, cracking, bio-contamination*

Бивень мамонта (ископаемая мамонтовая кость) – уникальное косторезное сырье, являющееся полным аналогом слоновой кости. Состав тканей бивня сходен с составом костных тканей других животных и людей и представляет собой композиционный материал, состоящий из минерального каркаса (гидроксиапатит (ГАП)), органического связующего (коллаген) и воды. Однако на макроскопическом уровне структура бивня отличается от других костных тканей, включая рога и зубы других животных. На макроуровне БМ представляет собой вложенные друг в друга конусы роста; каждый такой конус ежегодно прирастал как бы изнутри бивня, вызывая его удлинение. Толщина стенки конуса зависела от многих факторов, главным из которых являлось питание животных, обильность которого определялось климатическими условиями. На микроуровне структура БМ также неоднородна. В статье авторов данной публикации [1] показано, что дентин БМ характеризуется наличием микродефектов в виде пор и трещин, количество которых определяется степенью сохранности бивня. Сохранность тканей БМ в свою очередь определяется длительностью воздействия на материал факторов окружающей среды, в которые попадает бивень после десятков тысяч лет залегания в вечномерзлых грунтах.

В качестве основных факторов, оказывающих влияние на свойства БМ при длительном хранении следует выделить влияние микроорганизмов, влаги (в том числе колебание ее содержания), температуры окружающего воздуха, прямого солнечного излучения и др. Влияние данных факторов отражается на внешнем виде бивня, количестве трещин, цвете, прочности, хрупкости и пр.

Рассмотрим влияние микроорганизмов на свойства БМ. В статье [2] было показано, что способ хранения оказывает значительное влияние на биомассу микроорганизмов поражающих ткани бивня (рис. 1).

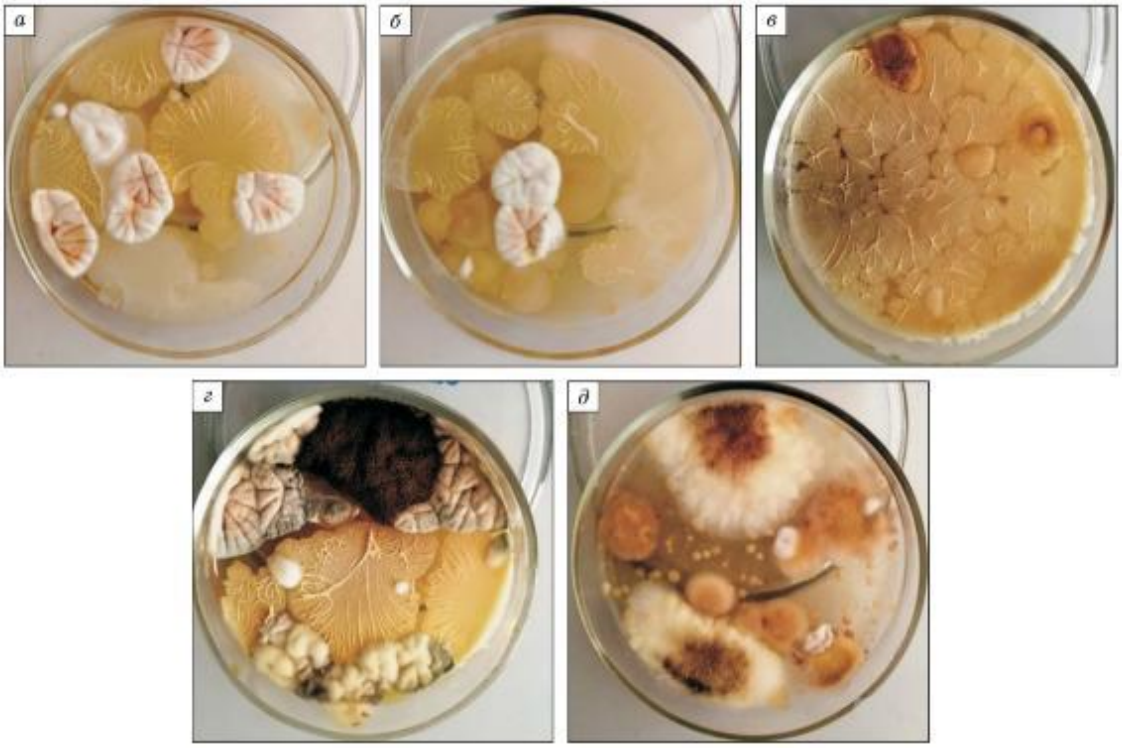


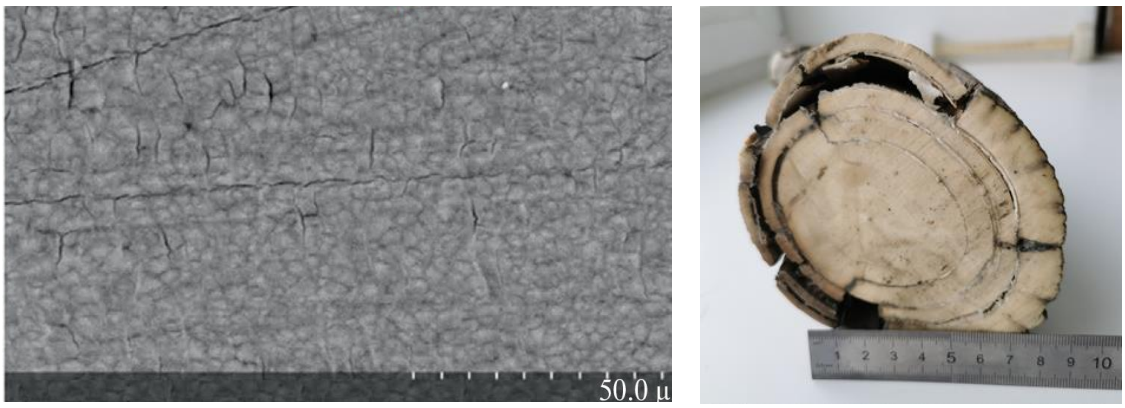
Рис. 1. Формирование колоний плесневых грибов родов Acremonium (а, б), Aspergillus (в–д), Penicillium (г) и бактерий рода Bacillus (рис. а–д), выделенных из образцов бивня мамонта, экспонированных: а – при комнатной температуре; б – при температуре –10 °С; в – в условиях неотапливаемого помещения; г – в пленке, на открытом воздухе; д – на открытом воздухе [2]

Причиной поражения БМ микроорганизмами является наличие в их составе коллагена и влаги, которые микроорганизмы используют для своего роста и развития. Безусловно наиболее благоприятными условиями являются высокая температура и влажность, что и подтвердили модельные исследования – наибольший прирост бактериально-грибковой биомассы наблюдается при хранении БМ обернутыми в пленку в летний период. Конденсация влаги и повышенная температура создают парниковый эффект, интенсифицируя процессы размножения микроорганизмов.

В лаборатории технологий добычи и переработки сырья мамонтовой фауны ЯНЦ СО РАН был разработан и запатентован состав для защиты БМ и других палеонтологических остатков от микробиологического заражения [3]. Антибактериальный состав (АБС) представляет собой смесь гидрофобизатора «Пента-820» (30 мас.%) и 40%-й молочной кислоты (70 мас.%). Было показано, что обработка БМ данным составом снижает общую численность микроорганизмов после длительного хранения в различных условиях в 12 и более раз. Рекомендуемая периодичность обработки составляет 6 месяцев.

Как уже отмечалось, при неудовлетворительных условиях хранения на теле БМ появляются трещины, оказывающее значительное влияние на его стоимость. Причиной образования трещин на взгляд авторов данной статьи является прежде всего влагонасыщение/высушивание, а также замерзание/оттаивание воды при переходе температуры воздуха через 0 °С. Безусловно на интенсивность данных процессов оказывает влияние воздействие ветра.

На рисунке 2 представлена электронная микрофотография БМ, демонстрирующая наличие в материале продольных и поперечных микротрещин. Влага и микроорганизмы, попадая в объем материала, вызывают разрастание данных трещин, приводя к разрушению БМ плоть до состояния так называемой щепы.



а б

Рис. 2. Микро- и макротрещины на теле БМ: а – микрофотография БМ (х1000); б – БМ IV сорта

Для предотвращения трещинообразования БМ и изделия из него следует хранить при постоянной температуре (в т. ч. пониженной, при условии, что БМ был предварительно медленно просушен до постоянной массы), в отсутствии ветра и при постоянной влажности воздуха.

Интересные результаты были получены авторами при исследовании прочности БМ при сжатии в зависимости от сортности и влажности. На рисунке 3 представлены результаты данного исследования, более подробно с которыми можно ознакомиться в статье [4].

Установлено, что прочность БМ практически не зависит от их сорта. Анизотропия свойств в продольном и поперечном направлениях, вызванная специфической структурой БМ, наиболее отчетливо выражена для образцов, которые не подвергались влагонасыщению/просушиванию. Прочность влагонасыщенных образцов в отдельных случаях в 10 и более раз ниже высушенных и в 3–7 раз ниже исходных. Разработка экспресс метода оценки влажности может позволить определить в какой среде залегал бивень до его обнаружения (добычи) и определить подходы к методике его обработки для длительного сохранения физических и эстетических свойств. Следует отметить, что избыточное влагонасыщение приводит к временному «залечиванию» некоторых трещин, вызванному набуханием коллагена. Высыхание такого материала вызовет проявление этих трещин, а также интенсифицирует их разрастание ввиду возрастания разнонаправленных напряжений в анизотропном материале.

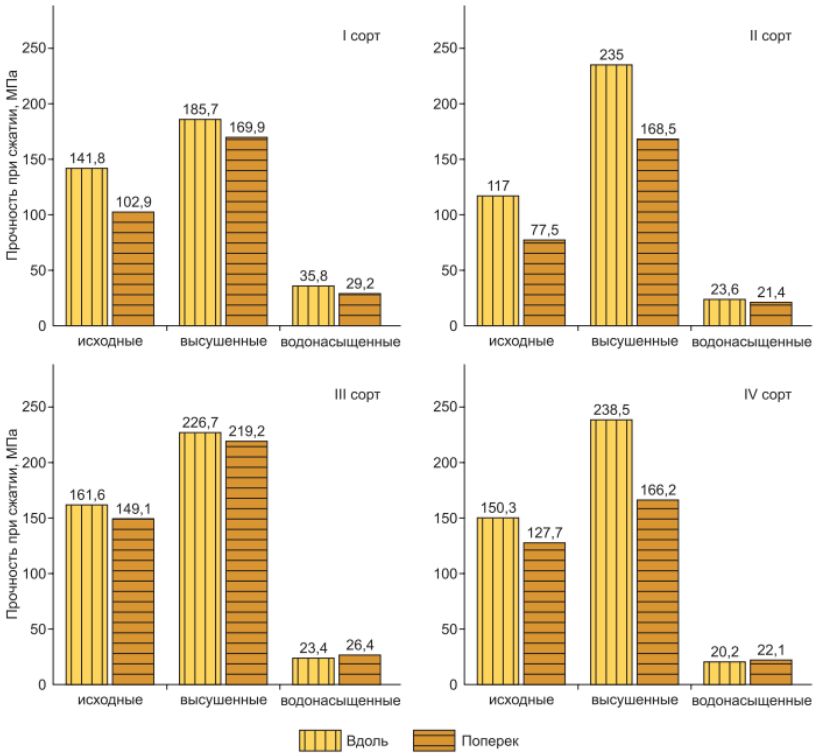


Рис. 3. Прочность при сжатии исходных, высушенных и водонасыщенных образцов БМ различной сортности [4]

Таким образом, ткани БМ чрезвычайно чувствительны к воздействию факторов окружающей среды. Коллаген БМ подвергается биозаражению, перепады температуры и влажности, а также ветра вызывает растрескивание материала, переувлажнение//пересушивание влияют на прочность материала. Следовательно, при длительном хранении следует учитывать исходное состояние бивня, предусмотривать медленное просушивание, обработку антибактериальным составом с последующим хранением при постоянной температуре и влажности без обветривания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 125030403135-5 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Е. С. Петухова, Т. М. Соловьев, Т. А. Исакова*, Г. В. Ботвин, А. А. Чириков, В. В. Петров Исследование микроструктуры бивня мамонта методом сканирующей электронной микроскопии//Записки Российского минералогического общества. 2025. Ч.CLIV 3. С. 123–136. DOI: 10.31857/S0869605525030085.
2. Т.А. Исакова, Е.С. Петухова, В.В. Павлова, Л.А. Ерофеевская Особенности биозаражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т.26. №3. С.75-85. DOI: 10.31242/2618-9712-2021-26-3-75–85.
3. Способ защиты палеонтологических находок (бивней мамонта) от биозаражения при длительном хранении: пат. 2819737 Рос. Федерация: МПК A01N 1/00 (2006.01), A01N 37/02 (2006.01) / Ерофеевская Л.А., Петухова Е.С., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки федеральный исследовательский центр Якутский научный центр Сибирского отделения Российской Академии наук. – № 2022133970, заявл.23.12.2022; опубл. 23.05.2024 Бюл. №15.
4. Т. М. Соловьев, Т. А. Исакова, В. В. Павлова, Г. В. Ботвин, А. А. Чириков, В. В. Петров, Е. С. Петухова Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. 28(3). С.495–506. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506.

УДК 620.193.21:678.742.21:66-973(571.56)
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-341-345

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИ ПЭНД В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНЫХ И УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г.
Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН)
E-mail: evgspar@rambler.ru

Аннотация. *В статье изложены результаты исследования полиэтилена низкого давления, содержащего различные фенольные стабилизаторы, в условиях длительного экспонирования при воздействии естественных климатических факторов и при интенсивном УФ-облучении. Исследованы внешний вид, физико-механические характеристики материалов при растяжении, показатель текучести расплава, проведены ИК-спектроскопические исследования и рассчитан карбонильный индекс. Показано, что все применявшиеся в работе стабилизирующие добавки в той или иной степени участвуют в реакциях прерывания радикальных цепных реакций, инициирующихся под воздействием УФ-излучения. По совокупности полученных данных, стабилизаторы марок СО-3 и СО-4 являются предпочтительными для повышения климатической стойкости полиэтилена низкого давления в рассматриваемых условиях.*

Ключевые слова: *полиэтилен низкого давления, длительные и ускоренные климатические испытания, стабилизирующие добавки*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF LONG-TERM AND ACCELERATED CLIMATIC TESTS OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE

Petukhova E. S., Argunova A. G., Fedorov A. L.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This article presents the results of a study of high-density polyethylene containing various phenolic stabilizers after prolonged exposure to natural climatic factors and intense UV irradiation. The material's appearance, strength properties, and melt flow index were studied, as well as IR spectroscopic studies and carbonyl indices calculated. It was demonstrated that all stabilizing additives used in the study participate in reactions that terminate the radical chain reactions initiated by UV irradiation. Based on the data obtained, stabilizers of the CO-3 and CO-4 grades are preferable for increasing the climatic resistance of high-density polyethylene under the conditions under consideration.*

Keyword: *high density polyethylene, long-term and accelerated climatic tests, stabilizing additives*

Для достоверного прогнозирования стойкости полимерных материалов к воздействию естественных климатических факторов исследователи часто сочетают результаты, полученные при длительном натурном экспонировании материалов в заданных условиях и ускоренных испытаний, имитирующих различные физические воздействия [1]. Многочисленные исследования показали [2–3], что наиболее агрессивным фактором при старении гидрофобных полимерных материалов, в частности полиолефинов, является воздействие УФ-части солнечного излучения, которое инициирует протекание радикальных цепных реакций, сопровождающихся разрывом и сшиванием макромолекулярных цепей, а также протеканием процессов окисления при взаимодействии с кислородом воздуха [4]. В состав промышленных марок полиолефинов для защиты от воздействия солнечного излучения вводят либо специальные вещества – стабилизаторы, прерывающие протекание радикальных цепных реакций, либо пигменты, обеспечивающие физическое поглощение и последующее рассеивание УФ-части солнечного излучения. В Новосибирском институте органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН (НИОХ СО РАН) разработаны способы получения высокоэффективных стабилизаторов полимерных материалов, применение которых может обеспечить импортозамещение в данной отрасли, являющееся актуальной задачей ввиду сложившихся в последние годы политико-экономических условий.

В задачи данного исследования входили оценка длительной климатической стойкости материалов на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД) марки Снолен ЕР 0.26/51N, содержащего стабилизаторы различных марок производства НИОХ СО РАН, в условиях Республики Саха (Якутия) и сравнительный анализ с результатами ускоренных климатических испытаний УКИ.

В качестве полимерной матрицы в данном исследовании использовали ПЭНД марки Снолен ЕР 0.26/51N (Газпром Нефтехим Салават) без промышленных добавок. В качестве добавок, обеспечивающих защиту ПЭНД от воздействия естественных климатических факторов, использовали стабилизаторы марок СО-3, СО-4, Ɣ-меркаптан, Каликсарен и Стафен (НИОХ СО РАН).

Длительные испытания проводили в течение 15 месяцев с этапами выемки после 1, 3, 6, 9, 12 и 15 месяцев экспонирования. При УКИ продолжительность облучения составляла 1, 2, 3, 6, 12, 24 и 36 ч.

На рисунке 1 представлен внешний вид образцов до экспонирования, а также после 15 месяцев длительных климатических испытаний и 36 часов УКИ. Установлено, что контрольные образцы не изменяют свой внешний вид при длительном хранении в помещении без доступа света (Рисунок 1, 0 мес., 15 мес. – контроль).

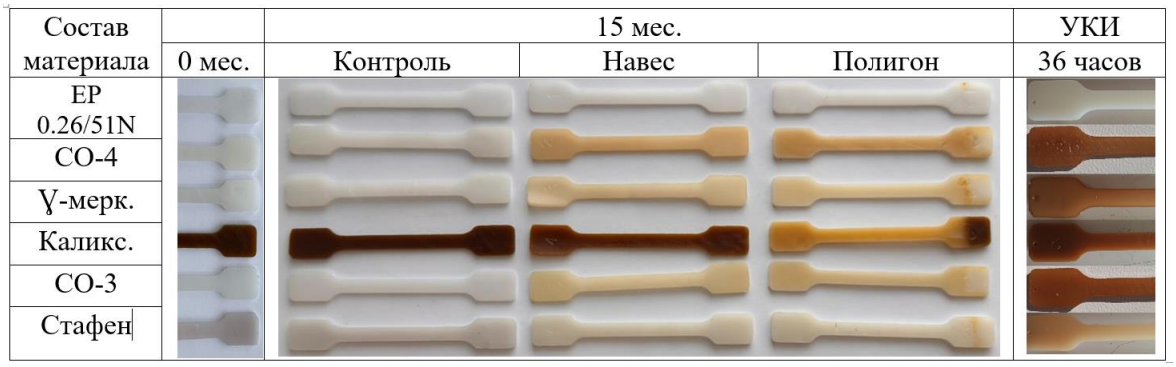


Рис. 1. Внешний вид стабилизированных образцов после 15 месяцев экспонирования в различных условиях

Видно, что часть образцов приобретает желто-коричневый оттенок. Образование окрашенных соединений при использовании фенольных стабилизаторов обусловлено образованием окрашенных хиноидных структур [5–6].

Анализ результатов исследования деформационно-прочностных характеристик материалов при растяжении показал, что при старении в наиболее широких пределах изменяется величина относительного удлинения при разрыве. Установлено, что после экспонирования исследуемых материалов статистически, судя по общему количеству образцов, продемонстрировавших удовлетворительный уровень удлинения при разрыве (более 250%, п. 5.2 технических требований ГОСТ 18599-2001), лучшей длительной климатической стойкостью характеризуются материалы, содержащие стабилизаторы марок СО-3, СО-4 и Каликсарен. Сравнение полученных результатов с результатами УКИ показало, что удлинение при разрыве снижается ниже 250% и составляет 20-50% для всех образцов после 2х часов принудительного облучения.

Известно [7], что при старении в полимерном материале протекают конкурирующие реакции деструкции и сшивания макромолекулярных цепей. Протекание данных процессов оказывает значительное влияние на технологические (реологические) свойства полимерного материала. Так, при межмолекулярном сшивании вязкость расплава повышается, а при уменьшении молекулярной массы вязкость снижается. Для оценки вязкости расплава стабилизированных материалов до и после длительных и ускоренных климатических испытаний в работе было проведено исследование показателя текучести расплава (ПТР) (ГОСТ 11645-2021). Установлено, что в период с 1 до 9 месяцев натурных испытаний процессы сшивания макромолекулярных цепей ПЭНД преобладают над процессами деструкции, что вызывает снижение ПТР (повышение вязкости расплава), а экспонирование свыше 9 месяцев приводит обратной картине – процессы деструкции начинают преобладать, вызывая снижение молекулярной массы полимера и, соответственно, его вязкости (повышение ПТР). При этом выявлено, что наиболее интенсивно данный процесс протекает в нестабилизированном ПЭНД, а наиболее стабильными реологическими свойствами при натурном экспонировании характеризуется материал, содержащий СО-4.

Результаты УКИ показали, что после 1 часа интенсивного облучения ПТР нестабилизированного ПЭНД снижается практически в 3 раза и с увеличением продолжительности облучения снижается вплоть до состояния, когда материал в заданных условиях (5 кгс, 190ºС) не продавливается через фильеру пластометра. ПТР стабилизированных материалов снизившись после 1 часа УКИ в среднем в 1,6–2,3 раза далее с увеличение продолжительности облучения практически не изменяется, что свидетельствуют о том, что все применяющиеся в работе стабилизирующие добавки в той или иной степени

ингибируют протекание радикальных цепных реакций, инициируемых УФ-излучением, что не позволяет выявить наиболее эффективную стабилизирующую добавку.

Одним из методов, нашедших широкое применение при исследовании химических превращений в полимерном материале, протекающих под воздействием естественных и искусственных факторов, является ИК-спектроскопия [8–10]. На рисунке 2 представлены ИК-спектры ПЭНД марки Снолен EP 0.26/51N после экспонирования на полигоне климатических испытаний.

Спектр полиэтилена представлен основными пиками, приходящимися на 2917, 2850, 1472, 1462, 1368, 730 и 720 см$^{-1}$. Данные пики относятся к различным модам колебаний метиленовых групп (-CH_2-): асимметричным и симметричным валентным колебаниям (2917 и 2850 см$^{-1}$), асимметричным и симметричным деформационным ножничным колебаниям (1472 и 1462 см$^{-1}$), деформационным маятниковым колебаниям (730 и 720 см$^{-1}$), пик при 1368 см$^{-1}$ относится к веерным деформационным колебаниям. Пик при 911 см$^{-1}$ являются проявлениями концевой винильной группы, являющейся одним из продуктов деградации ПЭНД при старении. Также на поверхности образцов выявлено наличие инородных веществ, вызванное загрязнением при натурном экспонировании (пыль), проявляющееся в виде полос поглощения при 3700, 1441, 1040 и 875 см$^{-1}$, свидетельствующие о наличии кальцита, бентонита и алюмосиликатов.

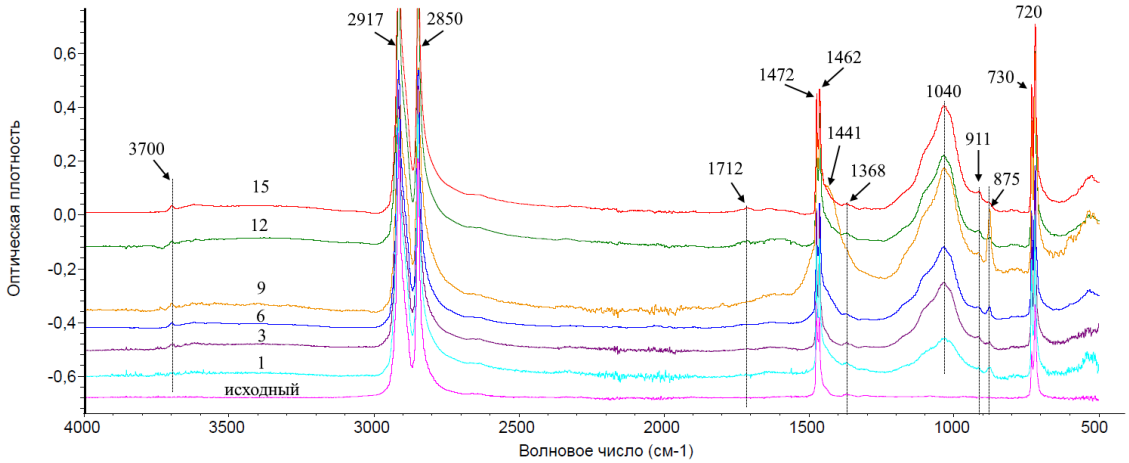


Рис. 2. ИК-спектры ПЭНД марки Снолен EP 0.26/51N в зависимости от продолжительности экспонирования на полигоне климатических испытаний

На основании полученных результатов был рассчитан карбонильный индекс, с использованием полосы поглощения при 1712 см$^{-1}$ [11]. Поскольку при исследовании состаренных образцов было установлено, что изменения протекают на обеих сторонах образцов, ИК-спектроскопические исследования и расчет карбонильного индекса проводили как для лицевой, так и для теневой стороны образца. Результаты вычисления карбонильного индекса после длительного экспонирования и УКИ представлены в таблицах 1 и 2.

Установлено (табл. 1), что общее количество карбонильных групп на поверхности нестабилизированного ПЭНД значительно ниже, чем в материалах, содержащих стабилизирующие добавки, что обусловлено протеканием преимущественно реакций диспропорционирования. Видно (табл.1), что накопление карбонильных групп происходит как на лицевой, так и на теневой стороне образца. Повышение концентрации карбонильных групп в период 6 до 9 месяцев экспонирования на теневой стороне образца протекает интенсивнее, что вызвано тем, что лицевая сторона покрыта сначала слоем пыли, а затем и снега, а теневая продолжает облучаться при переотражении УФ-излучения от снежного покрова. Учитывая, что после 12 месяцев экспонирования (весенне-летний период) все исследованные материалы охрупчиваются, очевидно, что именно экранирование материалов защитным слоем снега предотвращало протекание радикальных цепных реакций в период с 3 до 9 месяцев испытаний.

Таблица 1. Карбонильный индекс стабилизированных материалов на основе ПЭНД в зависимости от продолжительности экспонирования при длительных климатических испытаниях

	EP 0.26/51N	CO-3	CO-4	Стафен	γ-меркаптан	Каликсарен
Лицевая сторона						
1 мес	0,0084	0,0246	0,0199	0,0142	0,0089	0,0211
3 мес	0,0064	0,0279	0,0220	0,0299	0,0313	0,0314
6 мес	0,0075	0,0244	0,0258	0,0280	0,0286	0,0291
9 мес	0,0037	0,0127	0,0182	0,0189	0,0197	0,0203
12 мес	0,0495	0,0612	0,0563	0,0513	0,0231	0,0535
15 мес	0,0396	0,0532	0,0449	0,0621	0,0503	0,0513
Теневая сторона						
1 мес	0,0165	0,0190	0,0352	0,0165	0,0218	0,0149
3 мес	0,0090	0,0217	0,0236	0,0247	0,0201	0,0132
6 мес	0,0192	0,0567	0,0462	0,0385	0,0440	0,0354
9 мес	0,0190	0,0440	0,0565	0,0580	0,0571	0,0656
12 мес	0,0512	0,0615	0,0514	0,0542	0,0510	0,0552
15 мес	0,0573	0,0608	0,0673	0,0542	0,0662	0,0476

Таблица 2. Карбонильный индекс стабилизированных материалов на основе ПЭНД в зависимости от продолжительности УФ-облучения при ускоренных климатических испытаниях

	EP 0.26/51N	CO-3	CO-4	Стафен	γ-меркаптан	Каликсарен
Карбонильный индекс (CI)						
1 ч	0,0667	0,1208	0,1210	0,1098	0,0647	0,0948
2 ч	0,1679	0,3699	0,2517	0,1678	0,1149	0,1761
3 ч	0,2273	0,3235	0,2933	0,2160	0,1370	0,2581
6 ч	0,3294	0,4667	0,4875	0,3250	0,4085	0,3820
12 ч	0,5000	0,6702	0,6667	0,5000	0,7000	0,4444
24 ч	0,5882	1,1569	0,8629	0,6471	1,0323	0,8404
36 ч	0,5795	1,0789	1,0193	0,6866	0,8654	0,8646

Установлено (табл.2), что при интенсивном облучении исследуемых материалов концентрация карбонильных групп монотонно возрастает с увеличением продолжительности воздействия.

По совокупности полученных результатов на данном этапе исследований наиболее перспективным представляется применение серосодержащих гибридных стабилизаторов марок СО-3 и СО-4. Следует отметить, что несмотря на то, что как при УКИ, так и при длительном натурном экспонировании в общем случае образуются одни и те же продукты старения, особенности протекания процессов деструкции и их интенсивность существенно отличаются. Для достоверной оценки эффективности стабилизирующих добавок при климатическом старении, методы длительный и ускоренных испытаний должны применяться в совокупности и более тонко учитывать условия эксплуатации изделий и конструкций.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Барботько С.Л., Николаев Е.А. Методические особенности проведения и обработки результатов климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2013. № 1. С.37-41.
2. Горунов Ф. К., Полубояров В. А., Бердникова Л. К., Котляр Э. В. Влияние УФ излучения на механические свойств полиуретановых композитов // Тезисы докл. IV междисципл. науч. форума с межд. уч. «Новые материалы и перспективные технологии»: Москва, Изд-во ООО «Буки Веди», 2018. С.350-351.
3. Мяленко Д. М. Влияние термического, радиационно-химического и фотометрического воздействия на деструкцию и «старение» полимерных материалов // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т.1, №1(1). С.406-411.

4. Алиев А.А., Леднева О.А., Попов А.А. Изменения электрофизических свойств полимерных смесей под действием электрических разрядов // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2010. Т.52, №3. С.441-445.
5. Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г. Изучение влияния УФ-излучения на структуру стабилизатора СО-4 методом ИК-спектроскопии // Сб. тр. всеросс. науч.-техн. конф. «Климат-2022: Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы»: Москва, Изд-во НИЦ «Курчатовский исинтитут» 2022. С.109–118.
6. Терах Е. И., Просенко А. Е., Никулина В. В., Зайцева О. В. Исследование синергических эффектов антиоксиданта СО-3 и его структурных аналогов в сравнении с композициями триалкилфенолов и диалкилсульфида // Журнал прикладной химии. 2003. Т.76, №2. С. 261–265.
7. Kim K.-W., Lee H., An J.-H. et al. Effects of cross-linking methods for polyethylene-based carbon fibers: Review // Carbon Letters. 2015, vol.16, pp.147-170. doi:10.5714/CL.2015.16.3.147.
8. Campanale C., Savino I., Massarelli C., Uricchio V.F. Fourier Transform Infrared Spectroscopy to Assess the Degree of Alteration of Artificially Aged and Environmentally Weathered Microplastics // Polymers. 2023, vol.15, p.911.
9. Giuseppe Bonifazi, Ludovica Fiore, Claudia Pelosi, Silvia Serranti, Evaluation of plastic packaging waste degradation in seawater and simulated solar radiation by spectroscopic techniques // Polymer Degradation and Stability. 2023, vol.207, p.110215.
10. Gardette M., Perthue A., Gardette J.L. et al. Photo- and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content // Polymer Degradation and Stability. 2013, vol.98 (11), pp. 2383–2390.
11. Prasada Rao T., Biju V.M. Spectrophotometry / Organic Compounds // Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition). 2005, pp. 358-366.

УДК 620.18; 579.6
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-346-348

БИОПОВРЕЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОГО КЛИМАТА

Салтыкова А.Л.[1], Ерофеевская Л.А.[2], Кычкин А.К.[3], Лукачевская И.Г.[1,3], Далбаева Е.А.[1,2], Вит А.А.[2]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
[3]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: ny94@list.ru

***Аннотация**. На примере опытных образцов стеклотекстолита показана возможность микроорганизмов (бактерий и плесневых грибов) принимать участие в контаминировании полимерных композитов. Из опытных образцов стеклотекстолита выделены плесневые грибы родов: Aspergillus, Rhizopus и Penicillium и три вида спорообразующих бактерий рода Bacillus, способных вызывать биоповреждения композиционных материалов. Показано, что штамм Bacillus subtilis обладает биоцидным свойством, что является перспективным для дальнейшего его изучения в качестве объекта биотехнологии.*

***Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, стеклотекстолит, биоповреждения, микроорганизмы, бактерии, плесневые грибы.*

BIODETERIORATION OF POLYMER COMPOSITES IN NORTHERN CLIMATE CONDITIONS

Saltykova A.L.[1], Erofeevskaya L.A.[2], Kychkin A.K.[3], Lukachevskaya I.G.[1,3], Dalbayeva E.A.[1,2], Vit A. A.[2]
[1]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[2]Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[3]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

***Abstract.** Using experimental fiberglass laminate specimens as an example, the ability of microorganisms (bacteria and filamentous fungi) to participate in the contamination of polymer composites is demonstrated. Filamentous fungi of the genera Aspergillus, Rhizopus, and Penicillium, as well as three species of spore-forming bacteria of the genus Bacillus capable of causing biodeterioration of composite materials, were isolated from the fiberglass specimens. It is shown that the Bacillus subtilis strain exhibits biocidal properties, which is promising for further study as a biotechnology object.*

***Keywords:** polymer composite materials, fiberglass laminate, biodeterioration, microorganisms, bacteria, filamentous fungi.*

Введение. Условия окружающей среды (ОС) определяют как степень микробной контаминации полимерных композиционных материалов (ПКМ), так и доминирующие механизмы их разрушения. При наличии оптимальных параметров температуры, влажности, аэрации и влагообмена практически все группы микроорганизмов способны вовлекаться в процессы биоповреждения ПКМ. Под биодеградацией понимают изменение химической структуры полимеров под действием биологических факторов (почвенные бактерии, плесневые и дрожжеподобные грибы, атмосферные микроорганизмы), а также физических и химических воздействий, таких как ультрафиолетовое излучение и реакционные среды в воде [1]. Данные воздействия инициируют деструкцию макромолекул с образованием низкомолекулярных соединений, которые далее включаются в метаболические пути природных биосистем [2, 3]. В большинстве случаев биодеградация протекает в аэробных условиях: бактерии и микромицеты, развиваясь в благоприятной среде, окисляют органические компоненты ПКМ до CO_2 и H_2O, формируя их как конечный продукт экологически безопасную микробную биомассу.

Цель исследования: повысить научное понимание и практическую управляемость процессов биодеградации ПКМ в условиях северного климата путем изучения взаимодействия материалов с биодеструкторами и факторами ОС.

Задачи исследования:

1. Оценить влияние микроорганизмов-биодеструкторов на контаминацию ПКМ на разных стадиях экспозиции;
2. Идентифицировать таксономический состав биодеструкторов;
3. Провести скрининг возбудителей биозаражения ПКМ с отбором перспективных штаммов для моделирования и тестовых биодеградационных испытаний в условиях северного климата.

Материалы для исследований: опытные образцы ПКМ (стеклотекстолит), экспонируемые в условиях открытого полигона климатических испытаний в городе Якутске.

Методы исследований. В работе применяли стандартные методы выделения микроорганизмов в чистую культуру, их идентификацию и изучение морфолого-культуральных и биохимических свойств с использованием световой микроскопии [4, 5, 6].

Ростовые свойства изучали классическими методами культивирования на питательных средах (агар Чапека, мясопептонный агар (МПА), среда Сабуро) промышленного производства (НПО «Агат», Оболенск, Россия).

Устойчивость ПКМ к грибковой инвазии оценивали в соответствии с действующими стандартами [7, 8, 9].

Для микроскопии использовали поляризационный микроскоп Axiolab Pol (Carl Zeiss, Германия) с объективом N-Achromat 5×/0.13 и биологический микроскоп Biomed-3 (Россия, увеличение 40–1000×).

Для анализа культивируемых микроорганизмов-деструкторов ПКМ использовали технику прямого высева смывного материала с образцов ПКМ и метод накопительного культивирования в минеральной среде [10].

Накопительное культивирование осуществляли в 250-миллиметровых колбах в 3-х повторностях. Для этого в 100 мл минеральной среды добавляли 1 грамм порошка, полученного из опытного образца стеклотекстолита, в качестве единственного источника углерода и энергии. Содержимое колб культивировали в течение 10 суток на качалке при 180 об./мин. Далее готовили десятикратные разведения в стерильном физиологическом растворе (0,85 % NaCl) с последующими высевами в нескольких повторностях на среду Сабуро, агар Чапека и МПА. Инкубацию посевов проводили при плюс 24±1 ºС. Через 24 часа фиксировали не спорообразующие бактерии; через 72 часа наблюдали рост спорообразующих бактерий, чрез 5–7 суток – плесневых грибов.

Результаты и обсуждение. Из исследованных образцов стеклотекстолита в качестве биодеструкторов выделены плесневые грибы родов (рр.): *Aspergillus, Rhizopus* и *Penicillium* и культуры спорообразующих бактерий из р. *Bacillus (B. subtilis, B. atropheus, B. cereus)*(рис. 1–2).

Рис. 1. Обрастание стеклотекстолита бактериями Bacillus atropheus и плесневыми грибами рода Rhizopus

Рис. 2. Плесневые грибы (Aspergillus и Penicillium) из накопительной культуры с порошком стеклотекстолита

Рис. 3. Лизис микробной культуры, выделенной из стеклотекстолита под влиянием Bacillus subtilis

Способность к биодеструкции ПКМ выявляли в условиях лабораторного опыта методом прозрачных зон на модифицированных средах Чапека и Сабуро, содержащих 0,5 % порошка, изготовленного из опытных образцов стеклотекстолита.

В качестве тест-культуры испытан штамм *Bacillus subtilis*, выделенный из накопительной культуры опытного образца. Установлено, что *Bacillus subtilis*, обладает способностью утилизировать, как компоненты ПКМ, так и грибные культуры, выделенные из образцов стеклотекстолита, что выражалось в появлении зон лизиса на чашках с плотными питательными средами (рис. 3).

Вывод. Методом целенаправленного скрининга из исследованных образцов стеклотекстолита в качестве микроорганизмов, способных вызвать биоповреждения ПКМ, выделены культуры плесневых

грибов рр.: *Aspergillus, Rhizopus* и *Penicillium* и спорообразующих бактерий р. *Bacillus (B. subtilis, B. atropheus, B. cereus).*

Установлено, что культура *Bacillus subtilis*, обладает способностью утилизировать, как компоненты ПКМ, так и грибные культуры, выделенные из образцов стеклотексолита, что является перспективным для дальнейшего изучения полученного штамма в качестве объекта биотехнологии.

Основные свойства выделенных микроорганизмов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Свойства выделенных микроорганизмов микроорганизмов

Свойства	*Bacllus atropheus*	*Bacillus subtilis*	*Bacillus cereus*	*Rhizopus*	*Penicillium*	*Aspergillus*
Окраска по Граму	+	+	+	-	-	-
Наличие спор	+	+	+	+	+	+
Рост аэробно	+	+	+	+	+	+
Рост анаэробно	(+)	(+)	(+)	(+)	–	–
Продуцирование каталазы	+	+	+	–	–	–
Разжижение желатиназы	+	+	+	–	–	–
Образование лецитиназы	–	–	+	–	–	+
Гидролиз крахмала	+	+	+	–	–	–
Кислота из: глюкозы	–	–	–	–	+	+
лактозы	–	–	–	–	+	–
мальтозы	–	–	–	–	+	+
маннита	–	–	–	–	+	–
ксилозы	–	–	–	–	–	–
глицерина	–	–	–	–	–	–
арабинозы	–	–	–	–	+	–
сорбита	+	–	–	–	+	–
сахароза	–	–	–	–	+	+
Лизин	–	–	–	–	–	–
Орнитин	+	–	–	–	–	–
Условные обозначения: + тест положительный; – отрицательный; (+)слабоположительный						

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0095) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Даутова А.Н., Янов В.В., Алексеев Е.И., Зенитова Л.А. Биодеградирующие полимерные композиционные материалы с использованием натурального каучука // Бутлеровские сообщения. Казань. Республика Татарстан. Россия.– [Идентификатор ссылки на объект – ROI: jbc-01/17-52-10-56]. 2017. Т.52. №10. С. 56-72.
2. Суворова А.И. Учебно-методический комплекс дисциплины «Вторичная переработка полимеров и создание экологически чистых полимерных материалов» [Электронный ресурс] / А.И. Суворова, И.С. Тюкова; Федер. агентство по образованию, Урал. гос. ун-т им. А. М. Горького, ИОНЦ «Экология и природопользование» [и др.]. Электрон. дан. (7,28 Мб). Екатеринбург: [б.и.], 2008.
3. Ухарцева И.Ю. Самодеструктируемые полимерные материалы. Пластические массы. 2009. №6. С.45-48.
4. Справочник по микробиологическим и вирусологическим методам исследования / под ред. М. О. Биргера. 3-е издание перераб. и дополненное. М.: Медицина, 1982. 464 с.
5. Руководство к практическим занятиям по микробиологии: учебное пособие / под ред. Н. С. Егорова. 3-е изд., перераб. и дополн. М.: Изд-во МГУ. 1995. 224 с.
6. Определитель бактерий Берджи / под ред. Хоулта Дж. [и др.] 9-е изд. М.: Мир. 1997. 799 с.
7. ГОСТ Р 57859-2017 «Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов».
8. ГОСТ 9.049-91 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов».
9. Плесневые грибы. Методы выделения, идентификации, хранения. Справочное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям и специальностям экологического, биологического и биотехнологического профиля. / АГТУ; Сост.: С.В. Еремеева. Астрахань, 2009. 104 с.
10. Градова Н. Б. Лабораторный практикум по общей микробиологии / Н.Б. Градова, Е.С. Бабусенко, И.Б. Горнова, Н.А. Гусарова. М.: ДеЛи принт, 2001. 131 с.

УДК 678:537.31
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-349-351

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ

Ставров Д.А. [1], *Кропотин О.В.* [1], *Соколов Д.В.* [2]
[1]ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»
[2]ФГБУН Омский научный центр СО РАН
E-mail: dstavrov@omgtu.ru

Аннотация. *В работе изучено влияние мягкого окисления многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) на электрофизические свойства композитов на основе линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП). Установлено, что окисление 30%-м пероксидом водорода очищает поверхность МУНТ от аморфного углерода, повышает их диспергируемость в полимерной матрице и изменяет тип проводимости нанотрубок. В результате обработки удельное сопротивление индивидуальных МУНТ возрастает, сопротивление ансамблей увеличивается до 25 раз, а удельное объёмное электрическое сопротивление полимерных композитов – до 81 раза по сравнению с материалами, содержащими нативные МУНТ.*

Ключевые слова: *Электропроводящие полимерные композиты, углеродные нанотрубки, линейный полиэтилен низкой плотности, функционализация, электропроводность.*

INFLUENCE OF THE DEGREE OF FUNCTIONALIZATION OF CARBON NANOTUBES ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF LINEAR LOW-DENSITY POLYETHYLENE COMPOSITES

Stavrov D.A. [1], *Kropotin O.V.* [1], *Sokolov D.V.* [2]
[1]Omsk State Technical University
[2]Omsk Scientific Center SB RAS

Abstract. *The effect of mild oxidation of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the electrophysical properties of composites based on linear low-density polyethylene (LLDPE) was studied. Oxidation with 30% hydrogen peroxide cleans the MWCNT surface from amorphous carbon, enhances their dispersibility in the polymer matrix, and alters the conductivity type of the nanotubes. As a result, the resistivity of individual MWCNTs increases, the resistivity of MWCNT ensembles rises up to 25 times, and the volume resistivity of the polymer composites increases up to 81 times compared to those containing pristine MWCNTs.*

Keyword: *Electrically conductive polymer composites, carbon nanotubes, linear low-density polyethylene, functionalization, electrical conductivity.*

Введение. Электропроводящие полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в современных технических системах [1–2]. Одним из наиболее эффективных наполнителей для создания электропроводящих композитов являются многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) [3–4]. В качестве полимерной матрицы нередко используется линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП), характеризующийся сравнительно низким модулем упругости и высокой текучестью расплава [5]. МУНТ могут применяться как в исходном (нативном) виде, так и после функционализации, направленной на улучшение их распределения в полимере [6].

Наиболее распространённым методом функционализации является окисление, обеспечивающее удаление аморфного углерода и примесей с поверхности МУНТ. В то же время окисление приводит к увеличению содержания функциональных кислородсодержащих групп на поверхности МУНТ, что неоднозначно влияет на функциональные свойства ПКМ. С одной стороны, окисление МУНТ повышает степень их диспергирования в матрице, с другой стороны, повышает контактное сопротивление между МУНТ. Интенсивность окисления существенно влияет на морфологию и электрофизические характеристики нанотрубок: мягкое окисление не разрушает их кристаллическую структуру, тогда как сильное приводит к укорачиванию МУНТ и повышению дефектности внешнего слоя нанотрубок [7].

Формирование электропроводности ПКМ с МУНТ происходит на нескольких структурных уровнях: 1) индивидуальные нанотрубки; 2) перколяционные цепочки из МУНТ, контактирующих между

собой; 3) полимерный композит, наполненный МУНТ. Электрическое сопротивление композита определяется совокупностью факторов – проводимостью отдельных МУНТ, межтрубным сопротивлением при физическом контакте и туннельным сопротивлением через полимерный слой [3].

Сведения о влиянии окисления на электропроводность ПКМ остаются противоречивыми: в одних исследованиях фиксируется снижение проводимости после обработки МУНТ [8], в других – её повышение [9]. Это различие может быть связано с исходным типом проводимости МУНТ и типом проводимости после окисления, а также с изменением межтрубного сопротивления при модификации поверхности. При выборе степени окисления нанотрубок важно учитывать баланс между повышением диспергируемости МУНТ в полимерной матрице и ростом межтрубного сопротивления.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись многостенные углеродные нанотрубки марки МУНТ-1 (Институт катализа им. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия), а также композиционные материалы на основе ЛПЭНП марки RM3845UV (Казаньоргсинтез, Казань, Россия), содержащие 5 масс. % МУНТ-1. Исследовались ненаполненный ЛПЭНП и композиции, содержащие аналогичное количество МУНТ, подвергнутых различной обработке.

Рассматривались исходные МУНТ-1, а также обработанные в 30 % растворе пероксида водорода. Обработка проводилась при комнатной температуре перемешиванием на воздухе в весовом соотношении 1:1 с одновременным ультразвуковым воздействием продолжительностью 0,5 ч и 24 ч. После обработки МУНТ отделяли методом микрофильтрации, промывали дистиллированной водой и высушивали в муфельной печи при 70 °C и давлении около 1 Па в течении 24 ч.

Приготовление композиционных смесей осуществляли в шаровой мельнице при скорости вращения барабана 200 об/мин в течение 60 мин. Полученные смеси подвергали двукратному экструдированию на лабораторном одношнековом экструдере Scamex Rheoscam Micro-extruder. Гранулят получали с использованием гранулятора Scamex Granulateur Fraise. Из полученных гранул методом литья под давлением на термопластавтомате МиниТПА-100 формировали образцы для лабораторных исследований.

Для индивидуальных МУНТ проводили определение работы выхода электронов методами проводящей атомно-силовой микроскопии и электростатической силовой микроскопии согласно методике, описанной в работе [10]. Дополнительно изучалось электрическое сопротивление в атмосфере различных газов для установления типа проводимости исходных и обработанных МУНТ.

Для ансамбля МУНТ проводили рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС), ИК-Фурье спектроскопию, просвечивающую электронную микроскопию, измеряли удельное сопротивление.

Удельное объемное электрическое сопротивление полимерных композитов измеряли с помощью милли-тераомметра Milli TO-3 в соответствии с ASTM D 991-89. Морфология поверхности композитов исследовалась методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Jeol JCM-5700.

Результаты. В ходе проведённых исследований определён тип проводимости исходных МУНТ и выявлено влияние степени их окисления на электрофизические характеристики. Установлено, что нативные МУНТ обладают проводимостью p-типа, обусловленной присутствием на поверхности аморфного углерода и кислородсодержащих функциональных групп [11].

После мягкого окисления в растворе пероксида водорода наблюдается снижение работы выхода электронов, что сопровождается сдвигом уровня Ферми в зону проводимости, обусловленным изменением соотношения концентраций электронов и дырок. Согласно результатам РФЭС, обработка МУНТ пероксидом водорода приводит к увеличению содержания кислорода на их поверхности. Результаты ИК-Фурье спектроскопии показали уменьшение содержания C-O-C групп в окисленных МУНТ, что свидетельствует об удалении аморфного углерода с поверхности нанотрубок в процессе окисления. Установлено, что с ростом степени окисления, сопровождающимся увеличением содержания кислорода на поверхности нанотрубок, удельное сопротивление ансамблей окисленных МУНТ возрастает до 25 раз по сравнению с исходными [11].

Анализ морфологии композитов методом растровой электронной микроскопии показал, что характер распределения МУНТ в полимерной матрице существенно изменяется при их функционализации. Для композитов с нативными нанотрубками наблюдается наличие крупных агломератов, распределённых по объёму матрицы. В случае использования окисленных МУНТ формируется структура, в которой нанотрубки образуют цепочечные проводящие сети и тяжи из отдельных элементов. Такое изменение морфологии свидетельствует об повышении диспергируемости МУНТ в полимерной матрице.

Функционализация МУНТ приводит к увеличению удельного объёмного электрического сопротивления композитов до 81 раза относительно образцов с нативными нанотрубками [11]. Таким образом, установлена зависимость между степенью окисления и электрофизическими характеристиками

композитов. Несмотря на значительный рост сопротивления, полученные материалы остаются в классе электропроводящих полимерных композитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (код проекта FSGF-2024-0003).

Список литературы

1. Pang H., Xu L., Yan D.-X., Li Z.-M. Conductive polymer composites with segregated structures // Progress in polymer science. 2014, vol.39(11), pp.1908–1933. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.007
2. Рагушина М. Д., Евсеева К. А., Калугина Е. В., Ушакова О. Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // Пластические массы. 2021. № 3–4, 6–9. https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-3-4-6-9
3. Kanoun O., Bouhamed A., Ramalingame R., Bautista-Quijano J. R., Rajendran D., Al-Hamry A. Review on conductive polymer/CNTs nanocomposites based flexible and stretchable strain and pressure sensors // Sensors. 2021, vol.21, p.341. https://doi.org/10.3390/s21020341
4. Hu Z., Hong H., Review on material performance of carbon nanotube-modified polymeric nanocomposites // Recent progress in materials. 2023, vol.5, pp.1–20. http://doi.org/10.21926/rpm.2303031
5. Shi S., Xu W., Zhou B., Qin S., Liu X., Li H., Low-density polyethylene-multi-walled carbon nanotube nanocomposite membranes with enhanced conductivity for highly sensitive vapor sensing. // Adv. Compos. Hybrid Mater. 2023, vol.168. https://doi.org/10.1007/s42114-023-00748-8
6. Rathinavel S., Priyadharshini K., Panda D., A review on carbon nanotube: An overview of synthesis, properties, functionalization, characterization, and the application. // Mater. Sci. Eng., 2021, vol.268, p.115095. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115095
7. Golovakhin V., Kim E.Y., Novgorodtseva O.N., Maksimovskiy E.A., Ukhina A.V., Ishchenko A.V., Bannov A.G., Treatment of multi-walled carbon nanotubes with dichromic acid: oxidation and appearance of intercalation, // Membranes 2023, vol.13, p.729. https://doi.org/10.3390/membranes13080729
8. I. Mazov, V.L. Kuznetsov, I.A. Simonova, A.I. Stadnichenko, A.V. Ishchenko, A.I. Romanenko, E.N. Tkachev, O.B. Anikeeva, Oxidation behavior of multiwall carbon nanotubes with different diameters and morphology // Appl. Surf. Sci. 2012, vol.258, pp.6272–6280. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.021
9. C.H. Lau, R. Cervini, S.R. Clarke, M.G. Markovic, J.G. Matisons, S.C. Hawkins, C.P. Huynh, G.P. Simon, The effect of functionalization on structure and electrical conductivity of multi-walled carbon nanotubes // J. Nanopart. Res. 2008, vol.10, pp.77–88. https://doi.org/10.1007/s11051-008-9376-1
10. Davletkildeev N. A., Stetsko D. V., Bolotov V. V., Stenkin Y. A., Korusenko P. M., Nesov S. N. Determination of work function in the individual carbon nanotubes using electrostatic force microscopy // Material Letters. 2015, vol.161, pp.534–537. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.09.045
11. Rogachev E., Kropotin O., Nesov S., Sokolov D., Trenikhin M., Danshina V., Stavrov D., Egorova V., Russkikh G. Influence of multi-walled carbon nanotubes oxidation on the electrophysical properties of composites based on linear low-density polyethylene at different structural levels // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. 2025, vol.33(11), pp.1108–1116. https://doi.org/10.1080/1536383X.2025.2490719

УДК 691.175.5/.8: 535.6
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-352-356

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Терешкин А.Л., Лукачевская И.Г., Низин Д.Р.
ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: aistereshkin@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования изменений колориметрических характеристик эпоксидных полимеров, экспонированных в условиях экстремально холодного климата г. Якутска. Объектом исследования выступали окрашенные композитные образцы на основе эпоксидной смолы Этал-247 с различными отвердителями и пигментными добавками. Оценка цветовых изменений проводилась на основе модели CIE Lab с использованием метрики ΔE2000. Эксперимент показал, что интенсивность цветовых изменений возрастает с увеличением солнечной радиации, особенно в весенне-летний период. Образцы с отвердителем Этал-45TZ2 и с зеленым красителем Этал-М7 проявили наибольшую чувствительность к воздействию климатических факторов, демонстрируя выраженные оптические изменения. Результаты подтверждают, что фотодеструктивные процессы, инициируемые ультрафиолетовым излучением, играют ключевую роль в деградации полимерной матрицы. Установленные закономерности позволяют рекомендовать корректировку состава эпоксидных покрытий с учетом пигментного наполнения для повышения их устойчивости к внешним климатическим воздействиям в условиях Крайнего Севера.

Ключевые слова: *эпоксидные полимеры, колориметрия, цветовые характеристики, климатические испытания, фотодеструкция.*

STUDY OF THE COLORIMETRIC CHARACTERISTICS OF EPOXY POLYMERS IN EXTREMELY COLD CLIMATE CONDITIONS

Tereshkin A.L., Lukachevskaia I.G., Nizin D.R.
Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»

Abstract*. This study presents the results of an investigation into the colorimetric changes of epoxy polymers exposed to the extreme cold climate of Yakutsk. The research focused on pigmented composite samples based on Etal-247 epoxy resin with various hardeners and color additives. Color changes were evaluated using the CIE Lab model and the ΔE2000 metric. The experimental results demonstrated a progressive increase in color variation correlated with rising solar radiation, particularly during the spring and summer months. Samples containing M7Z pigment and Etal-45TZ2 hardener exhibited the highest sensitivity to environmental exposure, showing pronounced optical degradation. The findings confirm that photodegradation processes induced by ultraviolet radiation are a major factor in polymer matrix deterioration. These insights support the need to optimize epoxy formulations–particularly pigment composition–for improved durability and stability in severe northern climatic conditions.*

Keyword: *epoxy polymers, colorimetry, color characteristics, climate testing, photodegradation.*

Введение. Полимерные материалы, созданные на основе синтетических смол, находят широкое применение благодаря своим высоким эксплуатационным свойствам. Однако у них есть существенный недостаток – низкая устойчивость к климатическим воздействиям, особенно к ультрафиолетовому излучению, что приводит к ухудшению цвета и характеристикам материалов [1, 2].

Старение полимеров – это сложный процесс, включающий физические и химические изменения. На него влияют внутренние свойства материала, а также температура, влажность, солнечная радиация и атмосферные загрязнители. Изменения цвета начинаются уже через несколько месяцев после установки и связаны с фотоокислительными реакциями в верхних слоях полимера [3, 4]. Важно отметить, что скорость деградации зависит не только от силы солнечного излучения, но и от цвета поверхности материала образцов [5, 6]. Климатические факторы не только ухудшают основные свойства изделий, но и изменяют их внешний вид. Все эти факторы проявляются в потере блеска, изменении оттенка и неравномерности цвета [4, 7].

Например, в работе [8] показано, что старение эпоксидных материалов под воздействием солнечного излучения связано с фотоокислительной деструкцией. Ультрафиолетовое излучение, имеет энергию, которая достаточна для разрушения химических связей приводящая к деградации материала и изменению колориметрических показателей.

Изучение изменения колориметрических характеристик полимерных материалов представляет актуальную задачу, решение которой позволит повысить не только долговечность, но и эксплуатационную надежность.

Основная часть. В качестве исследуемых образцов использовались плоские панели размером 100×100 мм. Образцы изготовлены на основе эпоксидной смолы марки Этал-247 с применением отвердителей Этал-45TZ2 – образец A1_45TZ2, и 2 образца M7 и M73 с отвердителем Этал-M7 модифицированный с зелёным красителем. Все компоненты (смола и отвердители) произведены АО «ЭНПЦ Эпитал». Натурные испытания проводились на открытой климатической площадке испытательного полигона Института физико-технических проблем Севера СО РАН в городе Якутске. Образцы были установлены на открытых стендах под углом 45° к горизонту с ориентацией на юг. Монтаж осуществлён 3 декабря 2024 года – в период минимальной солнечной активности. Информация о солнечной радиации (в МДж/м²) предоставлена Якутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Рис. 1. Установленные образцы на открытом полигоне в г. Якутске

Сканирование лицевой поверхности для последующей оценки образцов проводилось с интервалом раз в 3–4 дня с программным анализом цветовых координат, яркости и цветового различия. Сканирование осуществлялось планшетным сканером высокого разрешения CanoScan LIDE 400 без применения коррекции и сглаживания изображения.

Расчёт значения цветового различия Delta E (ΔE) осуществлялся с использованием специально разработанного программного обеспечения на языке Python с применением библиотек обработки изображений, таких как skimage.color. В качестве модели цветового пространства была выбрана CIE Lab, поскольку она обеспечивает интерпретацию цветовых различий, наиболее близкую к восприятию человека, что делает данный подход информативным для оценки устойчивости цвета полимерных покрытий.

Оцифрованные изображения сканов преобразовывались из формата RGB в координаты цветового пространства CIE Lab, после чего рассчитывалась величина цветового различия ΔE_{00} по формуле (1) [9, 10]. На тепловых картах (рис. 2–4) визуализированы области наиболее выраженных изменений: тёмные зоны указывают на незначительное или отсутствие цветового сдвига, в то время как окрашенные области соответствуют участкам с максимальными изменениями цветовых характеристик.

Координаты в цветовом пространстве L*a*b*, представлены в виде Color1= $(L_1^*,\ a_1^*,\ b_1^*)$ и Color2=$(L_2^*,\ a_2^*,\ b_2^*)$, где L* – яркость; a* и b* – координаты зелёного, красного, синего и жёлтого. Более современная формула ΔE2000 (1) включает различия не только по яркости (L*), но и хроматичности – насыщенность цвета (C*), оттенок или цветовая тональность (H*) и также фактор коррекции (R_T):

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_c S_c}\frac{\Delta H'}{k_H S_H}}, \quad (1)$$

где коэффициенты обычно взяты для наглядности $k_L=k_C=k_H=1$.

Фактор коррекции R_T (2) учитывает взаимодействие изменения насыщенности и оттенка в областях голубовато-фиолетовых тонов, где различия минимальны.

$$R_T = -R_c \sin(2\Delta\theta) \quad (2)$$

где R_C – зависит от хроматичности двух сравниваемых цветов. Δθ (3) является вспомогательным углом, служащим для корректировки влияния голубовато-фиолетового оттенка, где синус функции обеспечивает ту самую «вращающую» коррекцию на 275°:

$$\Delta\theta = 30°\exp\left(-\left(\frac{H'-275°}{25°}\right)^2\right), \quad (3)$$

Насыщенность (4) в цветовых пространствах CIE Lab является неформализованной величиной и больше показывает отсутствие или минимизация примесей других тонов

$$\Delta C = \sqrt{(a_2^2 + b_2^2)} - \sqrt{(a_1^2 + b_1^2)}, \quad (4)$$

Разница по цветовой тональности (5) – это направление вектора цветности, то есть вектора на диаграмме цветности с началом в точке белого и концом в данной цветности. Именно тон определяет название цвета, например «красный», «синий», «зелёный».

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'}\,\sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right), \quad (5)$$

На рисунках 2–4 видны изменения цвета, которые показывают, как менялись колориметрические свойства образцов на протяжении всего времени экспонирования. Верхний ряд изображений демонстрирует, оттенки образцов в разные даты по сравнению с их исходным состоянием. Нижний ряд – это карты цветовых различий (ΔE_{00}), вычисленные относительно начального состояния.

Воздействие солнечного излучения, является одним из основных факторов старения, разрушения, деградации полимерных покрытий и является инициирующим начальные процессы фотоокислительной деструкции [11].

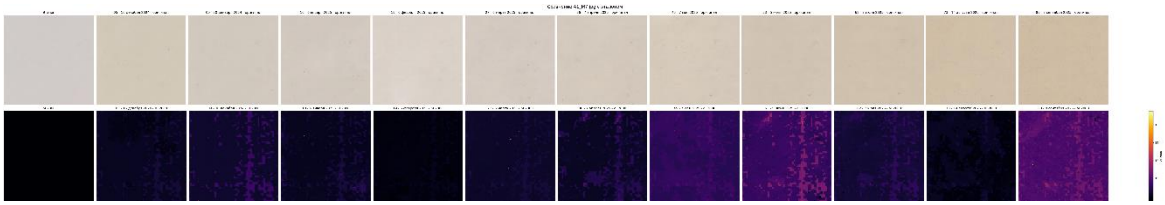


Рис. 2. Изменение цвета и тепловая карта после экспонирования M7

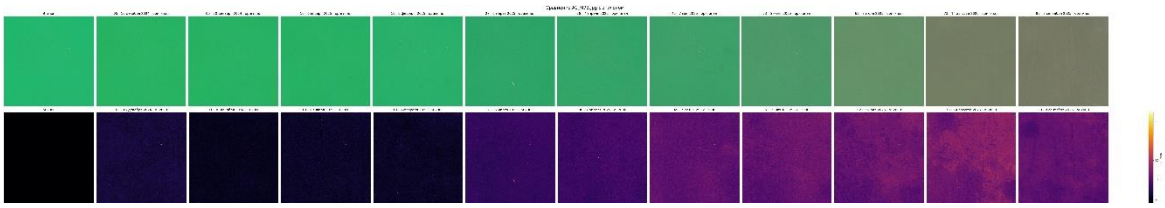


Рис. 3. Изменение цвета и тепловая карта после экспонирования M73

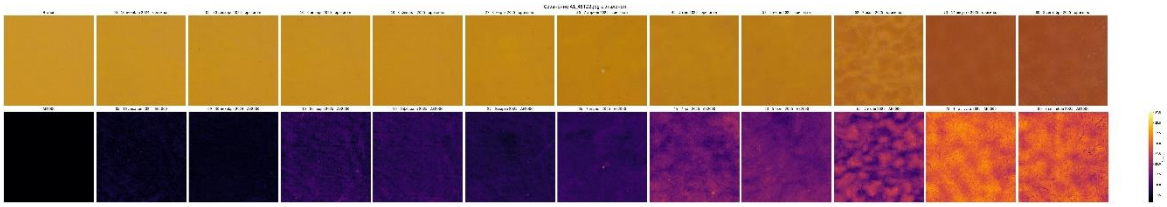


Рис. 4. Изменение цвета и тепловая карта после экспонирования 45TZ2

Анализ тепловых карт показывает, что у образцов M73 и 45TZ2 наблюдается выраженная неравномерность цветовых изменений по поверхности, которая проявляется высокой интенсивностью изменения цвета. Это свидетельствует об ускоренном характере деградации материала. В то же время, образец M7 демонстрирует цветовую невысокую активность по сравнению с другими образцами, не проявляя признаков ярко выраженной оптической деградации.

Динамика изменений цветового различия ΔE_{00} в сопоставлении с накопленной солнечной радиацией представлена на рисунке 5. Полученные данные свидетельствуют о наличии чёткой зависимости между ростом солнечной активности и увеличением значений ΔE. С марта отмечается существенное повышение уровней прямой солнечной радиации, что сопровождается резким увеличением цветовых

различий, особенно у образцов M73 и 45TZ2. Эти образцы демонстрируют скачкообразный характер изменений, достигая пиковых значений в завершающей фазе экспозиции. При этом поведение образца M7 характеризуется более плавной динамикой без резких колебаний, что может свидетельствовать о его более высокой устойчивости к воздействию климатических факторов. Наблюдаемая зависимость между значениями ΔE и интенсивностью солнечной радиации подтверждает наличие корреляции между уровнем инсоляции и степенью оптической деградации материалов.

На рисунке 5 график показывает динамику изменения величины ΔE для трех исследуемых образцов (45TZ2, M7, M73) в течение периода экспозиции на фоне изменения суммарной солнечной радиации. Динамика изменения цвета 45TZ2 и M73 коррелирует с ростом солнечной радиации. Такая зависимость указывает на высокую чувствительность данных образцов к воздействию солнечной радиации, что может свидетельствовать о прямом влиянии фототермических процессов на изменение их структурных или энергетических характеристик.

В отличие от них, образец M7 демонстрирует относительно стабильное поведение параметра ΔE, с постепенным и плавным увеличением без резких пиков даже при значительном росте уровня радиационной энергии. Это говорит о низкой чувствительности данного образца к воздействию солнечной радиации, что, связано с физико-химической или структурной устойчивостью материала, минимизирующей влияние внешних энергетических факторов.

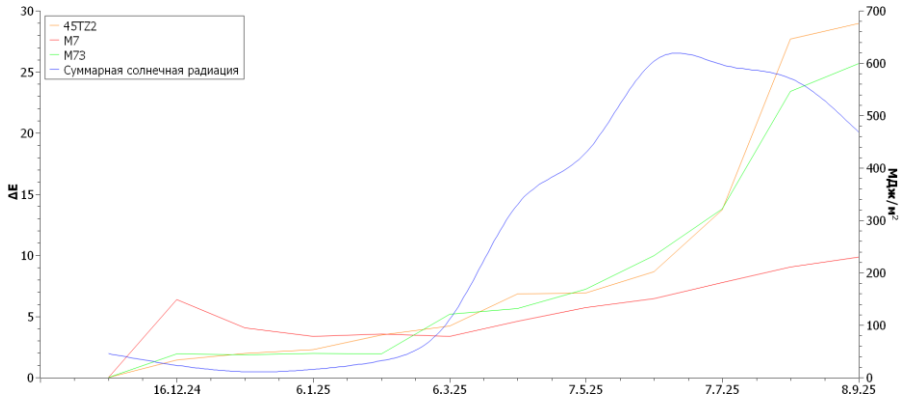


Рис. 5. Динамика изменения ΔE00 и суммарная солнечная радиация

Таким образом, представленные результаты показывают, что солнечная радиация является доминирующим фактором в изменении цветовых характеристик покрытий.

Заключение. Полевые испытания эпоксидных композитов, проведённые в условиях экстремально холодного климата (г. Якутск), позволили выявить характер изменения их цветовых свойств под воздействием солнечного излучения. Установлено, что при длительном экспонировании на открытом воздухе на поверхности образцов происходят значительные цветовые изменения, свидетельствующие об активных процессах разрушения полимерной матрицы.

Анализ цветовых характеристик в системе CIE Lab с использованием метрики ΔE_{00} показал, что наибольшие изменения наблюдаются у образцов, содержащих пигмент M73 и отвердитель Этал-45TZ2, особенно в летний период. Это указывает на высокую чувствительность данных композиций к внешним климатическим факторам, таким как ультрафиолетовое излучение, температурные перепады и атмосферные осадки, что способствует снижению оптической стабильности и эксплуатационной надёжности покрытия.

Тепловые карты цветовых различий выявили пространственную неоднородность процессов фотодеградации: в ходе экспозиции формируются локальные зоны с повышенными значениями ΔE_{00}, площадь и интенсивность которых увеличиваются со временем.

Максимальная интенсивность цветовых изменений зафиксирована на завершающих стадиях экспонирования и демонстрирует прямую корреляцию с сезонным ростом солнечной радиации. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава эпоксидных композитов, в частности – выбора пигментов и отвердителей, с целью повышения их устойчивости к климатическим воздействиям в условиях Крайнего Севера и продления срока службы декоративно-защитных покрытий.

Благодарности. Исследования выполнены при финансировании Государственного задания FWRS-2024-0095.

Список литературы

1. Ehrenstein G., Pongratz S. Resistance and Stability of Polymers. Ohio: Hanser Publications, 2013. 1454 p.
2. Павлов И. Н., Мелкумов А. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. Москва: Химия, 1982. 220 с.
3. Environmental degradation of epoxy-organoclay nanocomposites due to UV exposure. Part I: Photo-degradation / R. S. C. Woo, H. Zhu, C. K.Y. Leung, J. Kim // Compos. Sci. Technol. 2007, vol.67, no.15–16, pp.3448–3456.
4. Низина Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. 258 с.
5. Моделирование влияния актинометрических параметров на изменение декоративных характеристик эпоксидных композитов, экспонированных в натурных условиях / Т. А. Низина, В. П. Селяев, Д. Р. Низин, А. Н. Чернов // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 2. С.27–36.
6. Влияние цвета эпоксидных композитов на изменение колориметрических характеристик в процессе натурного экспонирования / Т. А. Низина, А. Н. Чернов, Д. Р. Низин, А. И. Попова // Вестник МГСУ. 2016. №7. С.67–80.
7. Сулейманов А.М. Прогнозирование долговечности материалов проекционными математическими методами / А.М. Сулейманов, А.Л. Померанцев, О.Е. Родионова // Известия КазГАСУ. 2009. №2(12). С.274-278.
8. Рэнби Б. Фотодеструкция, фотоокисление, фотостабилизация полимеров / Б. Рэнби, Я. Рабек. М.: Мир, 1978. 675 с.
9. Sharma, G., Wu, W. and Dalal, E.N. (2005), The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. Color Res. Appl., 30: 21-30.
10. Mokrzycki, Wojciech & Tatol, Maciej. (2011). Color difference Delta E – A survey. Machine Graphics and Vision, vol.20, p.383-411.
11. Руднев, В. П. Влияние окружающей среды влажных субтропиков на цветовые характеристики защитных полимерных покрытий / В. П. Руднев // Системы контроля окружающей среды. 2020. №3(41). С.56-64.

УДК 620.178.169
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-357-360

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Федоров Ю.Ю., Буренина О.Н.
Институт проблем нефти и газа СО РАН
E mail: yuristan@yandex.ru, bon.ipng@mail.ru

Аннотация. *Разработана методика для определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии. Для осуществления требований методики был разработана установка, позволяющая проводить испытания при разных скоростях и углах воздействия гидроабразивной среды на образец. Исследования износостойкости различных материалов и покрытий по разработанной методике помогут выбору наиболее износостойких материалов или разработке новых составов.*

Ключевые слова: *износостойкость, гидроабразивная среда, угол атаки, скорость, массовый износ, линейный износ.*

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE WEAR RESISTANCE OF MATERIALS AND COATINGS UNDER HYDROABRASIVE EFFECT

Fedorov Yu.Yu., Burenina O.N.
Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

Abstract. *A methodology for determining the wear resistance of materials and coatings under hydroabrasive cutting has been developed. To implement the methodology's requirements, a setup was developed that allows testing at various speeds and angles of impact of various hydroabrasive media on the sample. Tests on model materials showed consistent results with published data. Research on the wear resistance of various materials and coatings using the developed methodology will help select the most wear-resistant materials or adjust the formulations being developed.*

Keyword: *wear resistance, hydroabrasive environment, angle of attack, speed, mass wear, linear wear.*

Защита от гидроабразивного воздействия является одной из актуальных задач повышения долговечности деталей машин, механизмов и технологического оборудования, эксплуатирующихся в горнодобывающей промышленности, особенно в процессах переработки и обогащения минерального сырья. Определение показателей стойкости защитных материалов и покрытий к гидроабразивному воздействию в лабораторных условиях является необходимым условием выбора наиболее перспективных рецептурных составов для их дальнейшего применения.

В данной работе предложена методика определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном износе. Для проведения испытаний была разработана установка для определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии, схематично представленная на рисунке 1.

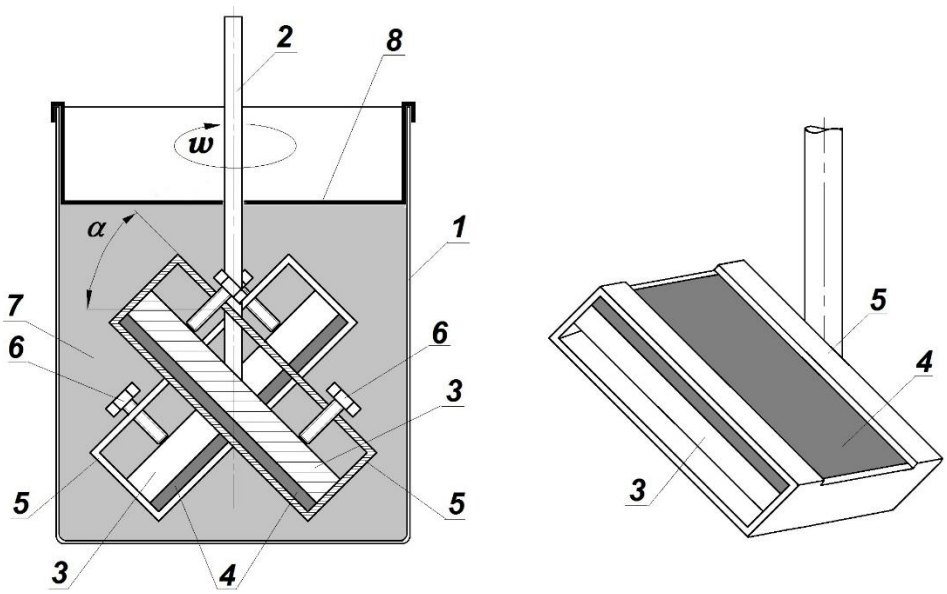


Рис. 1. Принципиальная схема устройства

Устройство содержит сосуд 1 с крышкой 8, в котором вращается смеситель, состоящий из вала 2, к которому прикреплены две лопасти 3. Образцы 4, изготовленные из исследуемого материала или покрытия, нанесенного на подложку, закреплены креплениями 5 при помощи болтов 6 к лопастям смесителя. Гидроабразивная смесь 7 заполняет внутреннее пространство сосуда. В комплект устройства входят смесители с разными углами α наклона лопастей относительно плоскости дна сосуда. Смеситель приводится в вращательное действие при помощи вертикального фрезерного или сверлильного станка с регулятором скорости.

Образцы материалов размером 30*45 мм изготавливаются путем вырезания из пластин толщиной до 10 мм. Образцы покрытий изготавливаются путем нанесения на металлические подложки размером 30*45 мм, толщиной до 10 мм по принятым технологиям исследуемого материала.

Подготовка к проведению экспериментов.

– измерение исходной массы образцов материалов и покрытий с подложками (погрешность не более 0,1 мг);

– измерение начальной толщины образцов материалов и покрытий (погрешность не более 10 мкм);

– гидроабразивная среда готовится путем смешения абразивной составляющей с водой, концентрация абразивных частиц в воде определяется путем взвешивания.

Испытания проводятся следующим образом:

– образец закрепляют на лопасти (с определенным углом наклона) смесителя;

– сосуд закрепляется на станине сверлильного станка;

– смеситель закрепляют в патроне сверлильного станка с зазором, превышающим дисперсность абразивных частиц в 2 и более раз;

– сосуд наполняют гидроабразивной средой с заданной концентрацией и размерностью абразивных частиц;

– сосуд закрывают крышкой;

– задается необходимые скорость вращения смесителя и продолжительность испытаний (продолжительность испытаний должна обеспечивать изнашивание образцов, превышающее величину погрешности измерений массы или линейного размера, более чем в 10 раз);

– по окончании испытаний образцы снимаются с лопастей смесителя, промываются в проточной воде для удаления абразивных частиц с поверхности и конденсируются при заданных температуре и времени;

– масса и линейные размеры образцов после испытаний определяются для каждого угла наклона лопасти (угла атаки), предусмотренных программой испытаний материалов и покрытий;

– интенсивности массового и линейного износа (в относительных единицах) образцов материалов и покрытий определяются как среднее арифметическое по испытаниям шести образцов, проведенных при одинаковых условиях, по формулам:

$$I_m = \frac{\Delta m}{m_1} * 100 = \frac{m_1 - {}_2}{m_1} * 100 \quad (1)$$

$$\mathrm{I_I} = \frac{\Delta \mathrm{I}}{\mathrm{I_1}} * 100 = \frac{\mathrm{I_1} - \mathrm{I_2}}{\mathrm{I_1}} * 100 \quad (2)$$

I_m – интенсивность массового износа, отн.ед.;

Δm – разница массы образцов до и после испытаний, мг;

m_1 – массы образцов до испытаний, мг;

m_2 – массы образцов после испытаний, мг;

I_I – интенсивность линейного износа, отн.ед.;

ΔI – разница линейного износа образцов до и после испытаний, мкм;

I_1 – линейный размер образцов до испытаний, мкм;

I_2 – линейный размер образцов после испытаний, мкм.

Для апробации разработанных методики и установки были проведены испытания модельных образцов материалов из листового полипропилена (ПП) и стали марки Ст1Кп2 (Ст).

Для проведения испытаний были выбраны следующие параметры:

- гидроабразивная среда представляла собой смесь 60 массовых % карбида кремния с дисперсностью частиц 1–3 мм и 40 массовых % воды;

– скорость вращения смесителя с образцами – 400 об/мин;

– продолжительность испытаний – 60 мин.

На рисунке 2 представлены результаты потери массы образцов в зависимости от величины угла атаки гидроабразивной среды.

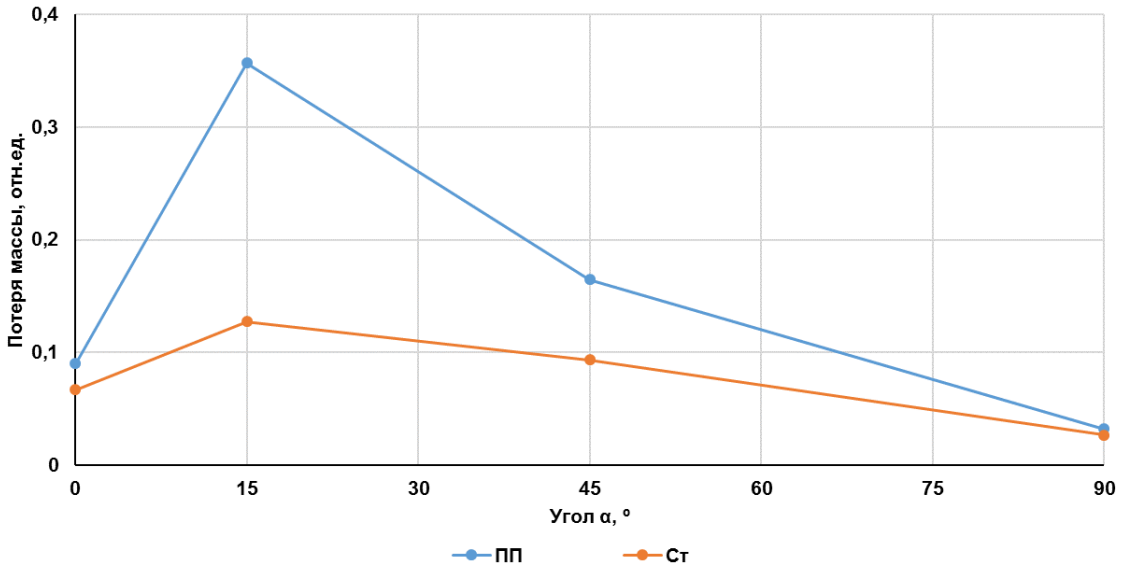


Рис. 2. Результаты потери массы модельных материалов относительно углов атаки гидроабразивной среды. ПП – полипропилен; Ст – сталь Ст1 Кп2

Установлено, что при угле атаки гидроабразивной среды 15° образцы имеют более высокую степень износа по сравнению с аналогичными показателями при углах атаки равных 45 ° и 90 °. При этом образцы из стали (Ст) показали более высокую износостойкость относительно образцов из полипропилена (ПП) – 0,12 отн.ед против 0,35 отн.ед.

Кроме того, стоит отметить, что у испытанных образцов из полипропилена на их изношенной поверхности наблюдалось изменение цвета материала вследствие проникновения абразивных частиц. Данный факт также был установлен в других работах [1-4] по исследованию гидроабразивостойкости полимерных материалов. Внедрение частиц абразива внутрь материала во время гидроабразивного испытания характерно для более пластичных полимерных материалов. По этой причине при увеличении угла атаки абразивной среды получаются близкие по значениям показатели износа. Об этом свидетельствуют результаты испытаний при углах атаки 45° (0,16 отн.ед. (ПП) и 0,09 отн.ед. (Ст)) и 90° (0,03 отн.ед. (ПП) и 0,02 отн.ед. (Ст)). В таких случаях определить значение износа по изменению массы и линейного размера довольно трудно. Для решения этой проблемы предлагаются применять

различные подходы. Например, при обработке результатов испытания учитывать плотность исследуемого материала и объем перекачиваемой гидросмеси, либо определять износ материала по деформированному объему, либо оценивать гидроабразивостойкость материала по зависимости износа от скорости потока гидросмеси и т. д. [1, 5–8].

Результаты испытаний показали работоспособность предложенных методики оценки гидроабразивостойкости материалов и покрытий и установки для ее реализации. Разработанная методика может быть применена как экспресс анализ для предварительной сравнительной оценки исследуемых образцов, так как не требует большого объема перекачиваемой гидросмеси и длительных испытаний. Исследования износостойкости различных материалов и покрытий на разработанной установке помогут выбору наиболее износостойких материалов или корректировке разрабатываемых рецептурных составов для конкретных условий эксплуатации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2025-0045 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН.

Список литературы

1. Патент РФ 166009 U1 Устройство для исследования износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии. / Попов С.Н., Антоев К.П., Герасимов А.И., Заровняев Б.Н. // Бюл. №31. 10.11.2016
2. Скребнев В. И., Сержан С. Л., Калугина Е.В. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем // Пластические массы. 2020. №9-10. С.40-44.
3. Klaus Frisdrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball blasting // Journal of Materials Science. 1986, vol.21(9), pp.3317-3332.
4. Barkoula N-M., Karger-Kocsis J. Review. Processes and influencing parameters of solid particle erosion of polymers and their composites// Journal of materials science. 2002, no.37, pp.3807-3820.
5. Zhang S.W., Wang Deguo, Yin Weihua. Investigation of abrasive erosion of polymers // Journal of materials science. 1995, no.30, pp.4561-4566.
6. Пенкин Н.С., Копченков В.Г. и др. Гуммированные детали машин. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2013. 245 с.
7. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. Изд. 3, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 293 с.
8. Борохович А.И. и др. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования. Новокузнецк, 1968. 148 с.

СЕКЦИЯ 6. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС И ТЕРМОМЕХАНИКА ДИСПЕРСНЫХ И НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 536.2.08
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-361-364

ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ ЗИМНЕЙ ВЕРХНЕЙ ОДЕЖДЫ

Андреев А.С., Большев К.Н., Малышев А.В.
ФИЦ «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова» СО РАН
E-mail: asandreev92@mail.ru

Аннотация. *Статья посвящена измерению сопротивления теплопередаче детской верхней одежды. И ее пригодность к применению в суровых климатических условиях Республики Саха (Якутия) в зимнее время. Насколько сохраняет тепло и оберегает тех, кто будет носить куртки данного производителя от обморожений и гипотермии. В качестве метода исследования применялся стационарный метод измерения теплопроводности, путем установки преобразователей теплового потока с теплой и холодной сторон. За холодную сторону взято -35 градусов по Цельсию в климатической камере «Binder» создающее разность температур для измерения теплового потока.*

Ключевые слова: *теплопроводность, сопротивление теплопередаче, зимняя одежда, тепловой поток.*

ASSESSMENT OF THE THERMAL PROTECTIVE PROPERTIES OF WINTER OUTERWEAR SAMPLES

Andreev A.S., Bolshev K.N., Malyshev A.V.
FRC «Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Larionova» SB RAS

Abstract. *The article is devoted to measuring the heat transfer resistance of children's outerwear. And its suitability for use in the harsh climatic conditions of Republic of Sakha (Yakutia) in winter. How much retains heat and protects those who will wear jackets of this manufacturer from frostbite and hypothermia. As a research method, a stationary method of measuring thermal conductivity was used by installing heat flux converters on warm and cold sides. The cold side is taken as -35 degrees Celsius in the Binder climate chamber, which creates a temperature difference for measuring heat flux.*

Keyword: *thermal conductivity, heat transfer resistance, winter clothing, heat flow.*

Зимние климатические условия Севера проверяют человека на прочность и выносливость. Каждый год с обморожениями конечностей и общей гипотермией поступают в Ожоговое отделение РБ №2 ЦЭМП около 200 человек. Зимой температура окружающего воздуха доходит до – 55…- 60 °С. За счет снижения температуры и переохлаждения организма падает оборонительная способность иммунитета против вирусов, что особенно важно для детей. Теплая детская верхняя одежда становится актуальным вопросом перед родителями. Нами выполнена задача, испытать зимнюю детскую верхнюю одежду двух образцов на сопротивление теплопередаче. Для проведения испытаний предоставлены два образца зимней детской верхней одежды (рис. 1).

Рис. 1. Образцы курток детских зимних «SUPER» и «ЯКУТИЯ»

Структура материала курток: 10к/10к мембрана – утеплитель «Холстон преимум» – подкладка «Искусственный мех».

Испытания образцов на сопротивление теплопередаче проводились с использованием следующего оборудования:

1) Климатическая камера Binder МК-53, Германия.
2) Преобразователи теплового потока ДТП-05, Россия.
3) Преобразователь сигналов «Теркон» производства фирмы «Термэкс», г. Томск.

Для установки образца в переднюю граничную плоскость камеры был изготовлен экран из экструдированного полистирола размером 550 мм на 550 мм с окном в середине для установки образцов.

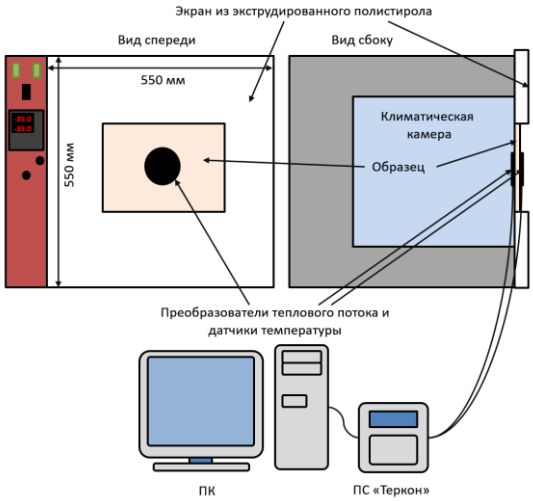


Рис. 2. Схема измерительной установки

На образец с двух сторон были закрепляются преобразователи теплового потока (ПТП) диаметров 100 мм. Для измерения температуры поверхности в точке установке ПТП устанавливается датчик температуры типа Pt100. Дополнительные датчики температуры устанавливаются для контроля комнатной температуры и температуры внутри климатической камеры.

Сигналы с ПТП и датчиков температуры обрабатываются в преобразователе сигналов «Теркон» и регистрируются на персональном компьютере.

После достижения заданной отрицательной температуры в климатической камере, значение которой было выбрано как –35 ºС, и установления стационарного режима, регистрация данных продолжается на протяжении еще 60 минут. Для расчетов брались значения потоков и температур, усредненные по данному стационарному периоду.

Расчет теплового сопротивления образцов $R_к$ производился по формуле 1.

$$R_к = \frac{t_1 - t_2}{q}, \quad (1)$$

где t_1 и t_2 соответственно температуры на теплой и холодной поверхностях образца,
q – среднее значение плотности теплового потока по данным двух ПТП.

На рисунках 3 и 4 представлены примеры графики развития температуры внутри климатической камеры и плотности теплового потока на поверхностях образца по ходу проведения испытаний.

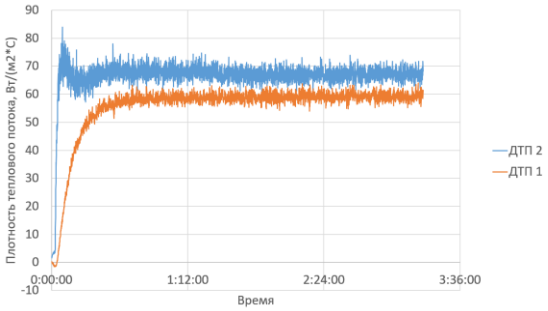


Рис. 3. Графики изменения плотности теплового потока теплой и холодных сторон образца по времени

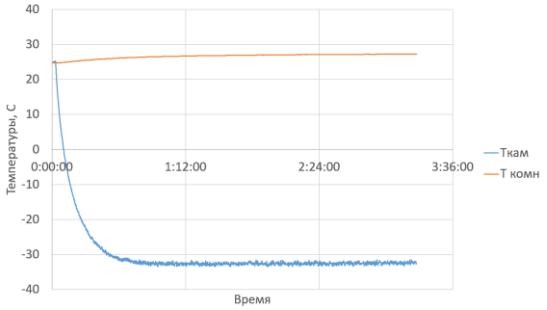


Рис. 4. Графики изменения температуры теплой и холодных сторон образца по времени

Для каждого образца было проведено 2 цикла испытаний. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Полученные результаты

№	Образец	Время, ч	Плотность теплового потока $Q_{ср}$, Вт/(м^2·^{O}C)	Температура теплой стороны образца T_1, ^{O}C	Температура холодной стороны образца T_2, ^{O}C	Температура комнатная $T_{комн}$, ^{O}C	Температура в камере $T_{кам}$, ^{O}C	Тепловое сопротивление $R_к$, м^2·^{O}C/Вт	Тепловое сопротивление $R_к$, м^2·ч·^{O}C/ккал
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
1	Куртка «SUPER»	5 ч	70,26	21,88	-26,88	28,12	-33,03	0,694	0,81
2	Куртка «SUPER»	5 ч	68,19	21,7	-27,1	28,67	-33,13	0,716	0,83
							Среднее значение	**0,705**	**0,82**
3	Куртка «ЯКУТИЯ»	6 ч	63,1	20,31	-32,52	27,14	-33,66	0,837	0,975
4	Куртка «ЯКУТИЯ»	6 ч	61,94	20,63	-28,67	27,45	-28,67	0,796	0,926
							Среднее значение	**0,816**	**0,95**

На рисунке 5 представлена таблица 1 ГОСТ 12.4.303-2016 [1]. Данная таблица устанавливает нормативные требования к суммарному тепловому сопротивлению пакета применяемых в спецодежде материалов.

Таблица 1

Класс защиты	Климатический пояс (регион)	Температура воздуха зимних месяцев, °С	Нормативное значение суммарного теплового сопротивления, м^2·°С/Вт, не менее	
			Плечевое, плечепоясное изделие	Поясное изделие
4	«Особый» (IA)	Минус 25	0,77	0,69
3	IV (1Б)	Минус 41	0,83	0,80
2	III (II)	Минус 18	0,64	0,57
1	II—I (III—IV)	Минус 9,7	0,51	0,50

Рис. 5. Нормативные значения суммарного теплового сопротивления пакета применяемых в спецодежде материалов по ГОСТ 12.4.303-2016

На рисунке 6 представлена таблица 11 из монографии [2]. Единицы измерения в данном случае [м^2·ч·^{O}C/ккал] отличаются от используемых в отчете [м^2·^{O}C/Вт], и для перевода единиц используется коэффициент k=1,164.

Таблица 11

Тепловое сопротивление одежды

Зона	Состояние человека (покой, работа)	Тепловое сопротивление, кло	Тепловое сопротивление, *м²·ч·град/ккал*
А — очень суровая зима	Покой в утепленной арктической одежде	6,0	1,08
	Работа средней тяжести в утепленной арктической одежде	5,0—5,5	0,9—0,99
В — суровая зима	Покой в утепленной арктической одежде	5,0—6,0	0,9—1,08
	Работа в утепленной зимней одежде	3,5	0,6
С — умеренно холодная зима	Покой в арктической одежде	4,0—5,0	0,72—0,90
	Работа в демисезонной и зимней одежде	2,5—3,0	0,45—0,54
Д — умеренно мягкая зима	Покой в зимней одежде	3,0—3,5	0,54—0,63
	Работа в демисезонной одежде	2,0—2,5	0,36—0,45
Е — мягкая зима	Покой в демисезонной одежде	2,5	0,45
	Работа в летнем пальто или в костюме и плаще	1,5	0,27

Рис. 6. Требования к тепловому сопротивлению одежды

Суммарное тепловое сопротивление одежды (пакета материалов), в приведенных источниках, подразумевает все слои одежды, помимо верхней. Таким образом для сопоставления результатов испытаний с данными источников необходимо оценить суммарное тепловое сопротивление по формуле 2.

$$R_{\text{сумм}} = R_k + R_{\text{внутр}}\ , \qquad (2)$$

где $R_{\text{внутр}}$ – тепловое сопротивление внутренних слоев одежды (под курткой). Для оценки этого значения возьмем данные Колесникова [Колесников,1964]. Исходя из таблицы, приведенной на рисунке 7, можно оценить тепловое сопротивление внутренних слоев одежды как соответствующей виду «Обычная комнатная одежда (костюм)» с тепловым сопротивлением 1 кло = 0,18 м²·ч·°С/ккал (0,155 м²·°С/Вт).

Вид одежды	Число единиц кло
Легкое летнее платье	0,5
Обычная комнатная одежда (костюм)	1,0
Костюм и плащ	1,5
Демисезонное пальто	2,0—2,5
Зимняя одежда	3,0
Утепленная зимняя одежда	3,5—4,0
Арктическая одежда	4,5—5,0
Утепленная арктическая одежда	5,5—6,0

Рис. 7. Тепловое сопротивление одежды в единицах Кло

Таким образом суммарное тепловое сопротивление одежды с учетом внутренних слоев, рассчитанное по формуле (2) будет составлять:

– Для образца «SUPER» $R_{\text{сумм}}$= 0,86 м²·°С/Вт (1 м²·ч·°С/ккал)

– Для образца «ЯКУТИЯ» $R_{\text{сумм}}$= 0,97 м²·°С/Вт (1,13 м²·ч·°С/ккал)

При сравнении полученных значений с нормативными требованиями по ГОСТ 12.4.303-201 (рис. 5), видно, что результаты для образца «SUPER» и образца «ЯКУТИЯ» соответствуют требованиям для климатического пояса IV(1Б) с температурой зимних месяцев -41 °С.

При сравнении полученных значений со справочными данными Колесникова[2] (рис. 6), видно, что результаты для образца «SUPER» находятся в диапазоне между требованиями для климатической зоны А (очень суровая зима) в состоянии человека «покой в утепленной арктической одежде» и в состоянии человека «работа средней тяжести в утепленной арктической одежде», а для образца «ЯКУТИЯ» превышают требования для климатической зоны А (очень суровая зима) в состоянии человека «покой в утепленной арктической одежде».

Заключение. Таким образом, полученные в ходе испытаний результаты по тепловому сопротивлению образцов зимней детской верхней одежды образцы «SUPER» и «ЯКУТИЯ» и сравнение полученных значений с нормативными и справочными дают основания для высокой оценки теплозащитной эффективности испытанных образов одежды и рекомендации их для эксплуатации в климатических условиях Республики Саха (Якутия).

Список литературы

1. ГОСТ 12.4.303-2016. «Одежда специальная для защиты от пониженных температур»
2. П. А. Колесников «Теплозащитные свойства одежды», Ленинград, 1964. 346 с.

УДК 534-8
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-365-368

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ «ГАЗ-ЖИДКОСТЬ» В УСЛОВИЯХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АЭРАЦИИ

Маняхин И.А., Голых Р.Н., Хмелёв В.Н.
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт (филиал)
E-mail: maniakhin.ia@bti.secna.ru

Аннотация. *Данная статья посвящена изучению ультразвуковой обработки газожидкостных систем. Эксперименты проводились на специализированном стенде с контролем температуры и высокоскоростной регистрацией изображений межфазной поверхности. Ключевой результат: наибольшая межфазная поверхность аэрационных пузырьков достигается, когда пузырёк находится в зоне вырожденной кавитации (на расстоянии порядка размера аэрационного пузырька микропузырьки существуют длительное время и не схлопываются, а в непосредственной близости от поверхности пузырька возникают схлопывающиеся кавитационные пузырьки). Показано, что предварительный нагрев жидкой среды (водный раствор глицерина) позволяет капиллярным волнам существовать в высоковязких жидкостях, что важно для интенсификации технологических процессов дегазации и диспергирования газа в металлургии, фармакологической и нефтегазовой промышленности.*

Ключевые слова: *Ультразвук, температура, аэрационные пузырьки, межфазная поверхность*

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY AND EQUIPMENT FOR STUDYING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE CONDITIONS AND ULTRASONIC OSCILLATIONS ON THE FORMATION OF A GAS-LIQUID INTERPHASE SURFACE UNDER FORCED AERATION CONDITIONS

Maniakhin I.A., Golykh R.N.
Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University

Abstract. *This article is devoted to the study of ultrasonic treatment of gas-liquid systems. The experiments were carried out on a specialized stand with temperature control and high-speed image recording of the interfacial surface. The key result: the largest interfacial surface of aeration bubbles is achieved when the bubble is located in a zone of degenerate cavitation (at a distance of the order of the size of the aeration bubble, microbubbles exist for a long time and do not collapse, and collapsing cavitation bubbles appear in the immediate vicinity of the bubble surface). It is shown that preheating of a liquid medium (an aqueous solution of glycerol) allows capillary waves to exist in highly viscous liquids, which is important for the intensification of technological processes of gas degassing and dispersion in metallurgy, pharmaceutical and oil and gas industries..*

Keyword: *Ultrasound, temperature, aeration bubbles, interfacial surface*

Исследование влияния ультразвука на сорбцию и десорбцию газов в жидкодисперсных системах является перспективным направлением для нефтегазовой, металлургической и фармакологической промышленности. Удаление парогазовых смесей из многокомпонентных систем со сплошной жидкой фазой необходимо для повышения взрывобезопасности технологий добычи и транспортировки жидкого топлива, а также для защиты топливных насосов высокого давления от кавитации [1–4]. Отделение таких газов, как водород, кислород и азот, из расплавленных металлов (например, стали, алюминия, титана) необходимо для снижения хрупкости, уменьшения раковин и усадочных дефектов в отливках и готовой продукции [5–7]. В фармакологической промышленности ультразвуковая дегазация может позволить создавать бескислородную или инертную среду в реакторе для проведения чувствительных к кислороду или влаге реакций и повысить выход продукта и его чистоту. Инъекционные препараты, содержащие пузырьки воздуха, могут быть чрезвычайно опасны для человека (воздушная эмболия) [8].

Абсорбция необходима удаления вредных и радиоактивных газов в результате техногенных аварий, поглощения попутных нефтяных газов, вызывающих коррозию газопровода, захоронения газов в форме гидратов, а также синтеза твёрдофазных веществ из углеродосодержащих газов.

Для исследования межфазной аэрационных пузырьков при массообмене «газ-жидкость» при различных температурах и режимах ультразвукового воздействия разработан специализированный лабораторный комплекс (рис. 1–2).

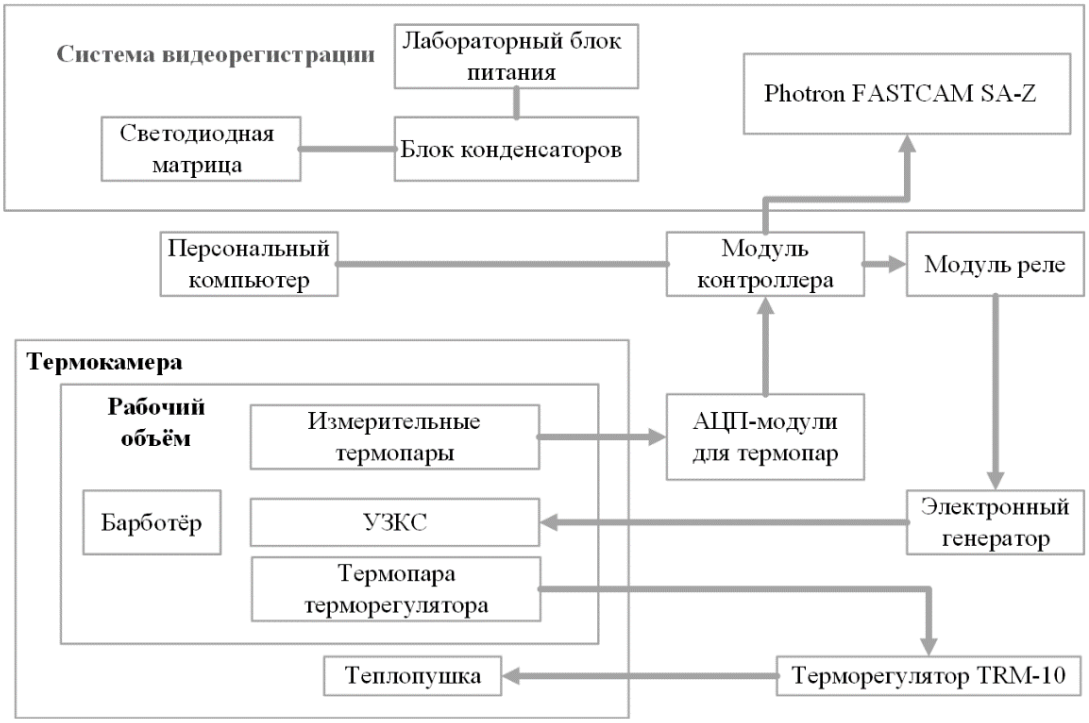


Рис. 1. Структурная схема лабораторного комплекса

Температурный контроль осуществляется независимо размещаемыми термопарами. Измерительный блок установки может содержать от 1 до 4 термопар. Ещё одна термопара относится к блоку терморегуляции комплекса. Термопары помещаются в облучаемую ультразвуком жидкость и неподвижно фиксируются с помощью держателя. Терморегуляция осуществлялась в диапазоне от 15 до 80 °С. Это важно для проведения эксперимента, так как вязкость водно-глицериновых смесей сильно зависит от температуры, что напрямую влияет на поверхность аэрационных пузырьков и возникновение кавитации. Поддержание стабильной температуры обеспечивается с помощью нагревателя ТЭП-5000К1, термокамеры и ПИД-регулятора TRM-10.

Для анализа изменений межфазной поверхности для жидкодисперсных систем была использована скоростная камера Photron FASTCAM SA-Z (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева) с блоком управления освещением. Съемка процесса аэрации жидкости при наложении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности выполнялась с частотой 210 000 кадров/с [9–10].

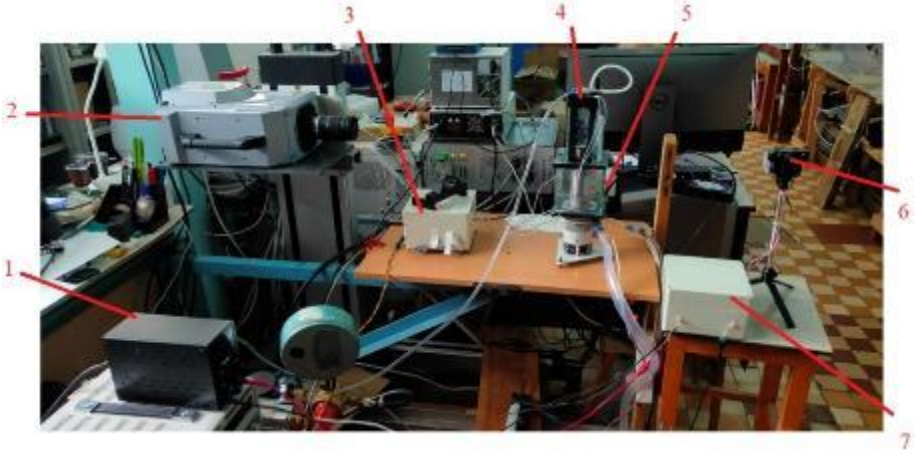


Рис. 2. Основные части лабораторного комплекса: 1 – блок питания, 2 – высокоскоростная камера, 3 – многоканальная система управления стендом, 4 – держатель инжектора и термопар, 5 – лабораторный технологический объём, 6 – светодиодная матрица, 7 – батарея конденсаторов

Процессы включения и выключения ультразвукового воздействия, включение высокоскоростной камеры и записи данных с термопар синхронизированы во времени. Параметры работы стенда могут быть заданы с помощью программного интерфейса оператора лабораторного комплекса (рис. 3), который позволяет задавать время ультразвукового воздействия и задержку для выхода на резонансную частоту и рабочую мощность, а также время включения высокоскоростной камеры. Интерфейс позволяет настроить интервал получения и записи температурных данных с термопар, которые помещены в жидкодисперсную систему. Дополнительно можно задать задержку после выключения ультразвука. Для импульсно-модулированного режима акустического воздействия есть возможность установки периода следования пакетов волновых импульсов и длительность одного пакета импульсов.

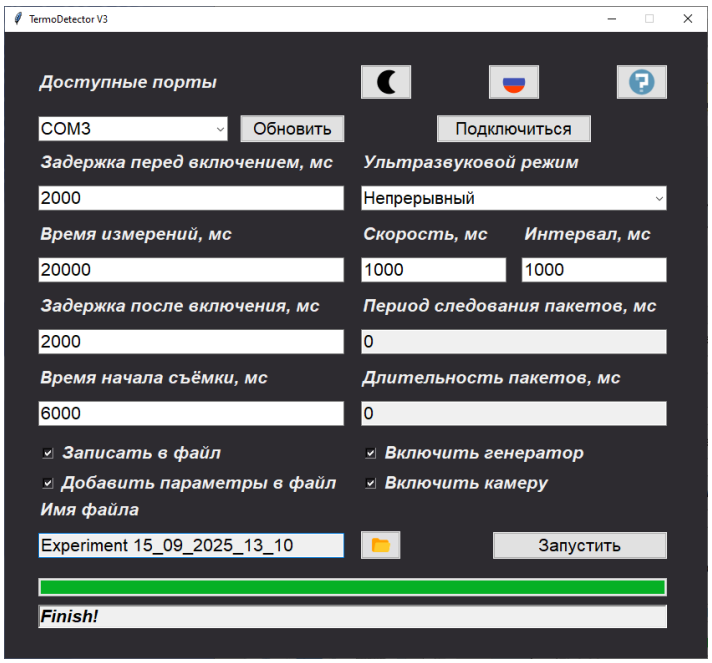


Рис. 3. Экранная форма оператора лабораторного комплекса

Проведённые исследования с использованием разработанного стенда позволили установить, как меняется межфазная поверхность аэрационных пузырьков от температуры в режиме реального времени. Установлено, что при повышенной температуре формирование возмущений возможно даже для водноглицеринового раствора с концентрацией глицерина 80 % (рис. 4).

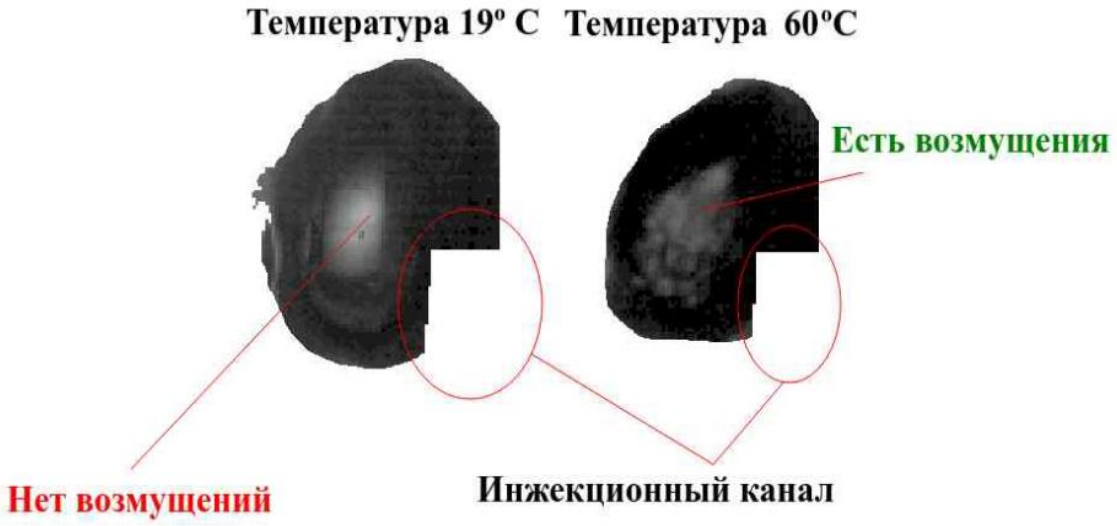


Рис. 4. Результаты скоростной съемки при температурах жидкости 19 и 60 ºС

Это означает, что рост температуры среды (20–60°C) расширяет диапазон вязкостей, при которых возможно образование капиллярных волн на поверхности аэрационных пузырьков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-12-00278, https://rscf.ru/project/23-12-00278/

Список литературы

1. Рахбари, Н. Ю. Роль дегазации подземных вод при формировании и промышленном освоении газовых месторождений / Н. Ю. Рахбари // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 2. С. 481.
2. Быценко, И. Н. Причины износа деталей под действием турбулентности, кавитации и технология нанесения защитного покрытия / И. Н. Быценко, А. Е. Кротова, Н. А. Архипова // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского : Сборник докладов, Москва, 14 февраля 2020 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. С. 100-103.
3. Мустафаев, А. Х. Проблема кавитации в нефтегазопромысловом оборудовании / А. Х. Мустафаев, И. А. Погребная // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса : материалы V региональной научно-практической конференции обучающихся ВО, аспирантов и ученых, Тюмень, 28 апреля 2015 года. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. С. 368-372.
4. Назаров В. П. Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности процессов дегазации нефтяных резервуаров / В. П. Назаров // Пожары и ЧС, 2019. №1. С. 19-24.
5. Недбайло, О. В. Воздействие ультразвука на жидкие металлы и сплавы / О. В. Недбайло, М. Е. Гробылев, Т. Ю. Яковлева // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07 апреля 2023 года / Под редакцией И.В. Зайцевой. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2023. С. 142-146.
6. Мурашов В. А. Дегазация стали в сталеплавильных агрегатах непрерывного действия // Известия ТПУ, 2024. №1. С.140-147.
7. Эскин, Г. И. Развитие ультразвуковой обработки расплава. Мои 45 лет в ВИЛСе / Г. И. Эскин // Технология легких сплавов, 2021. №3. С.61-71.
8. Гулямова Г. Д. Сосудистая воздушная эмболия // Экспериментальная медицина: сегодня и в будущем, 2023. №1. С.33–34.
9. Исследование ультразвукового кавитационного воздействия на межфазную поверхность газ – жидкость при принудительной аэрации / Р. Н. Голых, Ж. Б. Карра, В. Н. Хмелев [и др.] // Прикладная механика и техническая физика, 2024. Т.65, №6(388). С.83-98. DOI 10.15372/PMTF202315435.
10. Влияние вязкости и температуры на формирование поверхностных волн аэрационного пузырька при ультразвуковом воздействии / Ж. Б. Карра, Р. Н. Голых, И. А. Маняхин, В.Н. [и др.] // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии : тезисы докладов XIX Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Новосибирск, Академгородок ; Шерегеш, Кемеровская область, 10–17 марта 2025 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2025. С.63-64. DOI 10.25205/978-5-4437-1736-4-32.

УДК 551.345:536.421
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-369-373

ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИИ НА ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Пермяков П.П.[1], Попов Г.Г.[1], Варламов С.П.[2], Кириллин А.Р.[2]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
E-mail: permyakov2005@mail.ru

Аннотация. *В статье исследуется влияние солнечной радиации (инсоляции) на тепловлажностный режим железнодорожных насыпей в условиях многолетней мерзлоты. Методами численного моделирования оценены температурные поправки для откосов разной экспозиции, проанализированы процессы влагопереноса и тепломассопереноса, приводящие к деформациям земляного полотна. Рассмотрены технические решения по стабилизации мерзлотных условий, включая применение сезонно-охлаждающих устройств (СОУ). Показано, что учет пространственной неоднородности инсоляции является критически важным для достоверного прогноза геокриологической обстановки и обеспечения долговременной устойчивости линейных сооружений.*

Ключевые слова: *многолетняя мерзлота, железнодорожная насыпь, инсоляция, тепловлажностный режим, сезонно-талый слой, численное моделирование*

INFLUENCE OF INSOLATION ON THE THERMAL AND HUMIDITY REGIME OF LINEAR STRUCTURES

Permyakov P.P.[1], Popov G.G.[1], Varlamov S.P.[2], Kirillin A.R.[2]
[1]V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
[2]P.I. Melnikov Institute of Permafrost, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: permyakov2005@mail.ru

Abstract. *The article studies the effect of solar radiation (insolation) on the thermal and moisture regime of railway embankments in permafrost conditions. Numerical modeling methods were used to estimate temperature corrections for slopes of different exposure, and the processes of moisture transfer and heat and mass transfer leading to deformation of the subgrade were analyzed. Technical solutions for stabilizing permafrost conditions, including the use of seasonal cooling devices (SCDs), were considered. It has been shown that taking into account the spatial heterogeneity of insolation is crucial for a reliable prediction of the geocryological situation and ensuring the long-term stability of linear structures.*

Keyword: *permafrost, railway embankment, insolation, thermal and moisture regime, seasonal thaw layer, numerical modeling*

Температурный режим полотна железной дороги при солнечной радиации. Математическая постановка задачи динамики температурного поля в массиве выполнена на основе общей постановки задач типа Стефана. Процесс теплообмена массива грунтов с наружным окружающим воздухом представляется дифференциальным уравнением теплопроводности, описывающее распространение тепла в водонасыщенном грунте с учетом фазового перехода «вода-лед». При этом задача теплопроводности с фазовым переходом формулируется как обычная краевая задача для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами:

$$\tilde{C}(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right),\ \ 0<y<B_y,\ \ 0<z<B_z,\ t>0, \qquad (1)$$

где $\lambda(T)$ и $\tilde{C}(T)$ – коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость массива грунтов, которые аппроксимируются как кусочно-постоянные (сглаженные) функции по температуре T в окрестности фазового перехода. Математическая модель, кроме основного уравнения (1), включает еще начальное и граничные условия, определяемые характером сопряжения тепловых потоков.

На дневной поверхности массива, граничащего с атмосферным воздухом, принимаются граничные условия III рода, учитывающие растительность и солнечную радиацию:

$$-\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}=\alpha_{пр.в}\left(T_в+\frac{Q_c(1-A)}{\alpha_в}-T\right) \text{ при } z=0, \quad (2)$$

В зимнее время приведенный коэффициенты теплообмена с учетом снега имеет вид:

$$\alpha_{пр.в}=1\Big/\left(\frac{1}{\alpha_в}+\frac{\delta_{сн}}{\lambda_{сн}}\right),$$

где $T_в$, – температура атмосферного воздуха; $\alpha_{пр.в}$ – приведенный коэффициент теплообмена к поверхности массива со стороны воздуха; Q_c – суммарная солнечная радиация; A – альбедо поверхности; $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи от воздуха к дневной поверхности; $\delta_{сн}$, $\lambda_{сн}$ – толщина и коэффициент теплопроводности снежного покрова.

В существующих методиках прогнозирования температурного режима грунтов оснований [1] указывается на необходимость учета притока солнечной радиации на поверхность с ориентацией склона. Однако в практических расчетах экспозиция откосов насыпи часто не учитывается, а применяется универсальная поправка в 3 ºС для любых поверхностей. Подобное обобщение может снижать достоверность прогноза геокриологических условий.

В данной работе собрана база данных по климату и геологическому строению грунтов для 13 потенциальных транспортных узлов, на основе которой рассчитывались поправки температуры на солнечную радиацию в проектируемых железнодорожных насыпях по методике СП 447.1325800.2019 [2] и альтернативной методике Л.Н. Хрусталева [3]. Рассчитанные температурные поправки сравнивались между собой и использовались для корректного прогнозного моделирования железнодорожной насыпи в изучаемых пунктах. Для исследования была выбрана универсальная железнодорожная насыпь для всех пунктов, которая исключала искажения из-за различий в материалах и форме. В создании прототипа железнодорожных насыпей использовали программное обеспечение Frost 3D 2025 (frost3d.ru), которое позволяет проводить численное моделирование процессов теплопередачи в вечной мерзлоте с учетом антропогенного теплового воздействия и изменений климата.

Исследование подтвердило отсутствие ориентации откосов к сторонам света. По методике [2, 3] процент расхождения вклада солнечной радиации в мощность сезонно-талого слоя при моделировании железнодорожной насыпи за период 50 лет составил от –35,2 до 22,1% для северного откоса и от 15,4 до 41,5% – южного. Для большинства транспортных узлов разница не установлена из-за таликовой зоны в теле насыпи. Разница глубины протаивания сезонно-талого слоя (СТС) при моделировании железнодорожной насыпи на 50-летний период между откосами разной экспозиции составила от 15,4 до 69,6 %. При этом не было выявлено устойчивой взаимосвязи между изменением температурных поправок и мощности СТС.

Влагоперенос в насыпи дороги. Дорожная насыпь существенно изменяет тепловлажностный режим подстилающих грунтов. В условиях потепления климата и формирования «ядра» холода приводит к процессам пучения, аналогичным образованию булгунняхов.

Значительная часть железнодорожных путей в криолитозоне проложена на участках с сильнольдистыми многолетнемерзлыми грунтами. Для исследования была принята модель насыпи из скального грунта высотой 7 м, шириной 7 м по верху и по подошве 30 м. В основании залегают многолетнемерзлые льдистые суглинки. При неравномерном нагреве изменяется динамика влагопереноса. В качестве исходных параметров использованы данные метеостанций Покровск, Якутск, Амга [4–6]. Натурные измерения толщины снега проводились в период максимального снегонакопления (март-апрель). Начальное распределение температуры, влажности и теплофизические характеристики грунтов заданы по данным натурных исследований [4].

Натурные наблюдения показали, что насыпь обладает охлаждающим эффектом: со временем в грунтовом основании формируется мерзлая зона, и верхняя граница мерзлоты поднимается. Миграция влаги в мерзлом основании протекает медленно, однако в деятельном слоя и теле насыпи формируется зона повышенной влажности за счет циклического промерзания-протаивания и поступления атмосферных осадков.

Тепломассоперенос в насыпи дорог при инсоляции и меры защиты.

Тепломассоперенос и деформации при инсоляции. В процессе солнечного нагрева, в зависимости от ориентации и граничных условий поверхности, возникает значительная неоднородность температурного поля. На рисунках 1в и 1г приведены результаты численного эксперимента, учитывающего вклад солнечной радиации согласно СП 447.1325800.2019 [2].

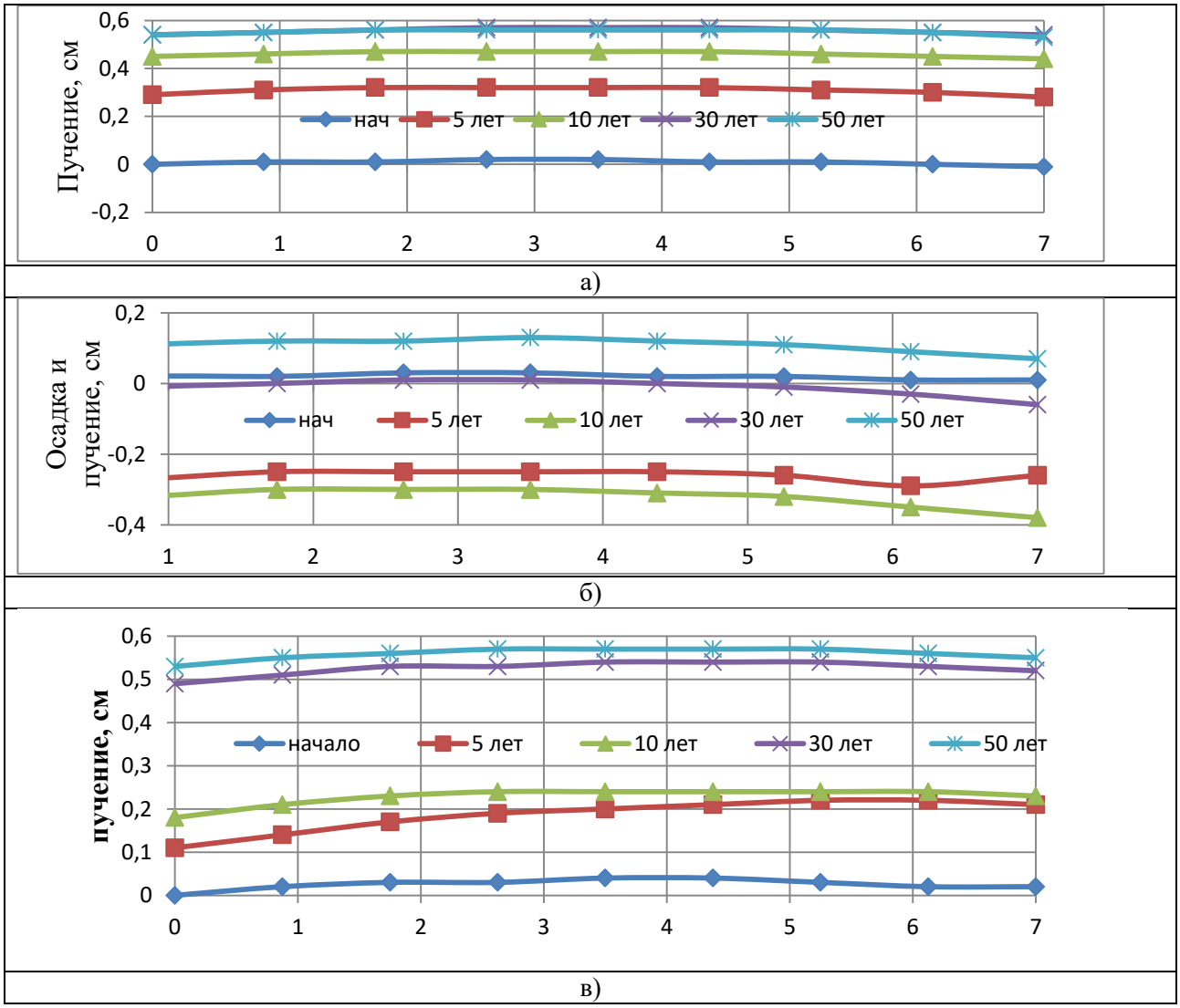
Деформации пучения и осадки высоких насыпей рассматривались в двух сценариях: 1) без изменения климата (среднегодовая температура воздуха –10 ºС); 2) при потеплении климата на +4 ºС. В первом сценарии наблюдается процесс пучения полотна, связанный со стабилизацией температурного режима и многолетней миграцией влаги к фронту промерзания. При потеплении усиливается протаивание грунта и повышается подвижность незамерзшей воды, что приводит к комплексным деформациям пучения и просадки (рис. 1) [6–8]. В первые 10 лет наблюдается просадка за счет протаивания верхних слоев, и тогда в последующие периоды (30 и 50 лет) доминирует пучение за счет промерзания миграционной влаги в нижней части насыпи.

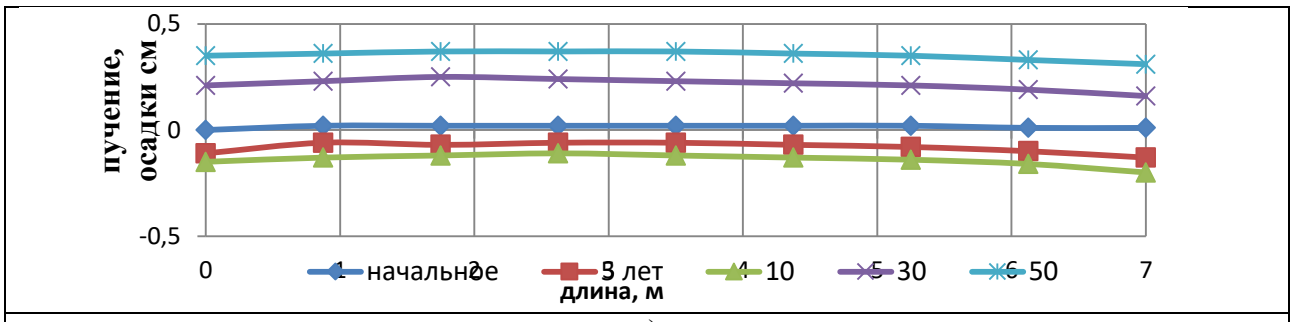
Для автомобильных и железных дорог величина деформаций напрямую связана с пучинными явлениями и осадками на сильнольдистых грунтах при их оттаивании. Известны случаи морозной деструкции дорожной одежды и ее последующего механического разрушения под воздействием транспорта. Формирование мерзлой зоны определяется неоднородностью температурного поля, при этом глубина сезонного протаивания существенно не меняется [1].

Защита от негативных процессов. Для защиты земляного полотна от негативных мерзлотных процессов применяется комплекс мероприятий [6,7]. Основные угрозы: термокарст, пучение, наледи и обводнение за счет атмосферных осадков.

Для защиты от термокарста в полосе отвода существующие термокарстовые понижения засыпаются торфом, заторфованным суглинком или древесными отходами. Организуется отвод застойных вод. По возможности сохраняется естественная растительность, особенно моховой покров. На участках с потенциальным термокарстообразованием применяются: а) искусственный засев болотными травами; б) подсыпка органоминеральными материалами; в) укладка специальных легких сетчатых конструкций (матов), которые при необходимости анкеруются ко дну [7, 8].

Численные эксперименты показали, что потепление основания усиливает подвижность влаги, формирование мерзлых зон и зон повышенной влажности. В этой связи возрастает роль инженерных разработок, направленных на стабилизацию тепловлажностного режима, в частности, различных СОУ.





г)

Рис. 1. Динамика пучения поверхности насыпи по времени (1, 5, 10, 30 и 50 лет): без инсоляции: а) без потепления; б) с потеплением климата; при инсоляции: в) без потепления; г) с учетом потепления климата

Одним из видов пассивных СОУ является двухсторонний навес вдоль дороги (рис. 2), который обеспечивает затенение и проветривание откосов. Моделирование показало, что в зимний период навес способствует интенсивному промерзанию насыпи со всех сторон, что замедляет миграцию поровой влаги. Как видно из рисунка 3а, изотерма -6 ºС характеризует зону эффективного охлаждения. Сравнение с режимом насыпи без навеса (рис. 3б) наглядно демонстрирует его охлаждающий эффект.

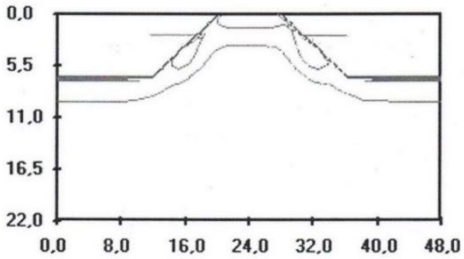


Рис. 2. Двухсторонний навес, установленный вдоль дороги для охлаждения земляного полотна

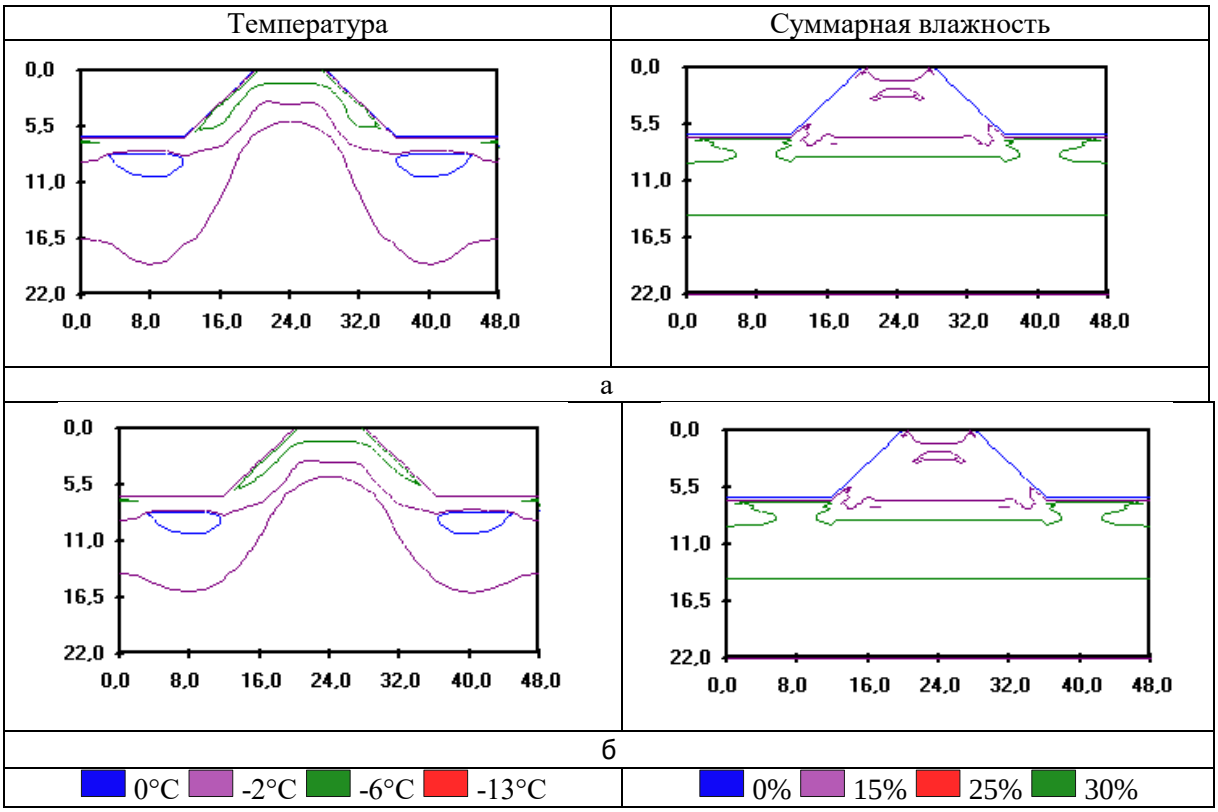


Рис. 3. Тепловлажностный режим железнодорожного полотна в зимний период (январь): а) с защитным навесом б) без навеса

Для борьбы с пучением, вызванным криогенными напорами в водоносных горизонтах, традиционно применяют дренаж. Однако его эффективность ограничена глубиной 3,5–4,0 м, и он часто перемерзает. Более эффективным средством на трассах в условиях многолетней мерзлоты (например, в Южной Якутии) зарекомендовали себя предзимние откачки грунтовых вод из буровых скважин, позволяющие снизить напор и предотвратить пучение инъекционного типа.

Для защиты от наледей применяются различные методы в зависимости от их типа (ключевые, грунтовые, поверхностные). Ключевые наледи больших объемов, как правило, обходят при трассировании. Борьба с грунтовыми и поверхностными наледями ведется путем регулирования их образования и устройства противоналедной защиты (снежные валы, заборы из шпал), отделяющих полотно дороги от наледного поля.

Особую актуальность имеет проблема влияния мелких водоемов, образующихся вдоль откосов насыпей, на тепловой режим мерзлого основания. Несмотря на значительную распространенность, методы оценки и прогноза этого влияния разработаны недостаточно, что определяет важность дальнейших исследований в данной области.

Выводы

1. Учет пространственной неоднородности солнечной радиации в зависимости от экспозиции откосов железнодорожной насыпи является критически важным для достоверного прогноза ее температурного режима и мощности сезонно-талого слоя. Применение универсальной температурной поправки может приводить к значительным погрешностям.

2. Неравномерный нагрев насыпи инсоляцией инициирует сложные процессы тепломассопереноса, которые в условиях потепления климата приводят к значительным деформациям земляного полотна (комплекс пучения и просадки).

3. Для обеспечения долговременной устойчивости линейных сооружений на многолетнемерзлых грунтах необходим комплексный подход, включающий мониторинг, прогноз и применение адаптивных инженерных решений, таких как сезонно-охлаждающие устройства (СОУ), дренаж и противоналедные мероприятия.

4. Технические решения должны соответствовать критериям качества природно-технических геосистем, ограничивающим область работоспособности сооружений по предельным состояниям. Неудовлетворение хотя бы одного из критериев мониторинга или прогноза свидетельствует о необходимости проведения стабилизирующих мероприятий.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №23-61-10032.

Список литературы

1. Сотникова К.С., Маслаков А.А. Влияния солнечной радиации на температурный режим железнодорожных насыпей в криолитозоне. Сб. тезисов «Проблемы криосферы Земли» – Пущино, 2025. 138 с.
2. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования / Минстрой России. – Официальное издание. Москва: Стандартинформ, 2019. 36 с.
3. Хрусталев Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Геология» и специальности «Гидрогеология и инженерная геология» / Л. Н. Хрусталев. – М.: Научно-издательский центр ИНФРА, 2019. 543 с.
4. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Балута В.И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики / Arctic and Subarctic Natural Resources. 2023. Т.28. №3. С.398–414.
5. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: СО РАН, 2023. 163 с.
6. Вельчев С., Окунев С., Рило И. Сохраняя вечное – строим будущее // Нефтегазовая Вертикаль. 2013. №17. С.36-39.
7. Chen R.J., Cheng G.D., Li S.X (2000) Development and prospect of research on application artificial ground freezing // Chinese J. Geotechnical Engineering, vol. 22, pp. 40-44.
8. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН, 2021. 156 с

УДК 624.139:537.226
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-374-378

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОЙ ВЛАЖНОСТИ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЕМКОСТНОГО МЕТОДА

Семенов С.О.[1,2], Малышев А.В.[2], Большев К.Н.[2], Саввинова Н.А.[3]
[1]ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН
[3] Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: Semens1993@mail.ru

Аннотация. *Представлены результаты разработки и апробации методики неинвазивного мониторинга динамики поровой влаги в дисперсном материале (песок) в условиях промораживания. Методика основана на применении специализированного цилиндрического емкостного датчика, обеспечивающего восстановление пространственного распределения диэлектрической проницаемости, коррелирующей с влажностью. В лабораторных экспериментах осуществлено однонаправленное замораживание образцов грунта с варьируемой начальной влажностью. На основе серии измерений выполнена трехмерная реконструкция диэлектрической проницаемости. Проведена верификация методики путем сравнения с данными весового метода. Продемонстрировано удовлетворительное количественное соответствие между распределениями влажности, полученными емкостным и весовым методами, что подтверждает адекватность предложенного подхода.*

Ключевые слова: *дисперсные материалы, динамика влаги, трехмерная реконструкция, электроемкостная томография, фазовый переход, мерзлый грунт.*

DEVELOPMENT OF A SETUP FOR DETERMINING TOTAL MOISTURE CONTENT DURING FREEZING OF DISPERSED MATERIALS BASED ON THE CAPACITIVE METHOD

Semenov S.O.[1,2], Malyshev, A.V.[2], Bolshev K.N.[2], Savvinova N.A.[3]
[1]Federal Research Center «Yakutsk Scientific Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
[2]V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
[3] North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

Abstract*. The paper presents the results of the development and testing of a technique for non-invasive monitoring of pore moisture dynamics in a dispersed material (sand) under freezing conditions. The technique is based on the use of a specialized cylindrical capacitance sensor, which allows reconstructing the spatial distribution of dielectric permittivity correlated with moisture content. Laboratory experiments involved unidirectional freezing of soil samples with different initial moisture contents. Based on a series of measurements, a three-dimensional reconstruction of the dielectric constant was performed. The technique was verified by comparison with data from the reference gravimetric method. Satisfactory quantitative agreement between the moisture distributions obtained by the capacitance and gravimetric methods is demonstrated, confirming the adequacy of the proposed approach.*

Keyword: *dispersed materials, moisture dynamics, 3D reconstruction, electrical capacitance tomography, phase transition, frozen soil.*

Введение. Динамика влаги в пористых средах дисперсных материалов, к которым относятся грунты, представляет собой критически важный фактор, определяющий их физико-механические свойства и поведение в условиях меняющихся температур. Особую сложность вызывает мониторинг трехмерного переноса влаги при фазовых переходах (замерзание/оттаивание), приводящее к морозному пучению и просадочности, что создает риски для устойчивости инженерных сооружений в криолитозоне [1, 2]. Традиционные методы измерения влажности, будучи точечными, не позволяют восстановить пространственную картину распределения влаги в реальном времени [3]. В этой связи разработка точных экспериментальных методик, позволяющих получать данные о пространственно-временном распределении влаги, представляется актуальной задачей.

Для исследования влажностных полей все активнее применяются неинвазивные томографические методы, среди которых выделяется электроемкостная томография (ЭЕТ), характеризующаяся высокой скоростью отклика и значительной чувствительностью к диэлектрическим свойствам воды [4, 5].

Целью настоящей работы, является разработка и экспериментальная верификация методики мониторинга трехмерной динамики поровой влаги в дисперсном материале (на примере песка) в условиях низкотемпературного воздействия, основанной на данных неинвазивных емкостных измерений.

Материалы и методы. Объект исследования и подготовка образцов. В качестве объекта исследования использовался мелкозернистый песок. Начальная влажность образцов составляла 11%. Геометрия образцов соответствовала измерительной ячейке: диаметр 100 мм, высота 200 мм. После приготовления верхняя часть образцов была изолирована для минимизации влаго- и теплообмена с окружающей средой.

Экспериментальная установка и методика. Для создания контролируемых температурных условий использовался комплекс, включающий климатическую камеру и криостат «КРИО-ВТ-05-01». Климатическая камера поддерживала стабильную температуру (+2°C) в нижней части образца, в то время как криостат обеспечивал граничное условие первого рода (-10°C) на верхней границе, создавая режим однонаправленного промерзания.

Для неинвазивного мониторинга влажности применялась разработанная установка с круговыми емкостными электродами, схема которой представлена на рисунке 1. Измерительная система включала прецизионный мост Вина для измерения емкости и калибровочные сопротивления с частотой 12 кГц и потенциалом 2 В (переменное напряжение). Регистрация сигналов осуществлялась системой сбора данных ZET230 с последующей обработкой в специализированном ПО ZETView, переключение между возбуждающим и принимающим электродом осуществляется с помощью реле F16.

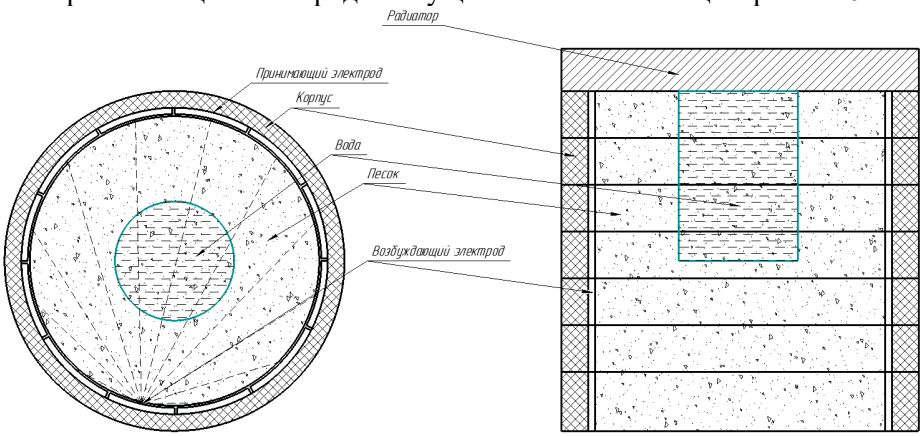


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерения проводились в трех режимах: на абсолютно сухом образце (калибровка), до замораживания (фоновое поле) и в процессе промерзания. Такой подход позволил решить обратную задачу и восстановить пространственное распределение диэлектрической проницаемости (ε), однозначно коррелирующей с объемным влагосодержанием.

Методика определения влагосодержания включала послойный отбор проб после завершения эксперимента с последующим весовым высушиванием. Пробы отбирались с шагом 30 мм по высоте образца, что соответствовало пространственному разрешению емкостных измерений.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные данные о распределении влажности. В ходе экспериментов получены данные, демонстрирующие миграцию влаги в направлении фронта промерзания. На рисунке 2 представлены графики распределения диэлектрической проницаемости (ε) по глубине образца с начальной влажностью 11% после 24 часов замораживания.

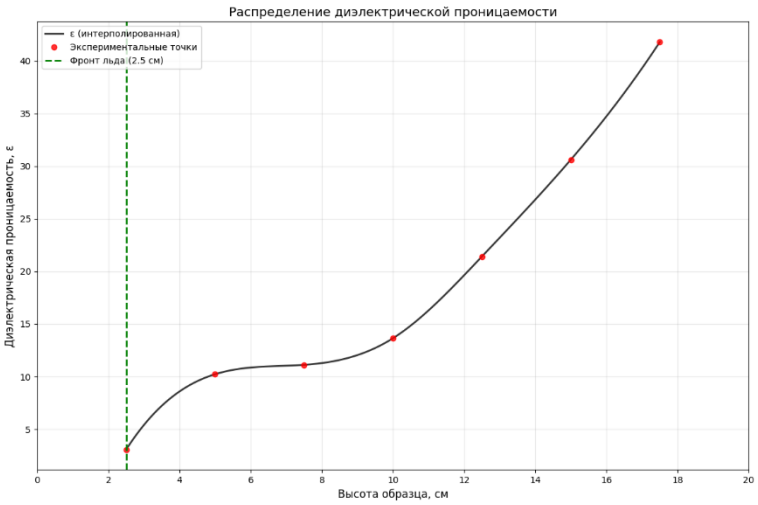


Рис. 2. Распределение диэлектрической проницаемости (ε) по глубине образца грунта с начальной влажностью 11% после 24 часов замораживания

На всех кривых наблюдается выраженный пик, соответствующий зоне миграции влаги перед фронтом промерзания. Положение фазового фронта идентифицировалось как точка минимального наклона на нисходящем участке кривой ε. Согласно данным других исследований [5], увеличение начальной влажности приводит к смещению фронта промерзания вглубь образца и росту амплитуды пика, что свидетельствует об интенсификации миграционных процессов.

Трехмерная визуализация динамики влаги. На основе серии двумерных распределений диэлектрической проницаемости, полученных на разных глубинах (рис. 3), методом трилинейной интерполяции выполнена трехмерная реконструкция поля влажности (рис. 4).

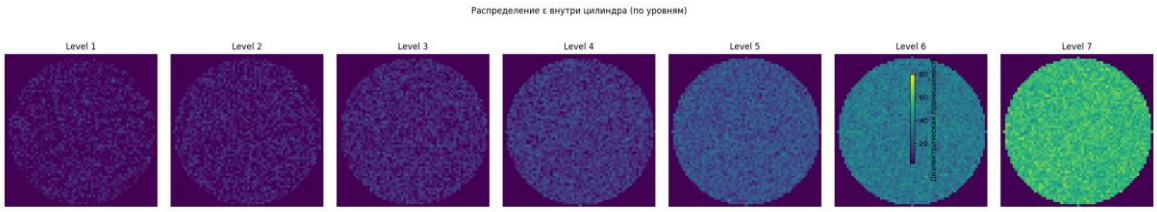


Рис. 3. Пример 2D изображения распределения диэлектрической проницаемости на глубине 200 мм с шагом 30 мм (песок и вода)

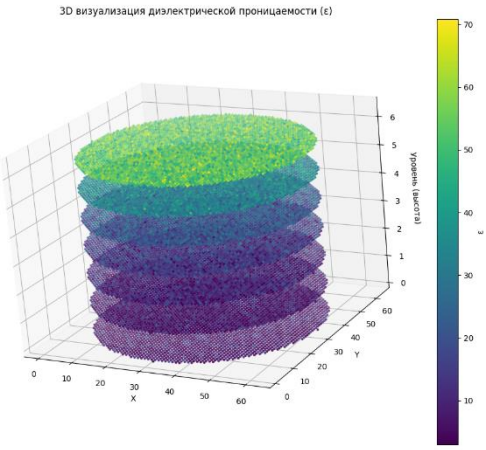


Рис. 4. 3D реконструкция диэлектрической проницаемости в образце грунта (песок и вода)

Реконструкция наглядно демонстрирует перераспределение влаги, приводящее к формированию пространственной неоднородности влажностного поля, что обусловлено влиянием гравитационных сил.

Верификация методики. Для проверки точности предложенной методики проведено прямое сравнение данных электроемкостной томографии с весовым методом. После завершения цикла замораживания и томографических измерений образцы подверглись послойному высушиванию в соответствии с ГОСТ 5180-2015 [6]. Отбор проб грунта производился на различных глубинах с шагом 30 мм, соответствующим пространственному разрешению емкостного датчика.

На рисунке 5 представлено сопоставление распределений влажности, полученных емкостным и весовым методами.

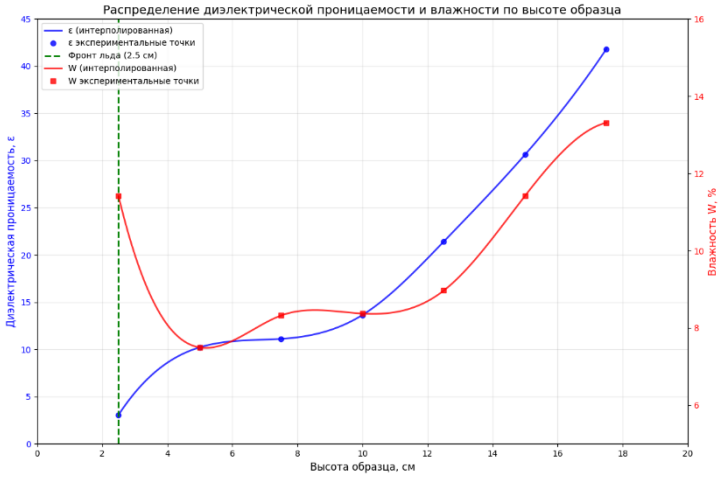


Рис. 5. Сравнение распределения влажности, полученного емкостным методом (синяя линия) и весовым методом (красная линия)

Как видно из рисунка 6, результаты, полученные обоими методами, демонстрируют удовлетворительную количественную сходимость. Оба графика фиксируют ключевые особенности процесса: зону осушения в промороженной части, зону миграции влаги перед фронтом промерзания с выраженным пиком и область с ненарушенной начальной влажностью ниже фронта.

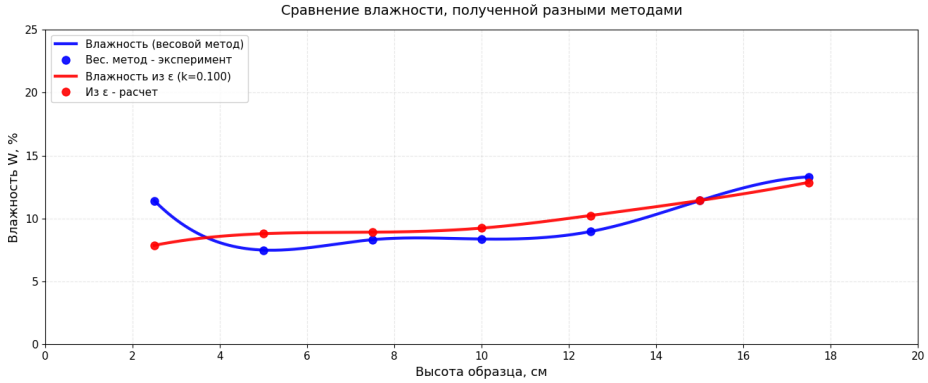


Рис. 6. Распределение влажности по глубине образца с начальной влажностью 11%, полученное весовым методом

Для количественной оценки точности емкостного метода рассчитано среднеквадратическое отклонение (СКО) между данными двух методов по всем точкам измерения. Значение СКО составило 1,56%, при среднем отклонении 1,14% и максимальном отклонении в зоне фазового перехода 3,54%, что подтверждает приемлемую точность неинвазивных измерений для инженерных задач. Наблюдаемые расхождения в области фронта промерзания могут быть объяснены влиянием кристаллизации поровой влаги, и изменением структуры материала с диэлектрической проницаемости льда, из-за большой концентрации замершей воды, а весовой метод увеличивается из-за подтока влаги к фазовому фронту в процессе миграции высушивая другие участки ячейки.

Заключение

На основе проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Разработана и апробирована методика электроемкостной томографии для неинвазивного мониторинга трехмерной динамики влаги в дисперсных материалах в условиях фазовых переходов.
2. На основе экспериментальных данных выполнена реконструкция влажностных полей в промерзающем образце, наглядно демонстрирующая процессы миграции влаги.
3. Проведена успешная верификация методики. Установлено удовлетворительное количественное соответствие между данными, полученными емкостным и весовым методами, что подтверждает корректность предложенного подхода.

Разработанная установка может быть применена для мониторинга и оценки устойчивости геотехнических сооружений в криолитозоне. Перспективы работы для дальнейших исследований будут связаны с добавлением других дисперсных материалов добавлением солей с учетом влияния химического состава поровой влаги и изучением процессов в более неоднородных средах.

Список литературы

1. Зангиев А.А. Влагоперенос в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука, 2010. 215 с.
2. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil // Water Resources Research. 1973, vol. 9, no. 5, pp. 1314-1323.
3. Watanabe K., Wake T. Measurement of unfrozen water content and relative permittivity of frozen unsaturated soil using NMR and TDR // Cold Regions Science and Technology. 2009, vol. 59, no. 1. pp. 34-41.
4. Wang W., Zhao K., Zhang P., Bao J., Xue S. Application of three self-developed ECT sensors for monitoring the moisture content in sand and mortar // Construction and Building Materials. 2020, vol. 267, pp. 121008.
5. Hu X., Dong Q., Shi B., Yao K., Chen X., Yuan X. Moisture Distribution and Ice Front Identification in Freezing Soil Using an Optimized Circular Capacitance Sensor // Sensors. 2024, vol. 24, no. 22, p. 7392.
6. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2015.

СЕКЦИЯ 7. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ И НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 551.12
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-379-384

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ, СВЯЗАННЫХ С КОНУСАМИ ВЫНОСА ТУРБИДИТНЫХ ПОТОКОВ

Александров В.М., Закиров Н.Н.
Тюменский индустриальный университет, город Тюмень
E-mail: zakirov.nikolay@yandex.ru

Аннотация. *Конусы выноса турбидитных потоков являются перспективными объектами для поисков, разведки и эксплуатации залежей углеводородов. Одной из главных практических задач является оконтуривание конусов выноса, идентификация областей питания и подводящих каналов, оценка перспектив их нефтегазоносности. На примере одного из продуктивных пластов месторождения углеводородов в Западно-Сибирском нефтегазоносном бассейне предлагается методика картирования турбидитных отложений. Получена новая модель продуктивных отложений с выделением двух самостоятельных конусов выноса, сформировавшихся в разное геологическое время. Изучение особенностей геологического строения отложений позволило провести раздельный подсчет начальных геологических запасов нефти и растворенного газа по данному (ранее единому) подсчетному объекту.*

Ключевые слова: мутьевые потоки, *турбидиты, сейсморазведка, атрибутный анализ, конуса выноса, залежи углеводородов.*

STUDY OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF NON-TRADITIONAL HYDROCARBON DEPOSITS ASSOCIATED WITH TURBIDITE FLOW CONUSES

Alexandrov V.M., Zakirov N.N.
Tyumen Industrial University

Abstract. *The cones of turbidite flows are promising objects for the search, exploration, and exploitation of hydrocarbon deposits. One of the main practical tasks is to outline the cones of turbidite flows, identify the feeding areas and conduits, and assess their potential for oil and gas production. Using the example of one of the productive reservoirs in the West Siberian oil and gas basin, we propose a methodology for mapping turbidite deposits. We have obtained a new model of the productive deposits, which includes two distinct cones of turbidite flows formed at different geological times. The study of the geological structure of the deposits allowed for a separate calculation of the initial geological reserves of oil and dissolved gas for this (previously unified) calculation object.*

Keyword: *mudflows, turbidites, seismic exploration, attribute analysis, scour cones, hydrocarbon deposits.*

К турбидитам традиционно относятся ассоциации отложений, транспортированные и осажденные мутьевыми суспензионными потоками (от лат. «*turbidus*» – мутный, взбаламученный; от англ. «*turbidity currents*») в глубоководных условиях (в результате лавинообразного схода осадочного материала, накопившегося на склоне). Когда мутьевой поток теряет свою кинетическую энергию, то из него выпадает транспортируемый материал и формируются конусы выноса. Представлены они переслаиванием песчаников, алевролитов с алевроаргиллитами и аргиллитами. Причем каждый прослой песчаников залегает с резким контактом на подстилающем алевроаргиллите или аргиллите. Формирующиеся турбидитные потоки под действием гравитационных сил из-за более высокой плотности, чем морская вода, и большого количества перемещаемого (переносимого) осадочного материала способны двигаться по любому склону (по системе подводных каньонов). Процесс зарождения потоков связан с нарушением гравитационного равновесия на бровке шельфа. В этом случае накопившиеся ранее там

отложения не могут удерживаться на береговом склоне. Впервые к ним обратился R.A. Daly в 1936 г. [1, 2], изучая образование «подводных каньонов» в результате действия турбидитных потоков, а затем в 1950 г. развили Ph.H. Kuenen и C.I. Migliorini [3]. Для турбидитов свойственно ритмичное переслаивание прослоев песчаников, алевритов и аргиллитов (снизу вверх по разрезу). A.H. Bouma предложил выделять каждый такой трехслойный элемент ритма и обозначать как самостоятельный цикл («цикл Боума» («*Bouma sequence*»)), который формируется в результате однократного схода «лавины» [4]. В полном турбидитном цикле А. Боума выделяется 6 составных частей (от «a» до «f») с разными текстурно-структурными характеристиками (рис. 1). В проксимальных циклитах наблюдается полная последовательность частей, в крайних дистальных – возможна идентификация только элемента e. Толщина «традиционного» выделяемого цикла обычно примерно около 1 м или менее. Чередование пород в отдельно взятом цикле объясняется различной скоростью осаждения обломочного материала в зависимости от гранулометрии частиц. Наиболее крупная фракция (псаммиты) выпадает сразу, а затем более мелкая – пелитовая, вплоть до тонкоотмученных илов. В объеме отдельно взятого турбидитного тела содержится множество элементарных циклов. Все зависит от геологического возраста и интенсивности осадконакопления в морском палеобассейне. В современной специальной геологической литературе приводится достаточно много «генетических» моделей формирования турбидитных отложений [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и др.].

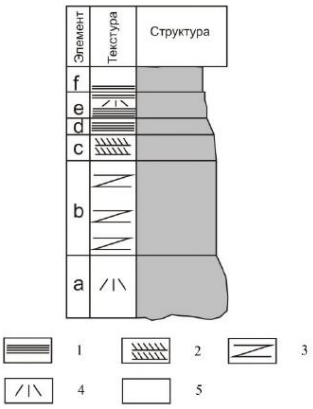


Рис. 1. Идеализированная литофациальная модель турбидитного ритма.
Составные элементы цикла А. Боума
Условные обозначения: осадочные текстуры: 1 – параллельная; 2 – косая однонаправленная;
3 – субпараллельная; 4 – градационная; 5 – массивная

В настоящее время установлено, что вертикальное развитие текстур, описанное A.H. Bouma, применительно к турбидитам отложенным мутьевыми потоками низкой плотности. Далее были предложены многочисленные расширенные модификации, из них наиболее часто используются «Stow – Shanmugam» (1980 г.) и «Lowe» (1982 г.) [12, 13, 14, 15]. По существу, это описательные классификации, дополняющие последовательность Боума. Наиболее наглядно особенности их геологического строения специалисты-седиментологи изучают на Баскском побережье испанского г. Баррика (исп. «*Barrica*», баск. «*Barrika*»), который с севера омывается Бискайским заливом (рис. 2*a*); на восточном побережье Ирландии (C_1, Лафшинни («*Loughshinny*»)) (рис. 2*b*); на юге о. Крит (пляж Агиос Павлос («*Agios Pavlos*»)) (рис. 2*c*); на о. Борнео в Восточной Малайзии (Кота-Кинабалу («*Kota Kinabalu*»)) (рис. 2*d*); в округе Сан-Матео в Калифорнии (Пасифика («*Pacifica*»)) (рис. 2*e*); в Намибии (Зерриссен («*Zerrissen*»)) (рис. 2*f*); в бортовых обнажениях русел рек Кожим, Изъяю, Шарью, Хей-Яга фаменского возраста в Косью-Роговской впадине и гряде Чернышева (рис. 2*g*); в Западной Ирландии (Carboniferous Ross Sandstone Formation (Namurian), County Clare, Western Ireland) (рис. 2*h*); в Германии (Devonian Sandstone, Becke-Oese Quarry) (рис. 2*i*) и во многих других местах.

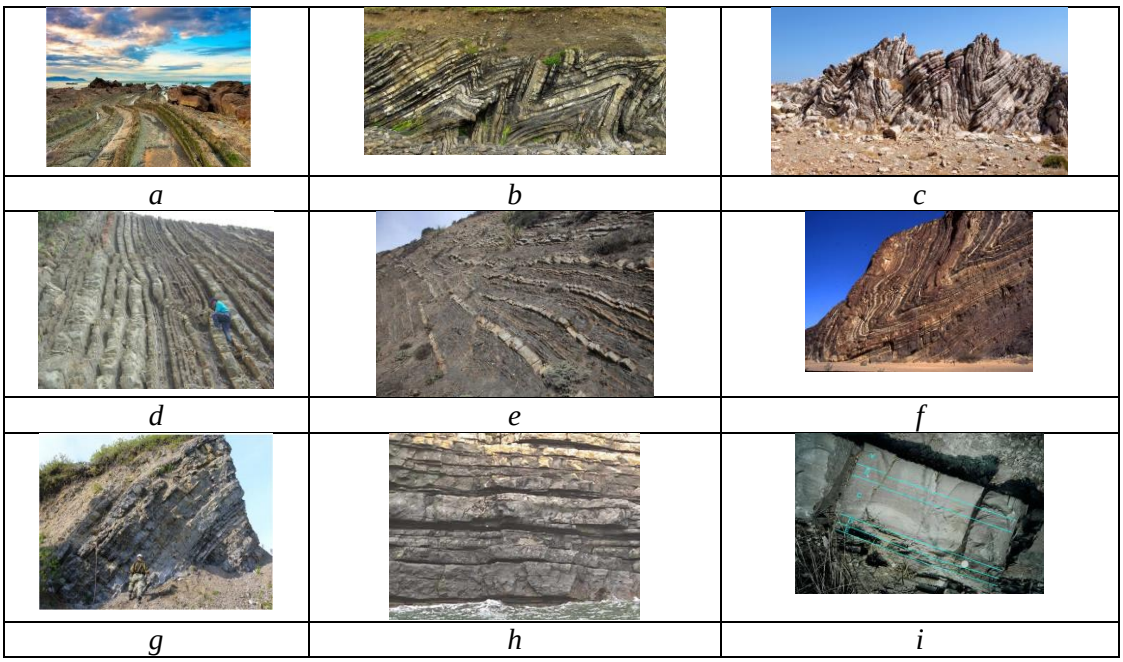


Рис. 2. Древние (ископаемые) турбидиты, поднятые выше уровня моря

Как видно из вышеприведенного перечисления, турбидитные отложения встречаются в различных частях Земного шара и на разных стратиграфических уровнях. Все это свидетельствует о их значительном геологическом (сырьевом) потенциале, в т.ч. и в отношении перспектив потенциальной нефтегазоносности.

Используя имеющиеся теоретические положения и применяя собственные практические наработки, нами была выполнена детальная геолого-геофизическая интерпретации материалов 3D-сейсморазведки на территории месторождения, проведено обновление корреляции по пробуренным скважинам, скоростное моделирование, прогноз трендовых фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), обоснование рангов/граничных критериев. Результаты выполненной работы послужили сейсмической основой для построения новой (альтернативной) геолого-геофизической модели ачимовских пластов (рис. 3, 4, 5 и 6).

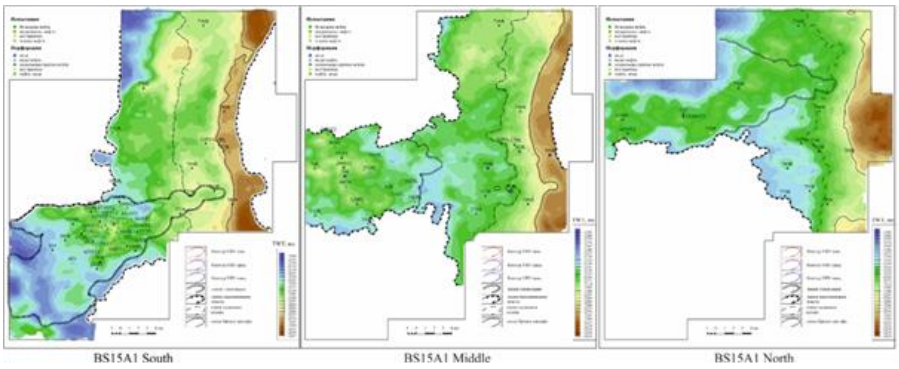


Рис. 3. Карты изохрон по отражающему горизонту Ach_1

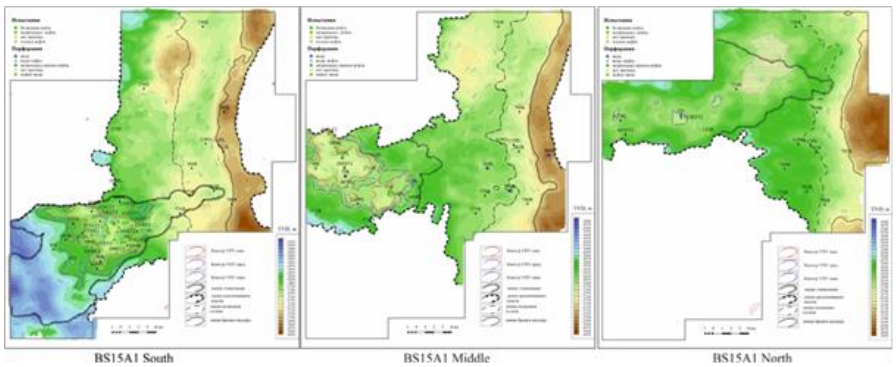


Рис. 4. Структурные карты по отражающему горизонту Ach_1

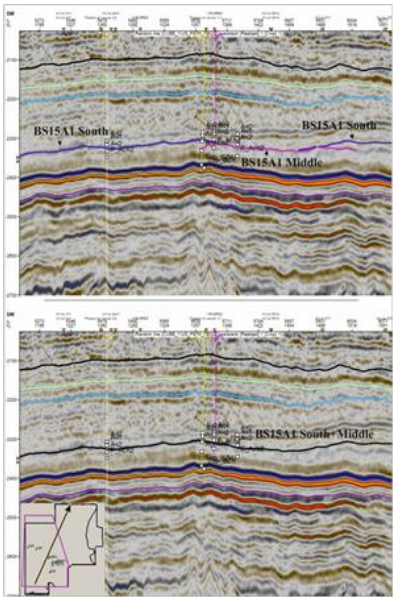


Рис. 5. Объединенная корреляция отражающих горизонтов в центральной и южной частях месторождения («BS15A1 Middle» и «BS15A1 South»)

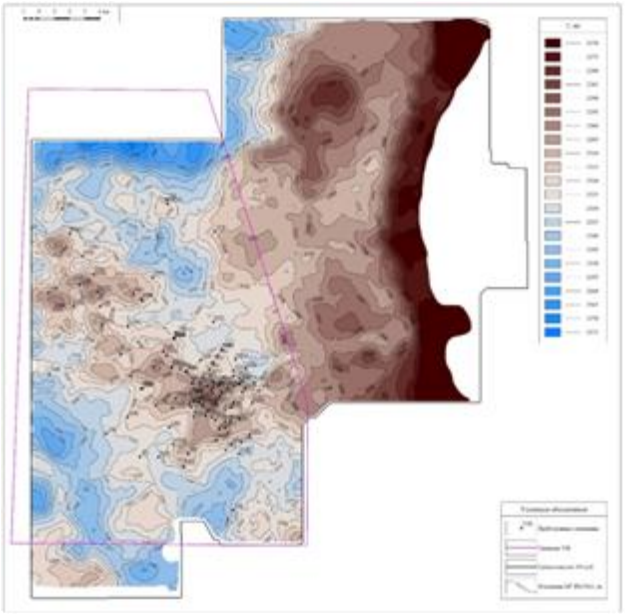


Рис. 6. Карта изохрон по отражающему горизонту «BS15A1»

Затем была рассчитана карта атрибута значений амплитудного сейсмического куба вдоль объединенного отражающего горизонта «BS15A1», позволившая выделить два самостоятельных конуса выноса турбидитных потоков, с которыми связаны две отдельные залежи нефти в ачимовском пласте $Ач_2$ на месторождении, имеющие разные условные подсчетные уровни (УПУ) (рис. 7).

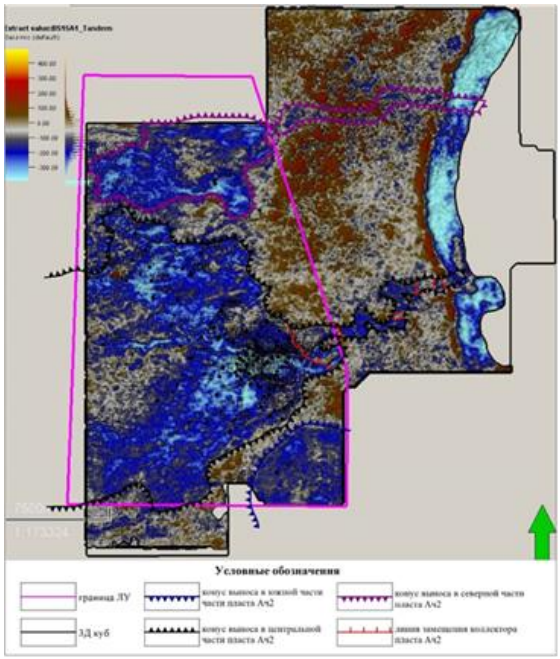


Рис. 7. Расположение двух выделенных конусов выноса турбидитных потоков в разных частях месторождения

По данным детального анализа кернового материала, отобранного на месторождении из 19 скважин, продуктивные отложения идентифицируются как типичные турбидитные осадки. К их основным генетическим характеристикам относится наличие градационной слоистости и типичное ритмичное геологическое строение (в виде частой повторяемости элементарных составляющих ритмов/циклов).

Данные нефтегазоносные объекты в неокомском разрезе Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна начинают постепенно готовиться к разработке. Мы связываем с ними основные перспективы наращивания добычи углеводородного сырья.

Заключение. В результате проведенных исследований построена и подтверждена фактическим материалом альтернативная геологическая модель продуктивных отложений, состоящая из двух самостоятельных конусов выноса обломочного материала. Осуществленные реконструкции направлений турбидитных потоков позволяет выделить два источника сноса обломочного материала, связанных с конусами выноса подводящими каналами. В соответствии с этим выделяются зоны развития проксимальных турбидитов, образовавшихся сравнительно недалеко от источника возникновения мутьевого потока и содержащих хорошие породы-коллекторы.

Список литературы

1. Daly, R. A. Origin of submarine canyons / R. A. Daly // Geology American Journal of Science, 1936, vol. 31, no. 186, pp. 401 – 420. https://doi.org/10.2475/ajs.s5-31.186.401.
2. The Encyclopedia of Sedimentology. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross, Academic Press. 1978. 901 p.
3. Kuenen, Ph. H. Turbidity currents as a cause of graded bedding / Ph. H. Kuenen, C. I. Migliorini // J. Geology, 1950, vol. 58, no. 2, pp. 91 – 127.
4. Bouma, A. H. Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation / A. H. Bouma. Amsterdam: Elsevier, 1962. 168 p.
5. Piper, D. J. W. Turbidite muds and silts on deep sea fans and abyssal plains / // Sedimentation in submarine canyons, fans, and trenches. 1978, pp. 163 – 175.
6. Walker, R. G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models of exploration for stratigraphic traps / R. G. Walker // Bulletin of AAPG, 1978, vol. 62, no. 6, pp. 932 – 966.
7. Walker, R. G. The origin and significance of the internal sedimentary structures of turbidites / R. G. Walker // Proc. Yorkshire Geol. Soc., 1965, vol. 35, pp. 1 – 32.

8. Романовский, С. И. Физическая седиментология / С. И. Романовский. – Ленинград : Изд-во «Недра», 1988. 240 с.
9. Мизенс, Г. А. Верхнепалеозойский флиш Западного Урала / Г. А. Мизенс. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1997. 231 с.
10. Шишлов, С. Б. Структурно-генетический анализ осадочных формаций / С. Б. Шишлов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГГИ, 2010. 276 с.
11. Сынгаевский, П. Е. Глубоководные конусы выноса и турбидиты. Модели, циклостратиграфия и применение расширенного комплекса ГИС / П. Е. Сынгаевский, С. Ф. Хафизов, В. В. Шиманский. – Ижевск : Издательство «Институт компьютерных исследований», 2015. 480 с.
12. Shanmugam, G. The Bouma sequence and the turbidite mind set / G. Shanmugam // Earth-Sci. Rev., 1997, vol. 42, pp. 201 – 229.
13. Shanmugam, G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): deep-water process and facies models – a critical perspective / G. Shanmugam // Mar. Petrol. Geol., 2000, vol. 17, pp. 285 – 342.
14. Stow, D. A. V. Sequences of structures in finegrained turbidites: comparison of recent deep-sea and ancient flysch sediments / D. A. V. Stow, G. Shanmugam // Sediment. Geol., 1980., vol. 25, pp. 23 – 42.
15. Lowe, D. R. Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents / D. R. Lowe // Journal of Sedimentology, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1982, vol. 52, pp. 279 – 297.

УДК 620.186
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-385-389

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВАКУУМНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА СЕВЕРЕ

Алексеев Н.В. [1], *Прохоров Д.В.* [2]
[1]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
[2]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: nikiforalex@bk.ru

Аннотация. *В статье приведены результаты анализа литературных источников. Проведено сравнение основных типов солнечных коллекторов. Уделено особое внимание анализу факторов, влияющих на эффективность работы гелиоустановок в условиях Севера. Рассмотрен практический опыт внедрения солнечных коллекторов в Якутии, показана их работоспособность и экономический эффект.*
Ключевые слова: *солнечное теплоснабжение, вакуумный трубчатый солнечный коллектор, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, инсоляция, комбинированные системы.*

THE POTENTIAL OF SOLAR VACUUM-TUBE COLLECTORS FOR THERMAL ENERGY SUPPLY IN NORTHERN REGIONS

Alekseev N.V. [1], *Prokhorov D.V.* [2]
[1]Ammosov North-Eastern Federal University
[2] Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
E-mail: nikiforalex@bk.ru

Abstract. *The article presents the results of an analysis of literary sources. A comparison of the main types of solar collectors has been conducted. Particular attention is paid to the analysis of factors affecting the efficiency of solar power installations in the conditions of the North. The practical experience of implementing solar collectors in Yakutia is considered, demonstrating their operational viability and economic benefits.*
Keyword: *Solar heating, evacuated tube solar collectors, renewable energy sources, energy efficiency, solar insolation, hybrid systems.*

Как отмечают исследователи, проблемы неэффективного теплоснабжения особенно актуальны в регионах Севера, где «реальная стоимость этих услуг кратно превышает устанавливаемые регулируемые тарифы» [1]. «Увеличенная нагрузка на котлоагрегаты приводит к их большему износу и к необходимости частого проведения капитальных ремонтов, в результате чего затраты на текущее обслуживание и ремонты возрастают» [2].

В статье [3], Новикова А.А. выделяет: «Солнечное теплоснабжение пользуется большим спросом во многих странах, включая Россию, но в настоящее время перспективы развития не утешающие. Требуется доработка государственной программы по проектированию и установке гелиоустановок по районам страны с высокой инсоляцией». В своей работе [4], Родионова И.А. и Шувалова О.В. выделяют следующее: «На территории РФ внедрение ВИЭ экономически оправдано в первую очередь в удаленных районах с децентрализованным энергоснабжением и в регионах со сложными климатическими условиями, также развитие альтернативной энергетики в промышленных масштабах невозможно без государственного субсидирования и поддержки, а решающая роль должна принадлежать государственной энергетической политике, сочетающей финансовые стимулы с императивными нормами».

Согласно постановлению Правления Госкомцен РС (Я) от «15» января 2025 года № 5 [5] стоимость 1 Гкал тепловой энергии приведена на (рис. 1).

Рис. 1. Стоимость 1 Гкал тепловой энергии централизованного теплоснабжения в разрезе населенных пунктов

Согласно исследованиям М.О. Моргунова [6], «наилучшие показатели для использования солнечной энергии в Арктической зоне РФ наблюдаются в южных районах Республики Саха (Якутия)». Как отмечается в исследовании [7], «климат республики выделяется большим количеством солнечных дней. По этому показателю Якутия – лидер Российской Арктики. Почти на всей территории региона солнце светит более 2000 часов в год (максимум в районе г. Якутска – более 2200 часов)».

Распределение ресурсов солнечной энергии на территории РФ [8] приведено на (рис. 2).

Рис. 2. Распределение ресурсов солнечной энергии в РФ

Однако, как указывает в своей работе Шакиров В.А. [9], облачность оказывает существенное влияние на приход солнечной радиации, что говорит о необходимости обязательного учета облачности при оценке экономической эффективности использования солнечных энергетических установок. В таких условиях важным является выбор подходящего типа солнечных коллекторов.

Существует множество различных типов солнечных коллекторов, из которых можно выделить два основных типа:

1) Плоские коллекторы. Плоский солнечный коллектор состоит из металлической пластины (медь или алюминий) с селективным покрытием (темным, для максимального поглощения тепла) к которой прикреплены трубки, по которым циркулирует теплоноситель. Применяются для отопления помещений или для нагрева воды в сезонное или круглогодичное время в регионах с умеренным и теплым климатом. Подобные установки наиболее подходят для южных широт.

2) Вакуумные трубчатые коллекторы. В вакуумных коллекторах температура теплоносителя может достигать 250–300 °С, что значительно выше температурного режима плоских коллекторов. «Внешняя часть солнечной тепловой трубы прозрачная, а на внутренней трубке нанесено специальное покрытие, улавливающее солнечные лучи, и именно между внешней и внутренней стеклянной трубкой

находится вакуум. Благодаря вакууму улавливается и сохраняется порядка 95 % поступающей извне тепловой энергии. В основном применяются в регионах с холодным климатом так как являются более эффективным и современным решением для теплоснабжения» [10].

Из результатов сравнительного анализа [11] исследователи отмечают основные достоинствами плоских коллекторов: большая площадь абсорбера, низкая стоимость и возможность организации принудительной оттайки от снега. А из недостатков выделяют: низкий КПД при высоких температурах абсорбера и риск замерзания теплоносителя.

Достоинства вакуумных трубчатых коллекторов: высокий КПД и рабочая температура, а также исключают риск заморозки. Из недостатков: более высокая стоимость и сложность оттайки от снега без дополнительных систем.

Как показало исследование Ю.Г. Коломиец [12], использование вакуумных солнечных коллекторов для нагрева воды до бытовых температур (55–60 °С) не имеет значительных преимуществ перед плоскими коллекторами. Автор говорит, что в большинстве случаев с энергетической точки зрения предпочтительнее использовать плоские коллекторы той же площади. Ключевым выводом работы является положение о том, что энергетические преимущества вакуумных коллекторов начинают проявляться лишь при необходимости нагрева теплоносителя свыше 80 °С, что напрямую связано с их значительно более низкими удельными тепловыми потерями по сравнению с плоскими аналогами.

Сравнительная характеристика коллекторов солнечного отопления представлена на (рис. 3) [13].

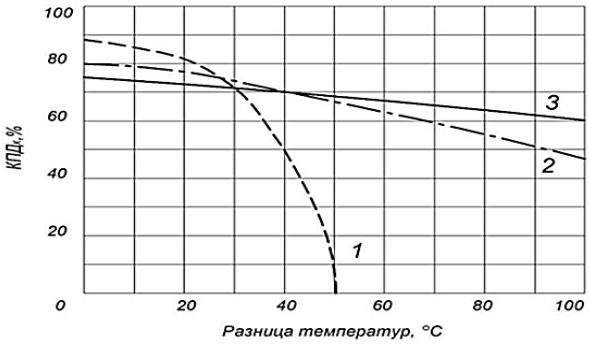


Рис. 3. Сравнительная характеристика коллекторов солнечного отопления
1 – открытый солнечный коллектор;
2 – плоский солнечный коллектор;

Особый интерес представляет опыт Якутии, где солнечные коллекторы успешно работают в экстремальных условиях. В посёлке Жатай «умные дома» с солнечными установками и энергоэффективными технологиями (рис. 4) позволяют экономить до 40% на коммунальных расходах даже при температурах ниже –50 °С. Опытным путём были оптимизированы решения: например, переход на комбинированные системы с газовыми котлами вместо дорогостоящего электрического нагрева [14].

Рис. 4. Системы солнечных коллекторов в посёлке Жатай

В период с 2015 по 2016 год предприятием ООО «Теплокомфорт» реализован ряд проектов (рис. 5) по использованию солнечных коллекторов для теплоснабжения домов и подготовки горячей воды. Было реализовано несколько проектов от индивидуальных домов в с. Аппаны и г. Вилюйске до многоквартирного дома в с. Борогонцы, где на крыше установлены 21 коллектор с 630 вакуумными трубками (рис. 5). Исследования в Якутии подтвердили эффективность вакуумных коллекторов даже при низких температурах и коротком световом дне [15–16].

Рис. 5. Примеры реализованных проектов в Республике Саха (Якутия)

Выводы:

1) На основании проведенного анализа можно сделать вывод о высокой перспективности использования вакуумных трубчатых солнечных коллекторов для систем теплоснабжения в условиях Севера на примере Республики Саха (Якутия). Несмотря на суровый климат, регион обладает значительным потенциалом солнечной инсоляции, что создает огромную возможность для освоения солнечной энергетики.

2) Проведенное сравнение основных типов коллекторов показало, что вакуумные трубчатые коллекторы, благодаря своей конструкции, обладают ключевыми преимуществами для северных регионов: высокий КПД при низких температурах окружающего воздуха, способность работать при низких температурах и минимальные теплопотери. Как указывают исследователи, их энергетические преимущества особенно ярко проявляются при необходимости нагрева теплоносителя до высоких температур (свыше 80°C).

3) Практический опыт внедрения в Якутии подтвердил работоспособность и экономическую эффективность систем солнечных коллекторов, обеспечивающих значительную экономию на затратах на теплоснабжение и ГВС. Наиболее оптимальной схемой их применения являются комбинированные системы в паре с традиционными источниками энергии.

Дальнейшее развитие солнечного теплоснабжения на Севере требует совершенствования технологий, учета местных климатических особенностей и активной государственной поддержки для широкого внедрения энергоэффективных решений.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках проекта государственного задания №FWRS-2024-0031 программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.*

Список литературы

1. Чайка, Л. В. Традиционная и новая малая энергетика в Северных регионах России / Л. В. Чайка // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2021. Т. 24, № 1(71). С.13-25. DOI 10.37614/2220-802X.1.2021.71.002.
2. Швецова И. Н., Чаплыгина Ю. В. Затраты на теплоснабжение и пути их снижения в условиях Севера // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. №5-1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zatraty-na-teplosnabzhenie-i-puti-ih-snizheniya-v-usloviyah-severa (дата обращения: 09.10.2025).
3. Новикова, А. А. Перспективы использования солнечного теплоснабжения в России / А. А. Новикова, Н. С. Казачек // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. №1. С.219-221.
4. Родионова И. А., Шувалова О. В. Некоторые структурные особенности развития мировой энергетики, основанной на альтернативных возобновляемых источниках энергии // Финансы: теория и практика. 2011. №5. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-strukturnye-osobennosti-razvitiya-mirovoy-energetiki-osnovannoy-na-alternativnyh-vozobnovlyaemyh-istochnikah-energii (дата обращения: 08.09.2025).
5. Государственный комитет по ценовой политике Республики Саха (Якутия). Об установлении льготных тарифов на тепловую энергию (мощность), поставляемую теплоснабжающими организациями для субъектов малого и среднего предпринимательства и физических лиц, имеющих на праве собственности гаражи на территории Республики Саха (Якутия), на 2025 год : постановление от 15 января 2025 г. № 5. Якутск, 2025. 14 с.
6. Моргунова, М.О. Энергия Арктики / М.О. Моргунова, А.Я. Цуневский / под научн. ред. В.В. Бушуева. – М.: ИЦ «Энергия», 2012. 84 с.
7. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики / В. Х. Бердин, А. О. Кокорин, Г. М. Юлкин, М. А. Юлкин. Москва: Всемирный фонд природы, 2017. 80 с.
8. Антропов А. С. Обзор потенциала применения солнечных ресурсов в мире и России [Электронный ресурс] // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. 2022. №5(68). С.1-6. URL: https://alley-science.ru (дата обращения: 11.11.2025).

9. Шакиров, В. А. Методика учета влияния облачности на поток солнечной радиации по данным архивов метеостанций / В. А. Шакиров, А. Ю. Артемьев // Системы. Методы. Технологии. 2014. №4(24). С.79-83.
10. Лапина, С.Д. Солнечные коллекторы как альтернативные источники энергии / С.Д. Лапина, И.Ю. Поспелова // Развитие науки и техники: механизм выбора и реализации приоритетов : Сборник статей международной научно-практической конференции, Омск, 25 декабря 2017 года. том часть 3. Омск: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2017. С.110-111.
11. Алмаев Артем Юрьевич, Лушкин Игорь Александрович Преимущества и недостатки плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии // Вестник НГИЭИ. 2015. №6 (49). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-i-nedostatki-ploskih-i-vakuumnyh-kollektorov-solnechnoy-energii (дата обращения: 23.01.2025).
12. Коломиец, Ю. Г. Исследование эффективности преобразования энергии солнечного излучения в низкопотенциальное тепло в различных климатических условиях : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.14.01 / Ю. Г. Коломиец ; Объединенный институт высоких температур РАН. Москва, 2009. 18 с.
13. Эффективная теплоэнергетика. Сравнение конструкций различных [Электронный ресурс]. URL: http://eco-energy.kz/a16075-sravnenie-konstruktsij-razlichnyh.html (дата обращения: 15.05.2025).
14. Системы «умного дома» позволяют экономить на тепле жителям поселка в Якутии [Электронный ресурс] // ТАСС. URL: https://tass.ru (дата обращения: 19.03.2025).
15. Корнилов Т.А., Слободчиков Е.Г., Аммосов Д.Н. Эффективность использования систем солнечной генерации для инженерного обеспечения жилых домов в климатических условиях центральной Якутии // Жилищное строительство. 2016. №1-2. С. 10-14.
16. Прохоров Д.В., Васильев С.С. Оценка выработки тепловой энергии вакуумными солнечными трубчатыми коллекторами в Южной Якутии // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри : Материалы конференции, Нерюнгри, 30 октября 2024 года. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2024. С. 178-183.

УДК 620.92
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-390-392

ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ РАЙОНОВ

Васильев П.Ф., Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова ЯНЦ СО РАН
E-mail: kb-8@mail.ru

Аннотация. *Развитие арктической территории России сталкивается с рядом проблем, среди которых одной из важнейших является обеспечение надежного и эффективного электроснабжения изолированных населенных пунктов. Традиционные методы электрогенерации, основанные на дизельных установках, характеризуются высоким уровнем энергопотребления, дороговизной транспортировки топлива и значительным воздействием на окружающую среду. В связи с этим актуальным становится изучение возможностей интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в существующие энергетические схемы.*

Настоящая статья посвящена исследованию преимуществ и ограничений гибридных систем электроснабжения, включающих сочетание традиционного дизельного топлива с использованием возобновляемой энергии, и рассматривает перспективы их широкого внедрения в арктическом регионе России.

Ключевые слова: *Арктика, изолированные энергетические районы, возобновляемые источники энергии, надежность, эффективность.*

HYBRID ENERGY SYSTEMS FOR ISOLATED AREAS

Vasilyev P.F., Khoiutanov A.M., Davydov G.I.
Institute of physical and technical problems of the North SB RAS

Abstract. *The development of Russia's Arctic territory faces a number of challenges, one of which is ensuring reliable and efficient energy supply to isolated settlements. Traditional methods of electricity generation based on diesel plants are characterized by high energy consumption, expensive fuel transportation, and significant environmental impact. Therefore, it is crucial to explore the possibilities of integrating renewable energy sources (RES) into existing energy systems.*

This article explores the advantages and limitations of hybrid power supply systems that combine traditional diesel fuel with renewable energy, and examines the potential for their widespread adoption in the Arctic region of Russia.

Keyword: *Arctic, isolated power regions, renewable energy sources, reliability, efficiency.*

Введение. Арктика представляет особый интерес для экономики и национальной безопасности России. Регион обладает значительными запасами природных ресурсов, имеет важное геополитическое значение и играет ключевую роль в развитии транспортных коридоров международного значения. Вместе с тем, освоение и эксплуатация арктических территорий сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с суровым климатом, большой протяженностью коммуникаций и отсутствием надежных линий электропередач.

Подавляющее большинство населенных пунктов арктической территории расположены вне зоны централизованного энергоснабжения и полагается на собственные небольшие дизельные электростанции. Такие станции зачастую испытывают дефицит ресурса из-за высоких цен на доставку топлива, низкого уровня автоматизации и постоянного износа оборудования. Применение современных методов электрификации, базирующихся на комбинировании традиционной генерации с возобновляемыми источниками энергии, способно значительно повысить энергоэффективность и ресурсосбережение.

Цель настоящей работы заключается в изучении потенциала и перспектив использования гибридных энергетических систем для автономного электроснабжения малых и средних населенных пунктов, расположенных в арктическом регионе России.

Обзор состояния вопроса. Для понимания сущности проблемы рассмотрим ключевые характеристики электроэнергетики арктического региона:

1. Труднодоступность большинства местностей

Большая часть территории расположена далеко от крупных промышленных центров и региональных магистралей. Это осложняет транспортировку топлива и повышает себестоимость произведенной энергии.

2. Жесткий климат

Среднегодовая температура ниже нуля градусов Цельсия практически повсеместно. Холодное лето и долгая зима накладывают особые требования на проектирование и эксплуатацию электрооборудования.

3. Удаленность от центральной энергосистемы

Отсутствие сетевого подключения означает полную независимость каждого поселения от внешнего поставщика энергии, что увеличивает риски перебоев и аварийных ситуаций.

4. Ограниченный потенциал гидроэнергетики

Водные ресурсы арктических рек малопригодны для строительства ГЭС из-за ледового покрова большую часть года и слабого стока воды.

Именно в таком контексте использование гибридных схем генерации выглядит весьма привлекательным решением, способствующим достижению баланса между потребностью в гарантированном снабжении энергией и минимизацией отрицательного воздействия на окружающую среду.

Понятие гибридных систем энергоснабжения. Термином «гибридная система энергоснабжения» обозначают интегрированные комплексы, состоящие из двух или более видов источников энергии, каждый из которых дополняет друг друга для повышения общей эффективности. Примером такой системы является комбинация дизель-генератора с ветрогенератором либо фотогальваническим модулем (солнечная панель).

При проектировании и строительстве гибридных комплексов важно учитывать следующие особенности:

- Необходимость расчета оптимального соотношения мощности основных элементов системы;
- Возможность выбора места размещения компонентов с учетом розы ветров и инсоляции;
- Наличие аккумуляторных батарей для стабилизации частоты напряжения и компенсации колебаний потребления;
- Разработка специализированных алгоритмов управления режимами совместной работы устройств;
- Учет конструктивных особенностей применяемых конструкций и материалов, обеспечивающих бесперебойную работу при низких температурах воздуха.

Наиболее распространенными конфигурациями гибридных систем в настоящее время являются:

1. Система дизель + ветроустановка.
2. Система дизель + солнечный модуль.
3. Полностью комбинированная система дизель + ветро + солнечная энергия.

Каждая из указанных схем имеет свои сильные стороны и области наилучшего применения, выбор конкретной конфигурации определяется местными особенностями природно-климатических условий и инфраструктурных ограничений.

Перспективы внедрения гибридных систем в Арктике. Применение гибридных энергетических систем открывает широкие возможности для улучшения ситуации с обеспечением населения электрической энергией. Среди главных преимуществ можно отметить:

- Сокращение расходов на закупку топлива за счет частичной замены его возобновляемыми источниками;
- Повышение экологической чистоты производства электроэнергии путем снижения объемов эмиссии углекислого газа;
- Увеличение срока службы двигателей внутреннего сгорания за счет уменьшения числа часов работы на полной нагрузке;
- Улучшение показателей надежности и стабильности энергоснабжения вследствие диверсифицированной базы источников энергии.

Тем не менее существуют некоторые препятствия, препятствующие массовому переходу на гибридные технологии:

- Высокая первоначальная стоимость капитальных вложений в установку нового оборудования;
- Необходимость модернизации существующей инфраструктуры контроля и учета электроэнергии;
- Отсутствие нормативных документов и стандартов, регулирующих порядок введения новых форматов генерации;

- Риск недооценки влияния негативных климатических факторов на работоспособность техники.

Эти барьеры преодолимы, однако требуют привлечения государственного участия.

Анализ результатов функционирования подобных пилотных систем показал очевидные экономические выгоды от перехода на гибридные системы. По оценкам экспертов, экономия достигает порядка 30% годовых затрат на топливо, а сроки окупаемости составляют примерно 7–10 лет. Важно подчеркнуть, что указанные показатели достигаются при условии грамотного планирования проекта и правильного подбора технологического оборудования.

Основные направления исследований. Для полного раскрытия потенциала гибридных систем необходимо провести дополнительные научные изыскания в следующих направлениях:

- Исследование оптимальных режимов совместного функционирования разных типов источников энергии;
- Создание методик оценки экономического эффекта от внедрения гибридных технологий;
- Совершенствование программного обеспечения для моделирования и анализа работы сложных систем;
- Проведение натурных испытаний разработанных решений в реальных условиях эксплуатации.

Кроме того, важным направлением дальнейшего изучения является разработка рекомендаций по выбору оптимальной архитектуры комплекса исходя из конкретных характеристик региона и потребностей конечных пользователей.

Заключение. Современная ситуация в сфере энергоснабжения северного региона диктует необходимость поиска эффективных способов повышения доступности и качества услуг. Использование гибридных систем представляет собой одно из перспективных направлений инновационного подхода к решению имеющихся проблем. Имеющийся опыт подтверждает жизнеспособность предложенных подходов, однако дальнейшие усилия требуются для совершенствования нормативно-правовой базы и увеличения масштабов практического применения подобных решений.

Перспективы массового внедрения гибридных систем будут зависеть от множества факторов, включая уровень готовности предприятий и общественных структур, финансовые стимулы государства и научно-технический прогресс в смежных областях.

Список литературы

1. Скотаренко О.В., Бабенков В.И., Никитин Ю.А., Кутепова М.В. Проблемы и перспективы развития энергетического комплекса в арктической зоне РФ / О.В. Скотаренко, В.И. Бабенков, Ю.А. Никитин, М.В. Кутепова // Экономика и управление. – 2019. №7. С.30-37.
2. Баркунов А.О., Никитин А.В., Пионтковская С.А. Энергоснабжение изолированных энергосистем районов Крайнего Севера и Арктики / А.О. Баркунов, А.В. Никитин, С.А. Пионтковская // Международный научный журнал «Вестник науки». 2025. №7. С.544-549.
3. Шепелев, Ф.М. Пути оптимизации расходования углеводородного сырья в Арктическом секторе России / Ф.М. Шепелев, С.Е. Сидоренко // Российский журнал теплоэнергетики. 2024. №2. С.65-72.
4. Новиков, А.Б. Эффективность внедрения возобновляемых источников энергии в арктических регионах / А.Б. Новиков // Электроэнергетика и экология. 2023. №4. С.89-97.

УДК 621.311
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-393-395

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М.
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова ЯНЦ СО РАН
E-mail: kb-8@mail.ru

Аннотация. *Эффективность функционирования электроэнергетических систем в холодных климатических зонах определяется множеством факторов, среди которых основными являются низкие температуры, высокий износ оборудования и увеличенная нагрузка на электрические сети. Настоящая статья направлена на выявление путей повышения энергоэффективности электрических систем, функционирующих в условиях холодной зимы и морозов, а также исследование методов, снижающих издержки и повышающих надежность электросетей.*

Рассматриваемые подходы позволяют минимизировать потери электроэнергии, увеличить срок службы электротехнического оборудования и сократить общие операционные расходы предприятий энергетического сектора.

Ключевые слова: *Холодный климат, электроэнергетические системы, надежность, эффективность, методы.*

METHODS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS IN COLD CLIMATES

Vasilyev P.F., Davydov G.I., Khoiutanov A.M.
Institute of physical and technical problems of the North SB RAS

Abstract. *The efficiency of electric power systems in cold climatic zones is determined by a variety of factors, including low temperatures, high equipment wear and tear, and increased load on electrical networks. This article aims to identify ways to improve the energy efficiency of electric systems operating in cold winters and frosty conditions, as well as to explore methods that can reduce costs and improve the reliability of electrical networks.*

The approaches discussed in this article can help minimize energy losses, extend the lifespan of electrical equipment, and reduce the overall operating costs of energy sector enterprises.

Keyword: *Cold climate, power systems, reliability, efficiency, and methods.*

Введение. Северные регионы России характеризуются продолжительным зимним периодом с сильными морозами, значительной толщиной снежного покрова и повышенным уровнем влажности воздуха. Все эти факторы создают серьезные трудности для эффективной работы энергосистем, поскольку приводят к росту потерь тепла и электроэнергии, ускоренному износу кабелей и проводов, повреждению трансформаторов и других элементов распределительных сетей.

Повышенные нагрузки на электросети связаны не только с ростом потребления электроэнергии, но и с ухудшением условий ее передачи и распределения. Под влиянием низких температур ухудшаются физические свойства проводников, снижается коэффициент полезного действия силовых агрегатов и повышается вероятность отказов отдельных узлов и деталей.

Проблема особенно остро проявляется в сельской местности и малых городах, где используются устаревшие линии передач и отсутствует регулярное техническое обслуживание оборудования. Таким образом, задача повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем приобретает особую важность и значимость.

Ключевые проблемы и ограничения. Энергетические системы, работающие в условиях холодного климата, подвержены ряду трудностей и рисков:

Замерзание обмоток и контактных соединений: Низкая температура вызывает кристаллизацию влаги внутри кабеля, создавая дополнительное сопротивление току и увеличивая тепловые потери.

Повреждение опор воздушных линий электропередачи: Постоянные морозы способствуют возникновению трещин и деформаций металлических и бетонных конструкций, что снижает прочность опор и сокращает срок их службы.

Рост нагрузки на генераторные установки: Резко возрастает потребность в обогревательных приборах и системах отопления зданий, что ведет к увеличению пиковых нагрузок на сети.

Обледенение проводов: Скопление льда на проводниках воздушной линии усиливает весовую нагрузку, вызывая повреждения и обрывы линий.

Все перечисленные явления отрицательно влияют на качество предоставляемых услуг и повышают затраты операторов на ремонт и замену вышедших из строя элементов.

Способы повышения эффективности. Для решения перечисленных проблем предлагается ряд мер и мероприятий, направленных на повышение надежности и энергоэффективности энергетических систем в условиях низких температур:

1. Модернизация сетей и замена устаревшего оборудования

Заменив старые воздушные линии электропередачи современными самонесущими изолированными проводами (СИП), возможно добиться существенного сокращения потерь тока и механических повреждений.

2. Оптимизация режима нагрева трансформаторных станций

Создание автоматических систем подогрева масла в трансформаторах предотвращает образование конденсата и замерзание рабочей жидкости, поддерживая необходимые рабочие температуры и улучшая КПД.

3. Автоматизированные системы мониторинга и диагностики

Установка датчиков и интеллектуальных измерителей позволяет своевременно выявлять отклонения в работе оборудования и оперативно устранять неисправности.

4. Укрепление и утепление фундаментов опор и опорных столбов

Укладка дополнительного слоя теплоизоляционных материалов и устройство анкерных креплений увеличивают стойкость опор к механическим нагрузкам и продлевают срок их эксплуатации.

5. Использование новейших материалов и покрытий

Покрытие проводов специальными антиобледенительными составами уменьшает количество накапливающегося снега и льда, предотвращая аварии и повреждение линий.

6. Организация регулярного профилактического осмотра и ремонта

Регулярное проведение технического обслуживания и планового ремонта существенно снизит число незапланированных отключений и сократит объемы работ по ликвидации последствий аварий.

Результаты практического применения методов и способов. Практика показывает и подтвердила эффективность предложенных методов. Замена старых неизолированных проводов на современные самонесущие изолированные позволила снизить потери электроэнергии почти вдвое, уменьшив общее энергопотребление и улучшив безопасность эксплуатации.

Автоматические подогреватели трансформаторного масла показали существенное увеличение продолжительности срока службы трансформаторов и сокращение количества поломок.

Применение автоматизированных систем диагностики позволило быстро обнаруживать и исправлять дефекты, сократив среднее время восстановления подачи электроэнергии после аварийных ситуаций.

Экономическая оценка предложений. Расчеты показывают, что полная модернизация электробытовых сетей в северной части России приведёт к следующим результатам:

- Снижение общих потерь электроэнергии составит около 15%;
- Срок службы силового оборудования увеличится минимум на 20%;
- Операционные расходы на поддержание нормальной работы сетей снизятся примерно на треть.

Экономическая выгода достигается за счет экономии на ремонте, замене оборудования и повышении общего уровня надежности электроснабжающей инфраструктуры.

Заключение. Предлагаемые меры направлены на достижение долгосрочной цели повышения эффективности и надежности работы электроэнергетических систем в условиях холодного климата. Использование прогрессивных технологий и современного оборудования позволит создать эффективную и экономически выгодную инфраструктуру, удовлетворяющую требованиям сегодняшнего дня и будущего.

Основные выводы состоят в следующем:

Использование новых материалов и усовершенствованных конструкций дает значительный эффект по улучшению качественных показателей электросетей.

Инвестиции в модернизацию возвращаются в течение короткого периода времени, демонстрируя положительную динамику доходов.

Интеграция цифровых решений повышает точность мониторинга и управления оборудованием, упрощая процесс принятия управленческих решений.

Следовательно, дальнейшее распространение указанных методов обеспечит устойчивый рост эффективности и станет важнейшим фактором сохранения конкурентоспособности российского энергетического сектора.

Список литературы

1. Кобылин В.П. Повышение эффективности работы ЛЭП и подстанций в условиях низких температур / В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су // Международная арктическая конференция «Актуальные пути решения проблем развития северных территорий». – СПб., 2000. – С.71-76.
2. Лагутенко А.Р., Кислицын Е.Ю. Повышение эксплуатационной надежности воздушных линий 6-10 кВ в условиях холодного климата / А.Р. Лагутенко, Е.Ю. Кислицын // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России. – Москва, 2024, Знание-М. – С. 226-233.
3. Логинова С.Е. Пособие по проектированию воздушных линий электропередачи напряжением 0,38-20 кВ с самонесущими изолированными и защищенными проводами. Книга 4. Система защищенных проводов напряжением 6-20 кВ / С.Е. Логинова, А.В. Логинов, В.М. Ударов // – ред. 5. – СПб.: ENSTO – ОАО «НТЦ электроэнергетики» – РОСЭП, 2017.
4. Кобылин В.П. Некоторые вопросы эксплуатации трансформаторных подстанций на Севере / В.П. Кобылин, Л.И. Аргунов // Вопросы энергетики ЯАССР. 1973. – Якутск, 1973. – С. 53-59.

УДК 621.315
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-396-399

СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ РАЙОНОВ С МАЛЫМИ ПЛОТНОСТЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Васильев П.Ф., Давыдов Г.И., Хоютанов А.М.
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова ЯНЦ СО РАН
E-mail: kb-8@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены пяти- и семипроводные системы электропередачи с трехфазными трансформаторами, которые являются дальнейшим развитием схем, в которых, в качестве одного из фазных проводов используется земля (ДПЗ). Сохраняя все преимущества системы ДПЗ, она лишена ее недостатков и может быть применена для реконструкции существующих сетей, а также для сооружения новых для районов с малыми плотностями электрических нагрузок (Север и Арктика).*
Ключевые слова: *Системы электропередачи, ДПЗ, дальние электропередачи.*

TRANSMISSON SYSTEMS FOR AREAS WITH LOW DENSITIES OF ELECTRICAL LOADS

Vasilyev P.F., Davydov G.I. , Khoiutanov A.M.
Institute of physical and technical problems of the North SB RAS

Abstract. *Five and seven-wire transmission systems with three-phase transformers are considered, which are, also, a further development of the system, which, as one of the phase conductors used grounding (TWG). Retaining all the advantages of the TWG system, it is devoid of its drawbacks and can be used for reconstruction of existing networks, as well as for the construction of new districts for the low-density electrical loads (the North and the Arctic).*
Keywords: *Power systems, two wires grounding, TWG, long-distance transmission line.*

Север отличается очаговым распределением производительных сил, значительным расстоянием потребителей от источников электроснабжения, низкой концентрацией населения на обширных территориях. Электрические сети характеризуются разнообразием уровней напряжения, большой длиной линий передач, трудными природно-климатическими и инфраструктурными условиями эксплуатации – отсутствием дорог, невозможностью проезда по трассам летом, нехваткой специальной техники и слабостью ремонтно-эксплуатационных служб.

Объединение энергетических систем Восточной Сибири, Якутии, Дальнего Востока и Магаданской области позволит задействовать мощностные ресурсы гидрогенерирующих комплексов: Братской, Усть-Илимской, каскадов Вилюйских ГЭС, Южно-Якутского гидроэнергокомплекса, Колымской, Усть-Среднеканской, Зейской и Бурейской ГЭС, чья электроэнергия существенно дешевле продукции тепло- и дизель-электростанций. Для дальнейшего развития энерготранспортных систем необходимы инновационные инженерные решения, направленные на модернизацию элементов воздушных линий, автоматизацию транспортировки электричества, что обеспечит повышение надежности и эффективности линий электропередач, сохранение качества напряжения, увеличение пропускной способности и стабильную эксплуатацию [1].

Для повышения рентабельности важно увеличивать мощность передаваемой электроэнергии на большие дистанции при пониженном уровне напряжения, балансируя растущие затраты пропорционально увеличению протяженности линии и снижая себестоимость передачи энергии. Предлагаемые схемы позволяют переходить на повышенные классы напряжения без замены имеющегося оборудования и представляют собой дальнейшее развитие технологий, в которых одним из проводников выступает земля (например, ДПЗ и её вариации), широко использовавшихся в СССР при строительстве сельских высоковольтных сетей в 30–50-х годах прошлого столетия. Новая конструкция сохраняет достоинства системы ДПЗ [2, 3] и устраняет её недостатки, пригодна для модернизации действующих линий и строительства новых в регионах с малой электрической нагрузкой (Север и Арктика). Предложенные схемы отличают от предыдущих разработок [4, 5, 6] заменой заземленного проводника на воздушный. Таким образом, четырёхфазная линия электропередачи с трёхфазными трансформаторами (двойная система ДПЗ) становится пятипроводной (см. рис. 1), а шестифазная линия (тройная система ДПЗ) превращается в семипроводную (см. рис. 4).

Пятипроводная система электропередачи. Одним из трансформаторов каждой пары трехфазных трансформаторов устанавливается группа соединения обмоток «звезда-треугольник» 11, другим – «звезда-треугольник» 1. Возможны и альтернативные варианты групп соединений, если разница углов сдвига составляет 60^0, 180^0 и т. п. Фаза А одной трансформаторной установки подключается к фазе С другой, остальные четыре выводных конца трансформаторов подсоединяют либо к сборным шинам, либо непосредственно к линии электропередачи.

Таким образом, предлагаемая конфигурация обеспечивает ряд преимуществ перед традиционными системами электропередачи:

- Повышение надёжности благодаря отсутствию зависимости от состояния грунта («земли») и улучшению условий эксплуатации оборудования.
- Экономичность: отсутствует необходимость в замене существующего электрооборудования при переходе на повышенный класс напряжения.
- Возможность организации компактных линий передачи даже в условиях малонаселённых территорий, характерных для северных регионов России и арктической зоны.

Использование пятипроводной системы позволяет сохранить многие положительные характеристики традиционной системы ДПЗ [2, 3] одновременно устраняя присущие ей ограничения, обеспечивая надежную передачу больших объемов электроэнергии на значительные расстояния при умеренной стоимости реализации проектов.

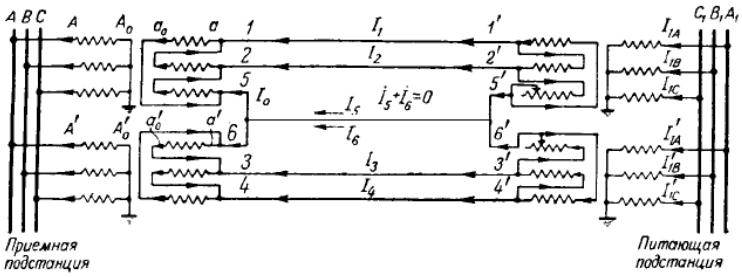


Рис. 1. Принципиальная схема пятипроводной электропередачи

Анализ векторных диаграмм, приведенных на рисунках 2 и 3, показывает, что использование одинакового типа подключения трансформаторов на всех промежуточных подстанциях гарантирует формирование звездообразной структуры распределения напряжений и токов на холостом ходу линии. Эта структура представлена четырьмя лучами, сумма векторов которых стремится к нулю. Это простое утверждение легко доказать, рассматривая пятипроводную линию как две стандартные трехфазные системы.

Ключевые особенности пятипроводной системы включают:

Высокая степень симметрии конструкции, что упрощает расчет режимов работы и повышает надежность всей системы.

Возможность автоматического преобразования в обычную трехфазную схему, используя доступные средства автоматизации.

Повышенная эффективность: по сравнению с классической трехфазной системой пропускная способность увеличивается примерно в 2,25 раза [5]. Это достигается за счёт особенностей конструктивного исполнения и оптимизированного алгоритма управления потоками мощности.

Подобные улучшения делают пятипроводную систему привлекательной для масштабирования в регионах с ограниченными ресурсами и высокими затратами на строительство инфраструктуры электропередачи, таких как северные районы России и арктические регионы.

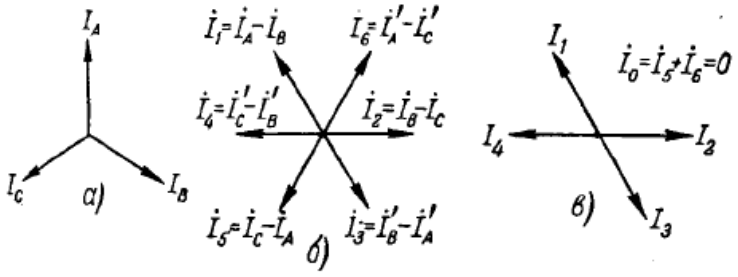


Рис. 2. Векторные диаграммы токов без учета падения напряжения в линиях электропередачи.
а – токи нагрузки; *б* – токи линейной стороне трансформаторов;
в – токи в линии

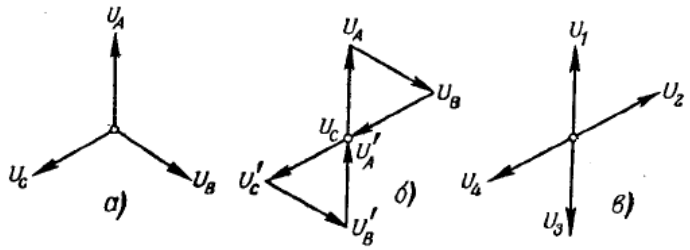


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений без учета падения напряжения в линиях.
а – напряжения у потребителей; *б* – напряжение на линейной стороне трансформаторов;
в – напряжения на линии

Семипроводная система электропередачи. Семипроводная система электропередачи представляет собой усовершенствованную версию оригинальной системы ДПЗ с отличием в том, что роль дополнительного («земляного») токопровода выполняет дополнительный воздушный проводник [7]. Такая модификация позволяет создать единую общую структуру, охватывающую три трехфазные системы с теми же уровнями фазных и линейных напряжений, что и в стандартной трехфазной линии (см. рис. 4).

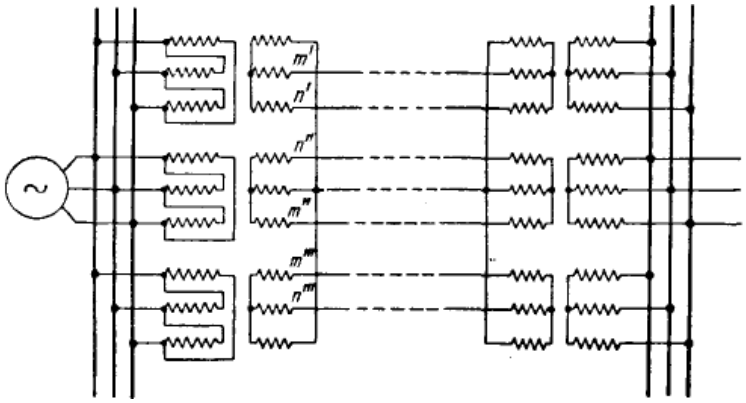


Рис. 4. Принципиальная схема семипроводной электропередачи

Векторная диаграмма напряжений представлена на рисунке 5. Данная схема подразумевает организацию подстанций с использованием трех трансформаторов и семи сборных шин, от которых можно выводить линии различного назначения и класса напряжения для снабжения изолированных потребителей в сельской местности, учитывая специфику нагрузки, расстояние до потребителя и требования к надежности.

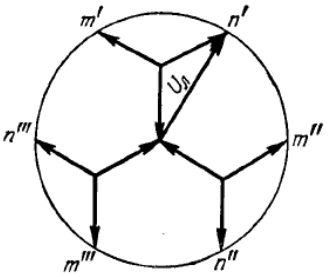


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений семипроводной электропередачи

Преимущества данной схемы относительно традиционного варианта подстанции с двумя трансформаторами и тремя шинами очевидны:

- Значительное расширение возможностей выбора конфигурации линий электропередачи, исходя из их протяжённости, категорий надёжности, мощности и режима потребления конечных пользователей, что способствует росту гибкости и стабильности поставок электроэнергии.
- Уменьшение активных потерь мощности в сетях за счёт перехода на повышенное напряжение для отдалённых участков.
- Пропускная способность линии повышается приблизительно в 2,5 раза по сравнению с двухцепной трехфазной шестипроводной конструкцией [6].

Заключение. Однако указанные преимущества носят предварительный характер и нуждаются в детальном научном обосновании посредством практических исследований. Несмотря на некоторое увеличение количества трансформаторов, влияние на общие расходы минимально ввиду значительного удельного веса расходов на сами линии электропередачи. Проблемы асимметрии напряжений могут эффективно разрешаться применением специальных компенсаторов и управляемого оборудования стабилизации параметров. Однако такие важные аспекты, как изоляция, защита, расчёт режимов, конструкция опор и прочие моменты, остаются предметом дальнейших исследований.

Список литературы

1. Нестеров А.С., Давыдов Г.И., Васильев П.Ф. Альтернативное решение развития электроснабжения потребителей Арктической зоны Республики Саха (Якутия). Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. № 4. С. 54.
2. Эбин Л.Е., Алукер Ш.А. Электрический расчет сетей с использованием земли в качестве одного из фазных проводов (два провода – земля). Госэнергоиздат. 1949.
3. Орошкинский П.С. Передача энергии трехфазным токов по системе два провода – земля. Изд. Академия наук СССР. 1935.
4. Андреев В.В. Четырехфазная схема электропередачи с трехфазными трансформаторами. Электричество. 1952. С. 15.
5. Фильштинский А.А. Четырехпроводная электропередача как средство повышения экономичности и надежности высоковольтных сетей. Электричество. №1. 1952. С. 17.
6. Эбин Л.Е. Экономические схемы электропередачи и методы их расчета. Электричество. 1952. №1. С. 23.

УДК 504.61; 502:63; 579:69
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-400-403

ВЛИЯНИЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЯ НА БИОРАЗНООБРАЗИЕ И ЭКОСИСТЕМНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Вит А.А.[1], Салтыкова А.Л.[2], Ерофеевская Л.А.[1]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: alina_vit@list.ru

Аннотация. *Исследования фоновых и антропогенных почв в арктической зоне Якутии выявили разнообразие бактерий и грибов, часть из которых способна участвовать в биодеградации углеводородов. Однако на участках с визуально фиксируемыми пятнами нефтепродуктов выявлены локальные участки с анаэробными условиями, где преобладают процессы микробного гниения органических веществ, что выражается в сравнительно высокой численности гнилостных бактерий родов Proteus и Pseudomonas на фоне отсутствия нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий, что может угрожать стабильности арктических экосистем.*

Ключевые слова: *арктическая зона; почвы; нефтезагрязнение; биодеградация; микроорганизмы.*

IMPACT OF OIL CONTAMINATION ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM PROCESSES IN ARCTIC CONDITIONS

Vit A.A.[1], Saltykova A.L.[2], Erofeevskaya L.A[1]
[1]Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia
[2]Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia

Abstract. *Studies of background and anthropogenic soils in the Arctic zone of Yakutia revealed a diversity of bacteria and fungi, some of which are capable of participating in the biodegradation of hydrocarbons. However, at sites with visually detectable oil product stains, localized areas with anaerobic conditions were found, where microbial putrefaction of organic matter predominates. This is manifested by a comparatively high abundance of putrefactive bacteria of the genera Proteus and Pseudomonas against a background of absence of nitrifying and denitrifying bacteria, which may threaten the stability of Arctic ecosystems.*

Keywords: *Arctic zone; soils; oil pollution; biodegradation; microorganisms.*

Введение. В настоящее время ситуацию с состоянием почвенного покрова Якутии нельзя назвать благополучной. Причиной тому являются как антропогенные, так и естественные процессы, которые, тем не менее, усугубляются деятельностью человека. Практически все почвы территории Якутии в той или иной степени загрязнены. Чистыми (правильнее сказать – условно чистыми) остаются совсем незначительные участки, которые, как правило, расположены в районах особо-охраняемых природных территориях (ООПТ) [1]. Что касается микробиологической активности мерзлотных почв Якутии, то они проводится эпизодически, поэтому сих пор нет целостной картины численного и качественного состава микрофлоры почв мерзлотных ландшафтов [2–4]. Вместе с тем почвенные микроорганизмы очень чутко реагируют на изменения окружающей среды, что определяет целесообразность использования их в мониторинге почв, подверженных загрязнению различными поллютантами [3]. Характеристика микробных сообществ разных мест обитания особенно актуальна в связи с изучением и сохранением биоразнообразия экосистем [2].

Из числа всех обитателей почвы, на микроорганизмы приходится 85%. Особенно богато населены микроорганизмами поверхностные горизонты (до 20 см), а с углублением их число становится все меньше и меньше, хотя не редки случаи, когда они обнаруживаются и на значительных глубинах [5].

Характеризуя микробное население различных типов почв, следует указать на большую его изменчивость не только в течение года, но и небольших отрезков времени [6]. Численность микроорганизмов в почвах изменяется не только в связи с сезонными изменениями экологических условий, но и

в силу внутренних закономерностей развития микробных популяций [7]. Исторические абиотические факторы: pH, t°C, влажность, химические превращения в почвах не биотического характера могут быть первоочередными регуляторами встречаемости для многих грибов, но имеются доказательства, что регулирование может быть связано, в первую очередь, с состоянием микробного сообщества и в настоящее время не поддается описанию [8]. Исследование качественного и количественного состава почвенной микрофлоры дают во многом условные результаты, однако, если применять в работе одни и те же методики исследований, то можно добиться показательных значений [9]. Однако, до сих пор нет целостной картины состава микроорганизмов, населяющих почвы мерзлотных ландшафтов. Прежде всего, проведение таких исследований осложнено эпизодическим характером сбора образцов почвы и затруднено обширностью арктических территорий, логистикой и удаленностью исследуемых объектов от научных центров. Исследователям приходится разрабатывать стратегию выборочного сбора образцов, чтобы максимально покрыть разнообразие мерзлотных почв в регионе. Поэтому существует недостаток сведений о микробиологическом состоянии мерзлотных почв во времени, что затрудняет анализ и понимание микробиологических процессов, происходящих в них. Несмотря на эти сложности, исследования демонстрируют значительную микробиологическую активность в мерзлотных почвах. Это открывает новые перспективы для изучения и понимания роли микроорганизмов в почвенных экосистемах и использования почвенных микроорганизмов в биотехнологических процессах, в том числе, для биоразложения нефтезагрязнений в окружающей среде.

Цель исследований: оценить влияние нефтепродуктов на структуру биоразнообразия и функционирование почвенных экосистем в арктических условиях Якутии.

Задачи исследований:

1. Сбор почвенных образцов для исследований;
2. Изучение микроорганизмов, присутствующих в почвенных образцах;
3. Выделение из почв наиболее эффективных штаммов, способных деградировать нефть и НП;
4. Изучение влияния нефтезагрязнения на ключевые экосистемные процессы (нитрификацию, денитрификацию, аммонификацию, минерализациюорганических веществ);
5. Разработка рекомендаций по восстановлению нарушенных почвенных экосистем в арктических условиях на основе полученных данных.

Объект и материалы для исследований: условно-чистые (фоновые) и антропогенные почвенные образцы с визуально видимыми пятнами нефтепродуктов (НП), отобранные вдоль береговой линии Булуканского залива (поселок Тикси-1, Булунский район, Арктическая зона Якутии). Координаты отбора проб: фоновые – 70°41'43»с.ш.; 127°22'54»в.д.; антропогенные – 71°39'47» с. ш.; 128°48'42» в. д. и 71°41'25,5»с.ш.; 128°52'9» в. д..

Методы исследований. Выделение микроорганизмов из почв проводили по общепринятым в микробиологии классическим методом посева на дифферинциальные и диагностические питательные среды [10].

Оценку степени обогащенности почв микроорганизмами проводили в соответствии с общепринятой в микробиологии шкале Звягинцева [11].

Численность микроорганизмов выражали в колониеобразующих единицах на 1 грамм абсолютно-сухого веса почвы (КОЕ/г АСВ), учитывая, что КОЕ – это единица учета жизнеспособных микроорганизмов: одна КОЕ соответствует одной клетке.

Результаты исследований. По степени обогащенности микроорганизмами исследуемые почвенные образцы Булуканского залива, в соответствии со шкалой Звягинцева [11], классифицируются как бедные и очень бедные (менее $1 \cdot 10^5$ КОЕ/г АСВ почвы) – по мезофильной группе, и от очень бедных до средне обогащенных (от $1 \cdot 10^5$ до $9 \cdot 10^6$ КОЕ/г АСВ почвы) – по психрофильной (холодолюбивой) группе микроорганизмов.

В групповом составе бактериального комплекса почв береговой линии Булуканского залива доминируют: протеобактерии (*Proteobacteria)* → актинобактерии *(Actinobacteria)* → ацидобактерии *(Acidobacteria)* → фирмикуты *(Firmicutes)* → эризипелотрихи *(Erysipelotrichia)* → депендентии *(Dependenthia)* → хлорофлексии *(Chloroflexi)* → бактероиды *(Bacteroides);* нитроспиры (*Nitospirae)* (рис. 1).

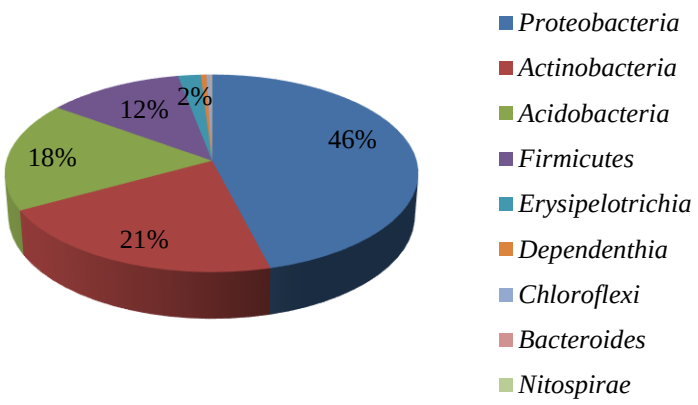


Рис. 1. Групповой состав бактериального комплекса почв Булуканского залива

Численный состав эколого-трофических групп микроорганизмов, способных расти на питательных средах, распределился следующим образом: бактерии (56 %) → актинобактерии (25 %) → микроскопические грибы и дрожжи (19 %).

Из микроорганизмов, принимающих участие в трансформации и иммобилизации питательных веществ выделены дрожжи двух родов (рр.) *Candida* и *Rodotorulla* и непатогенные микроскопические грибы *Penicillium notatum*, *Trichoderma viride* и несколько видов патогенных грибов рр. *Mucor, Phytophthora, Aspergillus* (*A. fumigatus, A. niger, A. flafus*), формирующие темный мицелий на питательных средах.

В группе актинобактериальной линии доминировали (рр.): *Streptomyces, Nocardia, Kocuria.*

Из группы углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) из исследуемых почвенных образцов выделены бактерии рр. *Pseudomonas aeruginosa* и *Staphylococcus petrasii.*

Целлюлозолитические микроорганизмы представлены грибами р. *Aspergillus* и миксобактериями.

Коэффициент минерализации органических веществ, как в фоновых, так и в антроплогенных почвах низкий – в среднем всего лишь 0,8 усл.ед.

Стоит отметить, что в исследованных почвенных образцах, где были зафиксированы запах и визуально фиксируемые следы загрязнений нефтепродуктами, отсутствовали нитрифицирующие и денитрифицирующие микроорганизмы, при этом аммонификаторов в этих почвах было сравнительно много (более 900 млн./1 г АСВ почвы). В то же время в фоновых почвах содержание нитрификаторов и денитрификаторов Из группы аммонифицирующих бактерий в почвах преобладали: *Proteus vulgaris* и *Pseudomonas aeruginosa.* В результате деятельности данных групп микроорганизмов в почвах органический азот переходит в минеральные формы. Однако высокая численность *Proteus vulgaris* и *Pseudomonas aeruginosa* в мерзлотных почвах может нести несколько потенциальных рисков:

- Усиление минерализации органического азота, за счет активной деятельности аммонификаторов, которые приводят к быстрому превращению органического азота в аммоний (NH_4^+). В условиях низких температур и ограниченной растительности это может изменить азотный статус почвы, повысив подвижность азота и увеличив потери через вымывание или газообразование (дегазация как аммиака или через нитрификацию–денитрификацию до N_2, N_2O).

– Повышенный риск выделения токсичных метаболитов и аммиака, которые могут быть токсичны для корней растений и почвенной фауны, нарушая восстановление растительного покрова на загрязнённых площадях.

– Дисбаланс микробного сообщества. В частности, доминирование протеев и псевдомонад может подавлять другие функциональные группы микроорганизмов (например, нитрификаторы, денитрификаторы, сапрофитные гетеротрофы), что снизит устойчивость и функциональное разнообразие почвенной микробиоты и ухудшит восстановительные процессы.

– Потенциал патогенности и санитарный риск. *Proteus vulgaris* и *Pseudomonas aeruginosa* известны, как оппортунистические патогены человека и животных. Их высокая численность в местах, где есть контакт людей, животных или водных источников, может представлять эпидемиологическую опасность – риск инфицирования при контакте с почвой или загрязнённой водой.

– Влияние на качество воды. При многолетнем оттаивании и талых водах увеличивающееся содержание растворённых форм азота и продуктов метаболизма может вымываться в Булуканский залив,

что постепенно может ухудшить качество воды, приводя к эвтрофикации или локальным нарушениям водной экосистемы.

– Взаимодействие с нефтепродуктами. Хотя некоторые штаммы *Pseudomonas* активны в деградации углеводородов, их доминирование в условиях сильного нефтезагрязнения может сопровождаться накоплением промежуточных, иногда более токсичных продуктов разложения, а также сдвигами в сообществах, неполезными для восстановления почв.

Вывод. Исследования почв береговой линии Булуканского залива показали богатый состав бактерий и грибов, часть которых может разлагать углеводороды. Вместе с тем на участках с видимыми пятнами нефтепродуктов обнаружены локальные анаэробные зоны, где доминируют процессы микробного разложения органики; это проявляется в относительно высокой численности гнилостных бактерий родов *Proteus* и *Pseudomonas* при отсутствии нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов. Высокая численность данных видов протеев и псевдомонад в мерзлотных почвах указывает на активный азотный цикл, но одновременно представляет риск дисбаланса экосистемных функций, токсичных накоплений и санитарных проблем. В практическом плане рекомендуется мониторинг форм азота (органический, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-), оценка выбросов аммиака и нитрит/нитратов, исследование наличия вирулентных и резистентных штаммов санитарно-значимых микроорганизмов, контроль качества воды Булуканского залива с оценкой риска для здоровья людей и животных, а также мониторинг содержания нефтепродуктов в почвах береговой линии.

Исследования выполнены в рамках экспедиционных работ по Госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ №122011200369-1 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Новгородов А.А., Евдохарова К.И., Пухова С.П. Общая характеристика экологического состояния почв Якутии // Материалы XII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум-2020» URL:https://scienceforum.ru/2020/article/2018023300»>https://scienceforum.ru/2020/article/2018023300 (дата обращения:30.10.2025).
2. Иванова Т.И. Структура и динамика активности микробных сообществ мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии: Автореф. дис. канд. биол. наук. Улан-Удэ: БГУ, 2006. 22 с.
3. Кузьмина Н.П. Микробиоценозы аласных и антропогенно трансформированных почв Центральной Якутии: Автореф. дис. канд. биол. наук. УланУдэ: БГУ, 2010. 22 с.
4. Стручкова Л.К. Микрофлора мерзлотных лугово-степныхпочв Центральной Якутии и влияние на неё разных доз тяжелых металлов: Автореф. дис. канд. биол. наук. Благовещенск, 2011. 18 с.
5. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 1991. 304 с.
6. Паринкина О.М. Микрофлора тундровых почв. Экологические особенности и продуктивность. JL: Наука, 1989. 159 с.
7. Karl D.M. Determination of in situ microbial biomass, viability, metabolism, and growth, / Bacteria in Nature. V. 2. Methods and Special applications in Bacterial Ecology. / Y.S.Peinelexter and E.K.Leadbetter, eds. / Plenum Press. New York and London. 1986, pp. 55-89.
8. Christensen M. A. View of fungal ecology // Mycologia. 1989, vol. 81, no. 1, pp. 1-19.
9. Мишустин Е. Н. Биологический азот и его значение в сельском хозяйстве / Е. Н. Мишустин // Вестн. АН СССР. 1979. №3. С.59-68.
10. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1980. 224 с.
11. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение, 1978. №6. С.48-54.

УДК 621.31
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-404-406

ОБРАЗОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ИЗМОРОЗИ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ: МОДЕЛИ И БАРЬЕРЫ ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Волотовский Е.С.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: evolotovskiy@gmail.com

Аннотация. *Гололедно-изморозевые отложения на проводах воздушных линий электропередачи представляют серьёзную угрозу надёжности энергосистем. Кристаллическая сублимационная изморозь, образующаяся при благоприятных метеорологических условиях, может привести к технологическим нарушениям на участках, имеющих удовлетворительное состояние и ниже. В данной работе систематизируются физические механизмы образования кристаллической изморози, анализируются существующие математические модели и обсуждаются методы их региональной калибровки. Рассматриваются гибридные подходы, интегрирующие физические модели с алгоритмами машинного обучения. Обозначаются вопросы, показывающие разрыв между научными достижениями и их практическим внедрением в энергосистемах.*

Ключевые слова: *кристаллическая изморозь, воздушные линии электропередачи, машинное обучение, физически информированные нейронные сети*

CRYSTALLINE RIME FORMATION ON OVERHEAD TRANSMISSION LINES: MODELS AND BARRIERS TO THEIR PRACTICAL IMPLEMENTATION

Volotovskii E.S.
V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *Ice and rime accretion on overhead transmission line conductors poses a serious threat to power system reliability. Crystalline sublimation rime, which forms under favorable meteorological conditions, can lead to operational disruptions on sections with satisfactory condition ratings and below. This study systematizes the physical mechanisms of crystalline rime formation, analyzes existing mathematical models, and discusses methods for their regional calibration. Hybrid approaches integrating physical models with machine learning algorithms are examined. Issues highlighting the gap between scientific achievements and their practical implementation in power systems are identified.*

Keyword: *crystalline rime, overhead transmission lines, machine learning, physics-informed neural networks*

Образование кристаллической изморози на проводах воздушных линий электропередачи (ЛЭП) является одной из острейших проблем надёжности энергосистем в регионах холодного климата. Кристаллическая изморозь образуется путём прямого осаждения водяного пара на холодные поверхности при температурах менее − 10 °C и относительной влажности свыше 80 %. В условиях Западной Якутии, Сибири и Урала это явление приобретает критическое значение, так как изморозь может накапливаться со скоростью 2–4 мм/сут. при продолжительности до 155 дней в Западной Якутии [1].

Последствия накопления кристаллической изморози имеют двойственный характер. С одной стороны, ледяные отложения, хотя и пористые, могут создавать нагрузки, соответствующие ледовому классу G3. С другой – увеличивают удельные потери мощности на корону в десятки раз.

За последние сорок лет научное сообщество разработало теоретическое понимание физических механизмов ледообразования, однако между уровнем физико-математического знания и практической способностью энергосистем предсказывать и предотвращать катастрофические гололедно-изморозевые явления существует значительный разрыв. Этот разрыв обусловлен масштабной несогласованностью лабораторных моделей с реальными условиями, недостатком высокоточных входных данных и региональной специфичностью процессов.

Физические механизмы образования кристаллической изморози. Кристаллическая изморозь – это специфичный тип ледяного отложения, формирующийся посредством прямого осаждения (десублимации) водяного пара на холодную поверхность провода без промежуточной жидкой фазы. Этот

процесс описывается уравнением Клапейрона–Клаузиуса, связывающим давление насыщенного пара с температурой [2].

Образование кристаллической изморози контролируется двумя взаимосвязанными факторами: температурным градиентом в системе провод–изморозь–воздух и градиентом давления водяного пара. При контакте молекулы пара с холодной поверхностью провода происходит её внедрение в кристаллическую решётку льда с выделением скрытой теплоты сублимации (≈2835кДж/кг) [2]. Эта энергия должна быть отведена в окружающий воздух для продолжения процесса кристаллизации.

Характерной особенностью кристаллической изморози является её дендритная (игловидная) структура. Ледяные иглы растут преимущественно перпендикулярно направлению ветра, создавая высокопористую структуру с долей воздуха 70–95 % от общего объёма. Несмотря на низкую плотность, эквивалентная масса изморози на единицу длины провода может быть значительной [1].

Систематизация математических моделей. Развитие моделей образования кристаллической изморози прошло путь от простых эмпирических соотношений к комплексным системам нелинейных уравнений в частных производных. Модель Imai (1983) основана на простом балансе энергии и предполагает пропорциональность скорости нарастания к скорости ветра, влажности и разности температур. Однако она не учитывает тип льда и требует региональной калибровки [4][9].

Модель Makkonen (1998) является одной из наиболее признанных и широко используемых [5]. Она основана на детальном балансе массы и энергии, учитывает, как «сухой» (при температурах < -5 °C), так и «мокрый» режимы роста льда. При модели Makkonen скорость нарастания определяется как произведение эффективности столкновения капель, прилипания и кристаллизации, а также водности и скорости ветра [1].

Гибридные физико-математические модели объединяют уравнения энергетического и материального баланса для одновременного описания теплопередачи и массопередачи. Входящие тепловые потоки включают джоулево тепло провода, исходящие – конвективный теплообмен, радиацию и теплопроводность через ледяной слой. Система уравнений решается численно методом конечных разностей с типичным временным шагом 1–60 минут [6].

Современные модели машинного обучения (SVM, XGBoost, LSTM) показывают высокий потенциал. Wavelet-SVM подход достигает точности $R^2 = 0{,}85–0{,}88$, ансамблевые методы – $R^2 = 0{,}87–0{,}93$, LSTM-сети – $R^2 = 0{,}82–0{,}90$ для среднесрочных прогнозов [3][4]. Однако ML-модели хорошо работают лишь в диапазоне обучающих данных и быстро теряют точность при экстраполяции на новые климатические условия.

Региональная калибровка и практические барьеры. Основной источник разрыва между теорией и практикой лежит в региональной специфичности. Физические модели, откалиброванные на данных из одного региона, показывают значительную потерю точности при применении в других географических зонах. Это обусловлено различиями в микроклимате, высоте, влажности и типах почвы.

Для надёжной калибровки необходимо собрать представительный набор экспериментальных данных, включающих метеорологические измерения (с временным разрешением 10–30 минут), измерения толщины льда, температуры провода и геометрические параметры. Минимальная продолжительность сбора данных составляет 2–3 полных холодных периодов [7].

Критические практические барьеры включают: отсутствие унифицированного стандарта сбора данных по всем регионам России; недостаток точных метеорологических станций вблизи ЛЭП; высокую стоимость и техническую сложность приборов мониторинга; и нежелание энергосистем внедрять новые технологии без гарантий надёжности.

Гибридный подход: интеграция физики и искусственного интеллекта.

Физически информированное машинное обучение интегрирует физические принципы в архитектуру нейросетей, сохраняя физическую интерпретируемость и обеспечивая лучшую обобщаемость даже на малых объёмах данных [8]. Такой подход гарантирует физическую корректность предсказаний – модели не предсказывают физически невозможные значения типа отрицательных толщин льда, демонстрируя точность прогнозирования на уровне 85 % и выше [1].

Однако внедрение требует наличия специалистов с двойной компетенцией в области физического моделирования и современных методов машинного обучения.

Выводы и перспективы. Кристаллическая изморозь на ЛЭП представляет серьёзный риск, требующий комплексного подхода. Научное сообщество достигло глубокого понимания физических механизмов ледообразования, разработаны математические модели с точностью $R^2 = 0{,}82–0{,}93$, и продемонстрирован потенциал гибридных подходов. Однако практическое внедрение затруднено отсутствием унифицированных стандартов, недостатком региональных данных и высокими технико-экономическими барьерами.

Для преодоления этого разрыва необходимо: создание национальной сети мониторинга ледообразования на критических участках ЛЭП; разработка открытого стандарта сбора и обмена данными; подготовка специалистов новой направленности, владеющих физическим моделированием и навыками машинного обучения; интеграция систем прогнозирования в реальные системы управления энергосистемой. Только при таком комплексном подходе возможно качественное повышение надёжности электроснабжения в регионах холодного климата.

Список литературы

1. Касимов, В. А. Распознавание локационным методом гололёдных и изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи / В. А. Касимов, Р. Г. Минуллин // Электрические станции. 2018. № 10(1047). С.38-48.
2. Sarsembayeva A., Zhussupbekov A., Collins P. Heat and Mass Transfer by Vapour in Freezing Soils. Energies. 2022, vol.15, no.4, 1515. DOI: 10.3390/en15041515
3. Ma T., Niu D., Fu M. Icing Forecasting for Power Transmission Lines Based on a Wavelet Support Vector Machine Optimized by a Quantum Fireworks Algorithm. Applied Sciences. 2016 6. 54. DOI: 10.3390/app6020054
4. Nusantika N., Xiao J., Hu X. Precision Ice Detection on Power Transmission Lines: A Novel Approach with Multi-Scale Retinex and Advanced Morphological Edge Detection Monitoring. Journal of Imaging, 2024. 10(11):287. DOI: 10.3390/jimaging10110287
5. Hou H., Wang Y., Bai X., Lv J., Cui R., Zhang L., Li S., Li Z. Modelling icing growth on overhead transmission lines: Current advances and future directions. Energy Conversion and Economics. 5. 343-357. DOI: 10.1049/enc2.12131
6. He S., Song Y., Huang H., He Y., Zhou S., Gao Z. Meteorological Characteristics of a Continuous Ice-covered Event on Ultra-High Voltage Transmission Lines in Yunnan Region in 2021. Atmosphere 2024, 15(4), 389. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3451794/v1
7. Li Q., Liao X., Cui., W., Wang Y., Cao H., Zhong X. Online Prediction Method of Transmission Line Icing Based on Robust Seasonal Decomposition of Time Series and Bilinear Temporal–Spectral Fusion and Improved Beluga Whale Optimization Algorithm–Least Squares Support Vector Regression. Applied System Innovation. 2024. 7(3). 40. DOI: 10.3390/asi7030040
8. Zhang M., Xing Y., Zhang Z., Chen Q. Design and Experiment of FBG-Based Icing Monitoring on Overhead Transmission Lines with an Improvement Trial for Windy Weather. Sensors. 2014. 14(12). 23954-23969. DOI: 10.3390/s141223954
9. Тимофеева, М. В. Развитие моделей оценки ледяных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / М. В. Тимофеева, Д. Е. Титов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. Т.13, №4. С.37-45.

628.147.22
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-407-410

БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АРКТИЧЕСКИХ ШЕЛЬФОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Давыдов А.Д.[1], Ермаков Б.С.[1], Клочков Ю.С.[2]
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[2]Тюменский индустриальный университет
E-mail: davydov_ad@spbstu.ru

Аннотация. *Зона арктического шельфа, закрепленного за Российской Федерацией, является перспективным направлением развития нефтегазовой отрасли страны, требующим применения больших инвестиций, новых технологий и материалов. Для обеспечения надежности эксплуатации таких объектов необходимы испытания и исследования новых типов трубопроводов.*

Существующие промысловые трубопроводы арктических шельфов основаны на низко агрессивных и высокомаржинальных месторождениях углеводородов. В таких условиях допускается применение материалов, основной характеристикой которых является механическая прочность и хладостойкость. Однако в условиях повышенной агрессивности добываемого флюида (обводненность, содержание CO_2 и H_2S, хлориды и другие компоненты попутной воды), возможны серьёзные ограничения и повышенные требования к материальному исполнению трубопроводов. В работе рассмотрены перспективы использования промысловых трубопроводов в биметаллическом исполнении, сочетающих внутренний слой из коррозионностойких сплавов (CRA) и внешний слой из конструкционных углеродистых сталей (LAS).

На основе опыта и исследований биметаллических трубопроводов, а также обзора и анализ конструктивных особенностей таких труб, методов их изготовления, а также технологий сварки, сделаны суждения об эффективности таких решений в определенных условиях. Обоснована высокая эффективность такого подхода с точки зрения стойкости к коррозии, экономичности и ресурса. Подсвечены области применения биметаллических трубопроводов в условиях шельфа в арктической зоне с точки зрения надежности и экономической эффективности.

Ключевые слова: *Биметаллы, промысловые трубопроводы, шельф, Арктика, коррозия трубопроводов*

BIMETALLIC PIPELINES FOR THE DEVELOPMENT OF FIELD INFRASTRUCTURE OF ARCTIC OFFSHORE FIELDS

Davydov A.D.[1], Ermakov B.S.[1], Klochkov Yu.S.[2]
[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
[2]Industrial University of Tyumen

Abstract. *The Arctic offshore zone under the jurisdiction of the Russian Federation is a promising area for the country's oil and gas development and will require substantial capital investment, new technologies, and advanced materials. Ensuring reliable operation in this environment calls for the qualification and study of new pipeline concepts. Existing Arctic-shelf infield pipelines have mostly served low-corrosivity, high-margin hydrocarbon fields, where materials have been selected primarily for mechanical strength and low-temperature toughness. However, where the produced fluid is more aggressive – high water cut, elevated CO_2 and H_2S, chlorides, and other produced-water constituents – stricter materials-selection criteria and design constraints become necessary. The paper evaluates the use of bimetallic pipelines that combine an inner layer of corrosion-resistant alloy (CRA) with an outer layer of low-alloy steel (LAS). Drawing on operational experience and published research, and reviewing design features, manufacturing routes, and welding technologies for such pipes, we assess the effectiveness of these solutions under defined service conditions. We demonstrate the advantages of this approach in terms of corrosion resistance, cost efficiency, and service life, and identify Arctic applications where bimetallic pipelines provide clear reliability and economic benefits.*

Keyword: *Bimetals, field pipelines, shelf, Arctic, pipeline corrosion*

Введение. Освоение арктического шельфа сопровождается особыми требованиями к надёжности подводных промысловых трубопроводов: особенности береговых линий, низкие температуры, ограниченные окна строительства, логистика и крайне высокая стоимость ремонтных операций повышают цену ошибки и делают выбор материалов ключевым фактором надежности системы. Одним из

базисов иностранных проектных требований для подводных трубопроводов служит стандарт DNV-ST-F101, который охватывает все фазы жизненного цикла – от концепции до вывода из эксплуатации, и устанавливает единый уровень безопасности и критерии прочности/надёжности для морских условий, включая Арктику [1]. При проектировании ответственных участков эксплуатации месторождения, к которым можно отнести подводные трубопроводы, требуется уделять особое внимание металловедению и управлению коррозией. Так как инспекция таких трубопроводов затруднена, в том числе, суровыми условиями шельфов за полярным кругом. Систематизированный обзор по эксплуатации морских систем в суровой среде подчёркивает, что устойчивость к внешним воздействиям должна сопровождаться снижением вероятности внутренних отказов – особенно там, где окна для ремонта и инспекции крайне ограничены [2].

Важным элементом при разработке и формировании проекта шельфового месторождения является надежность промысловых трубопроводов. Все существующие на данный момент месторождения на шельфе характеризуются низкой коррозионной активностью и высокой степенью отдачи. На таких месторождениях основными требованиями к трубопроводным системам являются механическая прочность и хладостойкость. Однако с повышением срока эксплуатации месторождения или при разработке скважин, в которых содержатся агрессивные газы (CO_2 и H_2S), высокая минерализация и обводненность, требуется рассматривать надежные и долговечные материалы. В качестве перспективного варианта материального исполнения подводных промысловых трубопроводов рассматривается применение биметаллической горячекатанной трубной продукции [3]. Оценка экономической составляющей не только на этапе проектирования (CAPEX), но и в процессе эксплуатации (OPEX) в определенных условиях также демонстрирует эффективность применения биметаллов. При рассмотрении горизонта работы месторождения на несколько десятков лет в безаварийном формате позволяет показать конкурентную способность данного материального исполнения не только к цельным трубопроводами из коррозионностойких сплавов, но и по отношению к низколегированным исполнениям. Так, в работе [4], было показано, что при повышенной коррозионной активности в транспортируемой среде, уже при прогнозируемой средней скорости коррозии на трубопроводе на уровне 0,45 мм/год, биметаллические трубопроводы экономически эффективнее, чем низколегированные с применением ингибирования.

Материалы и методы. Классическая конструкция трубопровода, применяемая при наземной и подводной добыче углеводородов, базируется на использовании труб из углеродистой или низколегированной стали. Однако в определенных условиях Арктических шельфов эти материалы не обеспечивают одновременно достаточной морозостойкости, а также коррозионной стойкости при взаимодействии с флюидами, содержащими CO_2, H_2S и водные растворы хлоридов. Трубопроводы, устойчивые к таким воздействиям, включают: внутренние защитные покрытия – подвержены эрозии, нарушению целостности, температура; цельные трубы из сплавов типа CRA (corrosion-resistant alloys) – дорого и сложно в производстве; полимерно-композитное исполнение трубопроводов (не освоено в РФ). Биметаллические трубы – наиболее сбалансированное решение с точки зрения механической прочности и коррозионной стойкости. На рисунке 1 представлена сводная таблица с результатами аналитического обзора и качественного сравнения материального исполнения промысловых трубопроводов при освоении Арктического шельфа.

Параметр	Материалы			
	Углеродистые стали	Коррозионностойкие стали и сплавы	Полимерные композитные	Биметаллические
Стойкость в среде CO_2				
Стойкость в среде H_2S				
Стойкость в среде $CO_2 + H_2S$				
Стойкость к МКК				
Прочностные хар-ки				

– неприменимо

– применимо с ограничениями

– применимо

Рис. 1. Качественное сравнение материального исполнения для промысловых трубопроводов

Для лабораторных работ использовались образцы материалов-кандидатов для применения в качестве плакирующего слоя (CLAD) биметаллических трубопроводов: 08Х18Н10Т, 317L, 316L, SMO 254, 904L, Incoloy 625 и 825. При оценке основных коррозионных свойств проверялись: стойкость к

межкристаллитной коррозии (МКК по методу АМУ ГОСТ 6032 [5]), стойкость к питтинговой коррозии (ASTM G48 метод А [6]), стойкость к общей коррозии в автоклаве, стойкость к водородной проницаемости (ASTM G148 [7]), а также основные электрохимические характеристики с использованием закрытой ячейки (ASTM G5 [8]). Механические свойства материалов проверялись для материалов кандидатов из биметаллических листов с плакирующем слоем из 317L, 316L и Incoloy 825 (3 мм), основной металл – сталь L450M (22 мм). Для этого применялись образцы, содержащие в себе различную комбинацию элементов биметаллической продукции: основной металл, плакирующий слой, зона контакта двух металлов и наплавка на продольном сварном шве. Оценку хладостойкости проверяли на биметаллическом листе из 08Х18Н10Т (3мм) и 09Г2С (22 мм).

Результаты и обсуждения. Результаты испытаний основных коррозионных свойств коррозионностойких сплавов отечественной горячекатанной биметаллической трубной продукции опубликованы и представлены в работе [3]. Полученные данные позволяют рекомендовать данные сплавы в горячекатанном состоянии для применения в определенных условиях осложненных месторождений. Механические свойства биметаллической продукции продемонстрированы на рисунке 2. На диаграмме представлены свойства основного металла из стали L450M («ОМ»), плакирующих слоев («ПС»), зона контакта слоев 50/50 («ОМ-ПС») и наплавка.

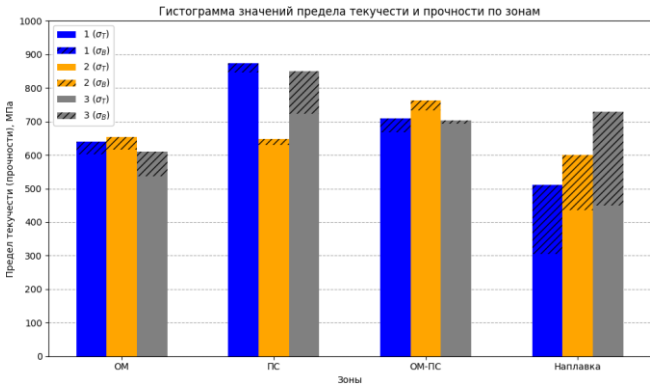


Рис. 2. Механические свойства биметаллической продукции, выполненной методом горячей прокатки: 1 – образцы с плакирующим слоем из 316L, 2 – образцы с плакирующим слоем из 317L, 3 – образцы с плакирующим слоем из Incoloy 825

На рисунке 3 представлены результаты механических испытаний по аналогичной схеме для образцов с плакирующем слоем из 08Х18Н10Т и основным металлом из 09Г2С. Испытаниям подвергался основной металл («ОМ»), плакирующий слой («ПС») и образец, содержащий «ОМ» и «ПС» в соотношении 50/50 («ОМ+ПС»). Испытания проводились при различных температурах: от -60ºС до +60ºС.

По результатам испытаний можно отметить, что повышение температуры незначительно оказывает влияние на механические свойства в сторону их снижения, что необходимо учесть при проектировании трубопровода, транспортирующего горячий газоконденсат. При отрицательных температурах образцы также показывают удовлетворительные свойства, особенно в случае контактного варианта исполнения – «ОМ+ПС».

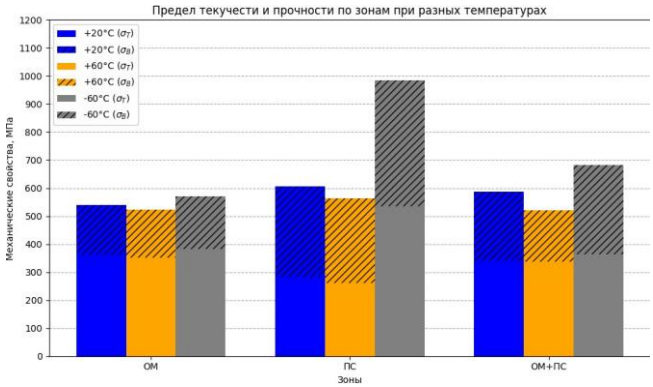


Рис. 3. Механические свойства биметаллической продукции, выполненной методом горячей прокатки из 08Х18Н10Т и 09Г2С

Выводы. Полученные результаты исследований создают необходимые предпосылки к рассмотрения существующей технологии горячей прокатки для получения биметаллических труб в качестве эффективного и экономически обоснованного варианта материального исполнения на шельфе.

Опытные образцы биметаллической продукции требуют дополнительных исследований с точки зрения коррозионной стойкости в модельных условиях под конкретное месторождение. Также важно контролировать технологию формирования продольного сварного соединения, особенно при эксплуатации трубопроводов в среде сероводорода.

Благодарность: *работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FEWN-2025–0001 «Разработка комплексной модели надежности, работоспособности и определяющих показателей качества трубопроводных систем северного исполнения»).*

Список литературы

1. DNV-ST-F101 (2021) Submarine pipeline systems (Standard) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-f101-submarine-pipeline-systems/ (19.10.25)
2. Sidum Adumene, Hope Ikue-John (2022) Offshore system safety and operational challenges in harsh Arctic operations. *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 3, issue 2, pp. 153-168. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2022.02.001.
3. Davydov A. D. et al. (2025) Evaluation of the effectiveness of the cladding layer material of a bimetallic pipeline for transporting wet gas. *Metallurgist*, vol. 12, tom 68. pp. 1819-1827. DOI: 10.1007/s11015-025-01895-7
4. Fagen Li. Et al. (2011) Fit for Purpose Analysis on Bimetallic Lined Pipe in Yaha Gas Condensate Field. *ICPTT*, pp. 81-89. DOI: 10.1061/41202(423)10
5. ГОСТ 6032–2017 (2017) Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии
6. ASTM G48–11 (2020) Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution
7. ASTM G148–97 (2018) Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique
8. ASTM G5–14 (2021) Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements

УДК 504.054
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-411-414

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ НА ТЕРРИТОРИИ НЕФТЕБАЗЫ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Далбаева Е.А.[1,2], Ерофеевская Л.А.[2], Вит А.А.[2]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»
обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск
E-mail: aselka-333@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматривается роль микроорганизмов в биоремедиации почв нефтебазы, загрязнённых нефтепродуктами. Выявлено, что высокий pH способствует преобладанию бактерий и подавляет грибки. Биоремедиация снижает фитотоксичность и активирует азотфиксирующие бактерии, но негативно влияет на нитрификацию и денитрификацию из-за токсичных веществ.*
Ключевые слова: *нефтезагрязненные почвы; загрязнение окружающей среды; рекультивация; биопрепарат; углеводородокисляющие микроорганизмы.*

RESEARCH OF MICROBIOLOGICAL ACTIVITY OF PERMAFROST SOILS IN THE OIL BASIN OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Dalbaeva E.A.[1,2], Erofeevskaya L.A.[2], Vit A.A.[2]
[1]Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences»
[2]Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» is a separate division of the Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *The article discusses the role of microorganisms in the bioremediation of oil depot soils contaminated with petroleum products. It was found that a high pH promotes the dominance of bacteria and suppresses fungi. Bioremediation reduces phytotoxicity and activates nitrogen-fixing bacteria, but it negatively affects nitrification and denitrification due to the presence of toxic substances.*
Keyword: *oil-contaminated soils; environmental pollution; reclamation; biological product; hydrocarbon-oxidizing microorganisms*

Микробиота почв территории нефтебазы играет ключевую роль в биодеградации нефтяных загрязнений, обеспечивая естественные механизмы очистки грунтов от углеводородных соединений. Микробиологические исследования, направленные на оценку биологической активности почв и идентификацию аборигенных углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ), демонстрируют их способность к эффективному разложению нефти и нефтепродуктов в условиях криолитозоны [1–2]. Для оптимизации процесса биологической ремедиации необходимо выявление и характеризование наиболее активных и экологически адаптированных штаммов микроорганизмов, способных функционировать в экстремальных температурных режимах и специфических гидрогеохимических условиях территорий нефтебаз [3–4]. Такие подходы способствуют повышению эффективности биодеструкции нефтяных загрязнений и развитию устойчивых технологий очистки почв в регионах с криолитозоной.

В 2023 году анализируемые почвенные образцы показали низкое содержание влаги и реакцию среды от нейтральной до слегка щелочной (согласно таблице 1). Средний уровень влажности этих образцов равнялся 30%, при этом в различных местах сбора показатели влажности варьировались от 20% до 40%. Такие условия могли влиять на биологическую активность в почвах и на процессы биологической деградации нефтяных загрязнений.

Таблица 1. Микробиологическая характеристика **почвогрунтов территории** филиала нефтебазы Республики Саха (Якутия), 2023 г.

Шифр проб по каталогу	pH.	Актуальная влажность, %	КМАФАнМ, МПА +37ºС-24 ч.	Гетеротрофные сапрофитные бактерии, МПА +30ºС-72 ч.	Грибы, Агар Чапека +24ºС-120 ч.	Актинобактерии, КАА +28ºС-120 ч.	Олиготрофы, голодный агар (ГА) +30ºС-7 суток	УОМ, ср.Мюнца с нефтью +20ºС-14 су
1	4	5	6	7	8	9	10	11
Т-1	7,2	25,0	$1,2*10^5$	$3,3*10^3$	Не выделены	$2,2*10^3$	$48*10^3$	Не выделены
Т-2	7,3	30,0	$6,8*10^5$	$12*10^3$	$3*10^3$	$1,6*10^3$	$36*10^3$	$1*10^3$
Т-3	7,0	20,0	$4,3*10^5$	$18*10^3$	$2,2*10^3$	$1,1*10^3$	$33*10^3$	$3*10^3$
Т-4	6,7	25,0	$38,2*10^6$	$22*10^6$	Не выделены	$0,02*10^6$	$43*10^6$	$0,03*10^6$
Т-5	7,3	30,0	$40,1*10^6$	$26,2*10^6$	$1*10^3$	$0,02*10^6$	$42*10^6$	$0,06*10^6$
Т-6	7,1	25,0	$74,2*10^6$	$48,1*10^6$	Не выделены	$0,012*10^6$	$68*10^6$	$0,002*10^6$
Т-7	6,7	30,0	$85,5*10^6$	$66,6*10^6$	$3*10^3$	$0,02*10^6$	$92*10^6$	$0,001*10^6$
Т-8	7,1	35,0	$634,4*10^6$	$3,3*10^6$	$0,08*10^6$	$0,08*10^6$	$48*10^6$	$0,025*10^6$
Т-9	6,7	35,0	$833,1*10^6$	$2,4*10^6$	$0,04*10^6$	$0,03*10^6$	$33*10^6$	$0,018*10^6$
Т-10	7,2	40,0	-	-	$1*10^3$	Не выделены		$1*10^3$
Т-11	6,5	25,0	$842*10^6$	$2,6*10^6$	$0,06*10^6$	$0,06*10^6$	$48*10^6$	$0,022*10^6$
Т-12	7,3	40,0	$992,2*10^6$	$5,1*10^6$	$1,2*10^6$	$0,02*10^6$	$1,2*10^7$	$0,062*10^6$
Т-13	7,3	25,0	$36,6*10^6$	$22,5*10^6$	$21*10^3$	$0,02*10^6$	$38*10^6$	$0,02*10^6$
Т-14	6,9	30,0	$5,1*10^5$	$1,4*10^4$	Не выделены	$1,2*10^3$	$24*10^4$	$2*10^5$
Т-15	6,8	25,0	$360,1*10^6$	$82*10^6$	$25*10^6$	$0,02*10^6$	$2,2*10^7$	$0,04*10^6$
Т-16	6,8	40,0	$440,2*10^6$	$62*10^6$	Не выделены	$0,04*10^6$	$2,0*10^7$	$6,4*10^6$
Т-17	7,0	25,0	$200,2*10^6$	$119*10^6$	Не выделены	$0,02*10^6$	$3*10^8$	$0,005*10^6$

Таблица 2. Микробиологическая характеристика **фоновых почв** территории нефтебазы Республики Саха (Якутия), 2023 г.

Шифр проб по каталогу	pH	Актуальная влажность, %	КМАФАнМ, МПА +37ºС-24 ч.	Гетеротрофные сапрофитные бактерии, МПА +30ºС-72 ч.	Грибы, Агар Чапека +24ºС-120 ч.	Актинобактерии, КАА +28ºС-120 ч.	Олиготрофы, голодный агар (ГА) +30ºС-7 суток	УОМ, ср.Мюнца с нефтью +20ºС-14 су
1	4	5	6	7	8	9	10	11
А-1	8,3	16,4	$28,2*10^3$	$16,4*10^3$	$3*10^3$	$1*10^3$	$42*10^3$	-
А-2	8,2	15,1	$3,08*10^5$	$262*10^3$	Не выделены	$2*10^3$	$315*10^3$	-
А-3	8,1	13,4	$958,3*10^6$	$922,2*10^3$	$6*10^3$	$2*10^3$	$926*10^6$	$2*10^2$
А-4	7,2	13,6	$2,8*10^7$	$1,8*10^6$	$3*10^3$	$6*10^3$	$3,2*10^7$	-
А-5	8,3	13,1	$1,1*10^8$	$6,3*10^7$	$2,6*10^3$	$1*10^3$	$1,4*10^8$	-
А-6	7,5	18,2	$2,6*10^7$	$1,4*10^6$	$3,8*10^3$	$2*10^3$	$2,8*10^8$	$2*10^3$

Исследования, проведенные с использованием методов микробиологии, показали, что в почве на территории нефтебазы микроорганизмы обитают наиболее плотно по сравнению с обычной почвой. Анализы, взятые в одинаковое время, выявили, что количество гетеротрофных бактерий и КМАФАнМ на нефтебазе превышает показатели фоновых мест на 2–3 порядка (см. табл. 1, табл. 2). Высокий уровень микроорганизмов в почвах нефтебазы, вероятно, вызван присутствием УОМ, которые в почвах фоновых участков почти не встречаются, за исключением двух точек А-3 и А-6, где их содержание незначительное и не превышает 2 тыс.

В почвах территории нефтебазы средняя концентрация углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) превышала 1 × 10^6 колониеобразующих единиц (КОЕ) на грамм активной сульфатредуцирующей биомассы (АСВ). Доля УОМ составляла приблизительно 80 % от общего микробного сообщества в данной зоне, что подтверждается данными, представленными в таблице 1. Проведённые исследования выявили, что почвы нефтебазы характеризуются значительно более высокой численностью актинобактерий и целлюлозолитических микроорганизмов по сравнению с контрольными (фоновыми) почвами. Средняя численность этих групп микроорганизмов превышала таковую в фоновых почвах примерно в 10^3 раз. Данное явление, вероятно, обусловлено присутствием нефтепродуктов и других органических соединений, что подтверждается результатами, приведёнными в таблицах 1 и 2.

В почвах, прилегающих к нефтебазам, отмечается значительное снижение активности аммонифицирующих, денитрифицирующих и нитрифицирующих бактерий по сравнению с фоновыми почвами (см. табл.1, 2). Сниженные численности этих функциональных групп свидетельствуют о негативном влиянии нефтяных продуктов на микробиологическую активность почвенной биоты. Данное явление является критическим показателем деградации почвенных экосистем и отражает их сниженный потенциал к биологическому самоочищению от загрязняющих веществ. Аналогичные выводы подтверждаются увеличением относительной численности олиготрофных микроорганизмов по сравнению с гетеротрофными бактериями в загрязненных почвах, что указывает на нарушение баланса микробных сообществ и адаптацию микрофлоры к стрессовым условиям загрязнения [11-12].

Превалирование олиготрофных микроорганизмов над гетеротрофными бактериальными сообществами может служить ключевым индикатором сниженной биологической активности почв нефтебазы, отражая ограниченную способность микробиоты к разложению органических веществ. Такие сдвиги в микробном сообществе свидетельствуют о нарушениях в процессе минерализации углерода и свидетельствуют о деградации экологического состояния почвенных экосистем в условиях нефтепродуктного загрязнения [13–14]. Анализ структуры микробных сообществ и их функциональной активности является важным инструментом для оценки степени биоремедиации и восстановления почв [15].

По показателям биотестирования почвы нефтебазы классифицируются от сильно до среднетоксичных. Всхожесть семян тест-растений в почвах составил от 16 до 36 % в сравнении с контролем (98%).

В соответствии с качественным составом физиологических групп микроорганизмов, аналогично фоновым почвам, в исследуемых образцах бактериальные сообщества доминировали над микроскопическими грибами и актинобактериями – микроорганизмами, обладающими промежуточными признаками между бактериями и грибами. В пробах почв с территории нефтебазы, отобранных в 2023 году, были выделены микроскопические грибы родов Aspergillus, Penicillium, Trichoderma, Fusarium и Mucor. Актинобактерии представлены родами Actinomyces и Rhodococcus. Среди бактериальной микрофлоры почв нефтебазы преобладали неферментирующие бактерии родов Pseudomonas и Stenotrophomonas, энтеробактерии родов Proteus и Enterobacter, аэробные спорообразующие бактерии рода Bacillus, а также анаэробные бактерии рода Clostridium.

На основании результатов микробиологического анализа почв нефтебазы можно сформулировать следующие выводы: почвы данного объекта характеризуются низкой минерализационной активностью, отражающей сниженную способность к разложению органических веществ. В микробном сообществе наблюдается доминирование олиготрофных микроорганизмов по сравнению с численностью гетеротрофных бактерий, что указывает на неэффективность микробных процессов и ограниченный потенциал биологического улучшения почвенного плодородия. Данные особенности обусловлены, вероятно, воздействием нефтяных загрязнений и присутствием токсичных химических соединений, нарушающих нормальное функционирование микробиоты.

В почвенных образцах, подвергнутых исследованию, выявлены значительные нарушения процессов минерализации органического вещества, что подтверждается низкими значениями коэффициента минерализации (<1 усл. ед.) во всех случаях. Данное явление, вероятно, обусловлено присутствием токсичных компонентов в почве, таких как тяжелые металлы, либо дефицитом природного ор-

ганического вещества. В условиях ограниченного количества минерализуемого органического материала процессы минерализации оказываются недостаточно обеспеченными. Для восстановления функциональной активности минерализационных процессов в почве необходим комплексный подход, включающий стимулирование активности почвенной микрофлоры, создание оптимальных условий для их жизнедеятельности, а также повышение содержания органического вещества посредством внесения органических удобрений и инокуляции микоризных грибов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011200369-1) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Atlas, R.M., Hazen, T.C.. Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. / Environmental Science & Technology /, 45(16), 2011, pp.6709–6715.
2. Margesin, R., Schinner, F.. Biodegradation and bioremediation of hydrocarbons in extreme environments. / Applied Microbiology and Biotechnology /, 56(5-6), 2001, pp.650–663.
3. Cappello, S., Maugeri, T.L., Lentini, V., Smedile, F., Yakimov, M.M., Giuliano, L. Biodegradation of hydrocarbons under psychrophilic conditions. / Applied Microbiology and Biotechnology /, 97(4), 2013, pp.1571–1580.
4. Yakimov, M.M., Timmis, K.N., Golyshin, P.N. Obligate oil-degrading marine bacteria. / Current Opinion in Biotechnology /, 18(3), 2007, pp.257–266.
5. ГОСТ ИСО 14698-1-2005. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Контроль биозагрязнений. Часть 1.Общие принципы и методы.
6. ГОСТ 17.4.2.01 – 2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа (с Поправкой).
7. ГОСТ 17.4.2.02. – 2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 N 202-ст).
8. МУК 4.2.3695-21. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы. Методические указания» (утв. Роспотребнадзором 02.06.2021)
9. Atlas, R. M., & Hazen, T. C Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History. Environmental Science & Technology, 45(16), 2011, pp.6709–6715.
10. Jones, C. M., & Hallin, S. The microbial nitrogen cycle. Environmental Microbiology Reports, 11(2), 2019, pp.1-15.
11. Khan, S., et al. Impact of petroleum hydrocarbon contamination on soil microbial community structure and function. / Environmental Pollution /, 2020, 265, 114912.
12. Zhang, L., et al. Effects of oil contamination on soil microbial diversity and enzyme activity. / Science of The Total Environment /, 2019, 665, pp.297–305.
13. Smith, J. A., Brown, L. R., & Johnson, M. E. Microbial indicators of soil health under petroleum hydrocarbon contamination. / Environmental Microbiology /, 20(4), 2018, pp.1234–1245.
14. Zhang, Y., & Wang, Q. Oligotrophic bacteria as bioindicators of reduced soil microbial activity in contaminated environments. / Applied Soil Ecology /, 2020, 147, 103399.
15. Jones, D. L., Murphy, D. V., & Khalid, M. Microbial community dynamics during bioremediation of petroleum-contaminated soils. / Soil Biology and Biochemistry /, 2019, 134, pp.159–168.

УДК 625.066.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-415-421

ЦЕМЕНТОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ НА КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГАХ В ЗАСУШЛИВОМ И ХОЛОДНОМ КЛИМАТЕ: УСТОЙЧИВЫЙ ПОДХОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СОВРЕМЕННЫХ ДОБАВОК

Дамдинжав М.
Китайский Университет Горного Дела и Технологии (China University of Mining and Technology),
Факультет Охраны Труда и Техники Безопасности
E-mail: FB21120003E@cumt.edu.cn

Аннотация. *Выбросы пыли от карьерных грунтовых дорог горных предприятий представляют значительные экологические и эксплуатационные проблемы, особенно в холодном и засушливом климате как в Монголии. Предложено инновационное решение для борьбы с пылью на карьерных дорогах в холодном и засушливом климате Монголии на основе стабилизации грунта цементом с органоминеральными добавками. Исследование демонстрирует экономическую эффективность и экологичность подхода, использующего местные материалы. Результаты показывают, что модифицированный грунтоцемент обеспечивает высокую прочность (до М40) и морозостойкость (F15-F25), являясь устойчивой альтернативой хлориду кальция. Технология применима также для строительства сельских дорог, способствуя снижению выбросов углерода.*

Ключевые слова: *Карьерные дороги, пылеподавление, вяжущие материалы на основе цемента, стабилизация грунтово-цементных дорог, модифицированные добавки, выбросы углерода, арктический климат.*

CEMENT-BASED DUST CONTROL SOLUTION FOR MINING HAUL ROADS IN ARID AND COLD CLIMATES: A SUSTAINABLE APPROACH USING LOCAL MATERIALS AND ADVANCED ADDITIVES

Damdinjav M.
China University of Mining and Technology, School of Safety Engineering
E-mail: FB21120003E@cumt.edu.cn

Abstract*. Dust emissions from unpaved mining haul roads present significant environmental and operational challenges, particularly in cold and arid climates such as Mongolia. An innovative solution for dust control on quarry roads in Mongolia's cold and arid climate has been proposed, based on soil stabilization using cement with organic and inorganic additives. The research demonstrates the cost-effectiveness and environmental friendliness of this approach, which utilizes local materials. The results show that the modified soil-cement provides high strength (up to M40) and frost resistance (F15-F25), representing a sustainable alternative to calcium chloride. This technology is also applicable for the construction of rural roads, contributing to the reduction of carbon emissions.*

Keywords: *Mining haul roads, dust control, cement-based binding materials, soil-cement road stabilization, advanced additives, carbon emissions, arctic climate.*

1. Введение. По оценкам, на карьерные дороги и дороги для перевозки продукции приходится до 90% пыли, выделяемой при открытых горных работах [1]. Это объясняется главным образом тем, что карьерные дороги исторически строились из местных материалов и не покрывались бетоном или асфальтом из-за экономических и других практических соображений, таких как безопасность в зимние месяцы и необходимость очистки дорог от просыпей грузовиков с помощью грейдеров и фронтальных погрузчиков [2].

Горнодобывающие предприятия, расположенные в холодном и сухом климате, сталкиваются с относительно более сложными пылевыми условиями из-за ограничений по использованию воды в зимний период, который может длиться 6-8 месяцев. Монголия расположена в засушливой и холодной климатической зоне, приравненной к арктическим климатическим условиям, и регулярный полив и применение водорастворимых органических и неорганических химических растворов, как это практикуется в других частях мира, часто являются дорогостоящими и непрактичными в зимних условиях.

Хотя отрасль во всем мире приняла подход с неупрочненными покрытиями, Кауфман и Аулт описали варианты использования постоянных покрытий (асфальтобетон, стабилизированный грунт), тогда как Томпсон, Перони и Виссер рекомендовали полупостоянные поверхностные слои (с химическими средствами) [3].

Их немного, но существовали карьерные дороги, покрытые бетоном, уплотняемым катками (канадский опыт), бетонными плитами (государственное предприятие «Баганнур Көүл», Монголия, 1980-е годы), и даже стальными плитами в особо оживленных местах (регион Якутия, Россия) как для долговечности, так и для целей борьбы с пылью [4].

Ван и др. (2022) проанализировали загрязнение пылью (концентрация PM10, PM2.5) с комбинированной точки зрения производства и метеорологических условий на угольном разрезе Хэрвусу, расположенном на северо-западе Китая, и выявили, что загрязнение пылью от горных работ увеличивалось в декабре и январе [5].

Примечательно, что в засушливых условиях, таких как пустыня Гоби, значительный снегопад может помочь создать уплотненный слой снега, который может минимизировать выбросы пыли, однако снежный покров обычно недолговечен из-за ветровой и транспортной эрозии и воздействия солнца. Бобровников и др. (2007) изучали решения, основанные на фазовом переходе воды, для практической борьбы с пылью в сибирском регионе России, разрабатывая практические применения искусственного снега в борьбе с пылью на горных работах [6].

Рис. 1. (a) Пыль от карьерного самосвала на угольном разрезе Таван Толгой, Южно-Гобийская пустыня, Монголия (Март 2023 г.), фото автора; (b) Пыль не наблюдалась после прохождения самосвала с медной рудой на медном карьере Удокан из-за уплотненного снежного покрова, Забайкальский край, Россия (Март 2025 г.)

Чжао и др. (2023) успешно разработали и протестировали продукт для зимнего пылеподавления на основе антифриза на угольном разрезе в Северном Китае [7]. Омане и др. исследовали роль различной температуры атмосферы на эффективность химических супрессантов для контроля пыли на карьерных дорогах, заключив, что солевой раствор, раствор без хлоридов, полимерный раствор и раствор мелассы достигали более высокой эффективности, чем вода, и температура играет важную роль в эффективности химических супрессантов [8].

Существует значительный объем исследований и опыта по использованию технологий грунтоцемента при строительстве подосновы и покрытий обычных дорог по всему миру [9], [10]. Цемент является сегодня самым популярным материалом для стабилизации грунта. Именно в 1915 году цемент был впервые использован в качестве стабилизатора грунта для дорог в Сарасоте, Флорида, проложив путь таким терминам, как «soilamies» (1917) и «soilcrete» (1920) [11]. В России исследователи использовали термин «тощий» бетон для смеси цементного вяжущего и тощего заполнителя для строительства основания дорожного покрытия для дорог в арктическом регионе [12].

Такие страны, как Монголия, которые имеют недостаточно развитую инфраструктуру и зарождающуюся химическую промышленность, сильно зависят от импорта химической продукции, что делает дорогим для операторов рудников использование импортных средств для борьбы с пылью на дорогах.

Экологические аспекты горнодобывающей промышленности Монголии привлекли значительное количество исследовательских работ [13], [14], [15], [16]. Выбросы пыли с грунтовых дорог в сельской местности и деградация пастбищ от движения транспортных средств были связаны с отсутствием инфраструктуры дорог с твердым покрытием и влиянием добывающей промышленности на уязвимые степи [17], [18], [19]. Горнодобывающие предприятия были идентифицированы как заметные источники выбросов пыли в общей оценке источников пыли в Южной Монголии и регионе Внутренняя Монголия в Китае [20], [21], [22], [23]. Требуется дополнительное исследование для определения и управления последствиями пыли, связанной с добычей полезных ископаемых [24], [25].

Методы и материалы

2.1. Методы. Данное исследование было сосредоточено на разработке конкретной рецептуры для создания пылезащитного материала поверхностного слоя карьерной дороги для круглогодичного использования с цементом в качестве основного вяжущего и органическими и неорганическими добавками в качестве дополнительных материалов.

Оценка прочности на сжатие (CS) образцов проводилась в соответствии с монгольским национальным стандартом MNS 1272:99 для оценки прочности бетона, поскольку стандартов, относящихся к грунтоцементам, не существует. Физические и механические характеристики испытательных образцов сравнивались с параметрами, изложенными в российском стандарте ГОСТ 23558-94, который определяет минимальные свойства для поверхностных слоев дорог переходного типа.

Испытания на циклы замораживания-оттаивания (FTC) проводились с использованием MNS 1918:85, монгольского национального стандарта для определения морозостойкости бетона. Количество циклов замораживания-оттаивания, потери массы материала после каждого цикла и CS образцов оценивались и сравнивались с российским стандартом ГОСТ 31357-2007, регулирующим сухие строительные смеси.

Структурная целостность поверхностного слоя карьерных дорог оценивалась и сравнивалась с требованиями стандарта ГОСТ 33180-2014 (Дороги общего пользования) и ГОСТ 71404-2024 (Дороги общего пользования: Нежесткие дорожные одежды).

2.2 Материалы

2.2.1. Грунт: Первоначальные испытания проводились с использованием высушенной в печи глинистой почвы с содержанием 60% мелких частиц, проходящих через сито №200. Образцы для испытаний на прочность на сжатие (CS) и FTC использовали рыхлый грунт карьерной дороги на месте с предприятия «Эрдэнэт» (EMC) с искусственным щебнем из горных пород, со средней плотностью 1.81 г/см³. Практически любой тип почвы и грунта можно стабилизировать, хотя конкретный метод и эффективность зависят от типа почвы [26].

2.2.2. Цемент: Использовался обычный портландцемент M200 производства ООО «МАК Евро-Цемент» Монголии. M200 предназначен для применений со средней прочностью. OPC является основным вяжущим в рецептуре, обеспечивающим прочность смеси за счет первичной гидратации и вторичных пуццолановых реакций [26].

2.2.3. Органические добавки: Для придания гибкости и влагостойкости грунтоцементной смечи оценивались органические добавки, такие как латекс SBR, ответственный за повышенную гибкость и гидроизоляцию due to formation долгосрочных 3D-связей [27], [28], [29], [30]. Латекс SBR представляет собой молочно-белую жидкость, которая является универсальной добавкой для цементных материалов, с содержанием твердых веществ 40%, pH 8 и удельным весом 1.01 г/см³. Лигносульфонат (LS) был другим продуктом, изученным в качестве возможной добавки к цементно-грунтовой смеси [31]. LS также используется в качестве средства для борьбы с пылью, которое typically распыляется на грунтовые дороги после некоторой подготовки поверхности [32], [33].

2.2.4. Неорганические добавки: Микрокремнезем (SF) и нанокремнезем (NS) являются аморфными диоксидами кремния (SiO_2) с высокой пуццолановой активностью, но они значительно различаются по размеру частиц, удельной поверхности и получаемым характеристикам. SF является более экономически эффективным вариантом для увеличения прочности и долговечности бетона и показал синергетический эффект с латексом SBR в цементных смесях [26], [27], [34].

3. Экспериментальная программа

Для экспериментальной фазы была проведена серия лабораторных экспериментов для оценки механических свойств и эффективности разработанного цементного раствора для борьбы с пылью в смоделированных условиях окружающей среды.

Физические испытания образцов на прочность на сжатие (CS), циклы замораживания-оттаивания (FTC) проводились в ООО «True TRC Laboratories» и Корпорации строительства и архитектуры (ООО «ВАК» или ООО «САС») Монголии. Дальнейшее исследование образцов с помощью рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM) проводилось в Центре исследований и разработки полезных ископаемых Монгольского университета науки и технологий (MUST).

Образцы в форме кубов 10x10x10 см были приготовлены с 5% по массе цемента от образца грунта на месте с грунтовой дороги, 20% по массе цемента латекса SRB, 0.5% $CaCl_2$, 0.1% микрокремнезема, 5-20% воды и 0.01% додецилбензолсульфоната натрия. Важными соображениями для физических свойств образцов и дорожных материалов являются соотношение вода/цемент и применение давления для формирования испытательных кубиков для моделирования более высокого уплотнения материала дорожного покрытия [35], [36].

4. Результаты и обсуждение. Испытания на прочность на сжатие (CS) для образцов с описанным выше составом, выдержанных 3, 7, 14, 28 дней, были проведены с результатами, показывающими увеличение прочности с 2.8 МПа до 6.4 МПа, со средним значением 4.5 МПа, что соответствует ГОСТ 23558-94 для покрытий грунтовых дорог в России. Достигнута марка по прочности М40.

Образцы были приготовлены и испытаны на CS и циклы замораживания-оттаивания (FTC) с varying соотношениями вода/цемент от 1:1 до 4:1 для оценки влияния соотношения вода/цемент на физические характеристики.

Испытания на циклы замораживания-оттаивания (FTC), проведенные для образцов в соответствии с MNS 1918:85. Образцы, обработанные предлагаемой модифицированной латексом SBR и микрокремнеземом (SF) грунтоцементной смесью (с более высоким соотношением вода/цемент), показали потерю веса 0.4% после 15 циклов испытаний FTC с потерей прочности 15.8 процента, как показано в таблице 1. Скорость водопоглощения была определена в 8.1% от веса образца, что соответствует параметру водопоглощения 20% для легких бетонных изделий. Это показывает, что грунтоцемент, обработанный предлагаемым раствором, может соответствовать марке по морозостойкости F15 и F25 согласно Стандартам ГОСТ 31357-2007.

Таблица 1. Анализ FTC образцов, обработанных предлагаемым раствором

№	Sample Type	Sample Size, mm	Sample Weight, g		Compressive Strength, Mpa		Weight Loss, %	Strength Loss, %
			Before Test	After 15 FTC	Normal Condition	After 15 FTC		
1	Modified soil-cement mix	100x100x100	2082	2081		1.84	0.0	
2		100x100x100	2058	2045		1.93	0.6	
3		100x100x100	2037	2033		1.9	0.2	
4		100x100x100	2027	2012		1.97	0.7	
Average					2.27	1.91	0.4	15.8
Water Absorption, % of the Weight							8.1	

Результаты рентгеноструктурного анализа (XRD) разрушения при сжатии образца, модифицированного латексом SRB, показаны в таблице 2.

Таблица 2. Mineralogy analysis results with X-ray Diffraction method

№	Mineral name, International	Mineral Formula	Card Number	Content, %
1	Quartz	O_2Si	96-901-3322	51.4
2	Calcite	C Ca O_3	96-900-0971	3.5
3	Albite	All.O_2 CaO.O_2 NaO.98 O_8 Si2.98	96-900-0586	41.9

РСА анализ показал, что модифицированная смесь состояла из 51.4% кварца, 3.5% кальцита, 41.9% минералов альбита, а оставшиеся 3.2% приходились на некристаллическую аморфную фазу, которая является «клеем», скрепляющим материал.

XRD отлично идентифицирует кристаллические материалы, но плохо справляется с некристаллическими (аморфными) материалами. Тот факт, что нет портландита ($Ca(OH)_2$) или других фаз цемента, свидетельствует об образовании гелей C-S-H, которые являются «клеем» бетона, основной прочностной фазой. Небольшое количество цемента в общей смеси успешно гидратировалось с образованием этого геля.

Микрокремнезем является высокоаморфным, и его основная роль – реагировать с портландитом ($Ca(OH)_2$) от гидратации цемента с образованием дополнительного геля C-S-H (пуццолановая реакция). Низкий процент аморфной фазы позволяет предположить, что значительная часть микрокремнезема прореагировала, потребляя портландит и укрепляя матрицу. Отсутствие пика портландита в XRD подтверждает, что эта реакция произошла.

Латекс SBR образует полимерную пленку и со-матрицу внутри цементного теста. Он полностью органический и аморфный, поэтому не отображается на XRD. Его присутствие выводится через улучшенную вязкость разрушения, прочность на изгиб и сниженную проницаемость, что подтверждается испытаниями FTC. Латекс SBR образовал полимерную сеть, которая переплетается с гелем C-S-H, улучшая сцепление, адгезию к частицам песка/грунта и долговечность.

Анализ изображений с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) проводился с увеличением в 500 раз для образцов грунтоцемента с обработкой и без обработки предлагаемым модифицированным раствором латекса SBR, и примеры результатов показаны на рисунке 2.

Образец, испытанный с предлагаемым модифицированным раствором латекса SBR и микрокремнезема, обладает плотной матрицей C-S-H / микрокремнезема с минимальным количеством поровых пространств и прочными переходными зонами раздела. Это объясняет хорошие свойства потери веса при FTC и водопоглощения после 15 циклов замораживания-оттаивания.

Образец, испытанный с предлагаемым модифицированным раствором латекса SBR и микрокремнезема, обладает плотной матрицей C-S-H / микрокремнезема с минимальным количеством поровых пространств и прочными переходными зонами раздела. Это объясняет хорошие свойства потери веса при FTC и водопоглощения после 15 циклов замораживания-оттаивания.

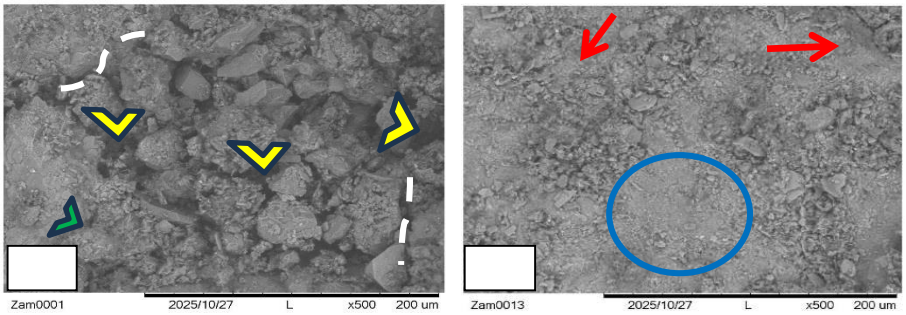


Рис. 2. Анализ изображений SEM образцов разрушения при испытании на сжатие; (a)

Образец грунтоцементной смеси без модифицированного раствора латекса SBR и микрокремнезема. Желтые галочки «V» показывают большие пустоты, пунктирные линии Q показывают слабые переходные зоны раздела, а зеленая «V» показывает возможное микротрещинообразование; (b) Образец, испытанный с предлагаемым модифицированным раствором латекса SBR и микрокремнезема. Синий круг показывает плотную матрицу C-S-H / микрокремнезема, тогда как красные стрелки представляют образование полимерной пленки (Улан-Батор, Монголия, 2025)

Результаты испытаний и экономического анализа, сравнивающие предлагаемое решение для борьбы с пылью с широко распространенной в отрасли практикой использования CaCl2 для обработки карьерных дорог от пыли, обобщены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение экономических показателей предлагаемой модифицированной formulation с нежесткой карьерной дорогой, обработанной $CaCl_2$

Feature	Proposed Modified Soil Cement	$CaCl_2$ Treated Unpaved Road
Operational Impact / Fuel Economy	Minimal. High-speed, all-weather access. Improved economics due to fuel savings, reduced Rolling Resistance (RR).	High. Frequent road closures for re-treatment with reduced productivity.
Initial Cost per km	High ($45,000 – $75,000)	Low ($8,000 – $15,000)
3-Year Lifecycle Cost per km	Lowest ($50,000 – $80,000) (Mostly initial cost)	High ($45,000 – $90,000+) (Initial + 6-18 reapplications)

5. Выводы. Испытания на прочность на сжатие и морозостойкость образцов, приготовленных с предлагаемым модифицированным грунтоцементным раствором, были проведены для лабораторных образцов, обработанных предлагаемой formulation, которые соответствовали марке по прочности на сжатие M20, M40, марке по морозостойкости F15, F25, соответствующим Стандартам ГОСТ 23558-94 для покрытий переходных грунтовых дорог для засушливых и холодных зон.

Экономический анализ показывает, что возможно минимизировать образование пыли с помощью специального подхода «безопасность при проектировании» (SID), который превентивно устраняет или минимизирует вероятность выбросов пыли для всех типов грунтовых дорог.

Дальнейшая работа по улучшению этого исследования может включать следующее:

- Проведение полевых испытаний для проверки результатов CS и морозостойкости и измерения параметров физической прочности и долговечности, а также эффективности борьбы с пылью.
- Лабораторные и полевые испытания могут выиграть от дополнительных экспериментов с соотношением вода/цемент и энергией уплотнения для приготовления образцов, чтобы определить полевые технологические критерии для оптимальной производительности.
- Также рекомендуется изучить влияние времени отверждения модифицированной грунтоцементной смеси для лабораторных и полевых образцов.

Список литературы

1. Alvaro, G.; Douglas, A.; Christian, H.; Carlos, L.; Marcelo, G. Reducing mine water use in arid areas through the use of a byproduct road dust suppressant. *J. Clean. Prod.* 2019, *230*, 46–54
2. Thompson R.J., Peroni R., Visser A.T. Mining Haul Roads Theory and Practice. CRC Press: Leiden, The Netherlands, 2019. 294 p.
3. Kaufman W.W., Ault J.C. Design of Surface Mine Haulage Roads: A Manual. Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1977.
4. Chemezov E., Delets E.; Dust Control at Open Pit Mines. Vestnik Science Technology Journal, vol. 1, nom. 1, 2017. 81 p.
5. Wang, Z., Zhou, W., Jiskani, I.M., Ding, X., Luo, H., 2022. Dust pollution in cold region Surface Mines and its prevention and control. Environmental Pollution 292, 118293. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118293
6. Бобровников В.Н. и др., 2007. Использование фазовых переходов воды для борьбы с пылью при ведении горных работ.
7. Zhao, X., Du, J., Bharti, B., Qiao, Y., Li, Y., Wu, H., Ma, Z., 2023. Research and Industrial Test of Anti-Freezing and Dust Suppression Agent for Truck Roads in Open-Pit Mines in Inner Mongolia, China. Processes 11, 3336. https://doi.org/10.3390/pr11123336
8. Omane, D., Liu, W.V., Pourrahimian, Y., 2017. Comparison of Chemical Suppressants Under Different Atmospheric Temperatures for The Control of Fugitive Dust Emission on Mine Haul Roads. Atmospheric Pollution Research.
9. Tan, E.H., Zahran, E.M.M., Tan, S.J., 2020. A review of chemical stabilisation in road construction. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 943, 012005. https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012005
10. Firoozi, A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A. *et al.* Fundamentals of soil stabilization. *Geo-Engineering* **8**, 26 (2017). https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9
11. Chávez, G.F. et al, 2020. Influence of vegetable fibre (Abacá) in the construction process of cemented bases. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development”, 29-31 July 2020, Buenos Aires, Argentina.
12. Burenina O., Andreeva A., Savinova M., Davaasenge S. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1079 032045DOI 10.1088/1757-899X/1079/3/032045
13. Batmunkh, I., 2021. Environmental Issues in the Mining Sector of Mongolia. JEP 12, 415–427. https://doi.org/10.4236/jep.2021.126025
14. Surenbaatar, U., Kim, B., Seo, J.-W., Lim, H.-J., Kwon, J.-Y., Kang, M.-K., Altangerel, E., Byambaa, T., Batbaatar, S., Myagmardorj, O., Lee, C.-W., Hong, Y.-S., 2021. Environmental health survey for children residing near mining areas in South Gobi, Mongolia. https://doi.org/10.35371/aoem.2021.33.e10
15. Gankhuyag, U., n.d. Quantitative Analysis of the Relationship Between Mining and Livestock Sectors in Mongolia.
16. Dalaibuyan, B., 2015. MINING, “SOCIAL LICENSE” AND LOCAL-LEVEL AGREEMENTS IN MONGOLIA. https://www.resourcegovernance.org
17. Keshkamat, S.S., Tsendbazar, N.-E., Zuidgeest, M.H.P., Van Der Veen, A., De Leeuw, J., 2012. The Environmental Impact of not Having Paved Roads in Arid Regions: An Example from Mongolia. AMBIO 41, 202–205. https://doi.org/10.1007/s13280-011-0155-3
18. Jackson, S.L., 2015. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia’s South Gobi province. Geoforum 66, 94–105. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.09.010
19. Johnston, L.A., 2008. Mining Mongolia: resource access, climate change and vulnerability on the steppe. Master of Science Thesis, Simon Frazer University
20. Li, K., Liang, T., Wang, L., Yang, Z., 2015. Contamination and health risk assessment of heavy metals in road dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China. J. Geogr. Sci. 25, 1439–1451. https://doi.org/10.1007/s11442-015-1244-1
21. Wang, X., Xia, D., Wang, T., Xue, X., Li, J., 2008. Dust sources in arid and semiarid China and southern Mongolia: Impacts of geomorphological setting and surface materials. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.006

22. Zhang, B., Tsunekawa, A., Tsubo, M., 2015. Identification of Dust Hot Spots from Multi-Resolution Remotely Sensed Data in Eastern China and Mongolia. Water Air Soil Pollut 226. https://doi.org/10.1007/s11270-015-2300-2
23. Jugder, D., Shinoda, M., Sugimoto, N., Matsui, I., Nishikawa, M., Park, S.-U., Chun, Y.-S., Park, M.-S., 2011. Spatial and temporal variations of dust concentrations in the Gobi Desert of Mongolia. Global and Planetary Change 78, 14–22. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.05.003
24. Pecina, V., Juřička, D., Hedbávný, J., Klimánek, M., Kynický, J., Brtnický, M., Komendová, R., 2023. The impacts of mining on soil pollution with metal(loid)s in resource-rich Mongolia. Sci Rep 13, 2763. https://doi.org/10.1038/s41598-023-29370-w
25. Otgonnasan, A., Yundendorj, G., Tsogtbayar, O., Erdenechimeg, Z., Ganbold, T., Namsrai, T., Damiran, N., Erdenebayar, E., 2022. Respirable Dust and Respirable Crystalline Silica Concentration in Workers of Copper Mine, Mongolia. ODEM 10, 167–179. https://doi.org/10.4236/odem.2022.103013
26. Al-Obaidi, A.A.H., Al-Mukhtar, M.T., Al-Dikhil, O.M., Hannona, S.Q., 2020. Comparative Study between Silica Fume and Nano Silica Fume in Improving the Shear Strength and Collapsibility of Highly Gypseous Soil. Tikrit j. eng. sci. 27, 72–78. https://doi.org/10.25130/tjes.27.1.10
27. Idrees, M., Saeed, F., Amin, A., Hussain, T., 2021. Improvement in compressive strength of Styrene-Butadiene-Rubber (SBR) modified mortars by using powder form and nanoparticles. Journal of Building Engineering 44, 102651. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102651
28. Hasan, H.A., Hacheem, Z.A., Almurshedi, A.D., Khabbaz, H., 2023. The Influence of Styrene Butadiene Latex on Sandy Soil Reinforced by Soil Mixed Columns under Raft Foundation. MMEP 10, 733–739. https://doi.org/10.18280/mmep.100301
29. Baghini, M.S., Ismail, A., Asghar, M.P., Fendereski, G., Sadeghi, M., 2018. Measuring the effects of styrene butadiene copolymer latex-Portland cement additives on properties of stabilized soil-aggregate base. International Journal of Pavement Research and Technology 11, 458–469. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.001
30. Shojaei Baghini, M., Ismail, A., Karim, M.R., Shokri, F., Firoozi, A.A., 2014. Effect of styrene–butadiene copolymer latex on properties and durability of road base stabilized with Portland cement additive. Construction and Building Materials 68, 740–749. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.061
31. Chavali, R.V.P., Reshmarani, B., 2020. Characterization of expansive soils treated with lignosulfonate. Geo-Engineering 11. https://doi.org/10.1186/s40703-020-00124-1
32. Parvej, S., Naik, D.L., Sajid, H.U., Kiran, R., Huang, Y., Thanki, N., 2021. Fugitive Dust Suppression in Unpaved Roads: State of the Art Research Review. Sustainability 13, 2399. https://doi.org/10.3390/su13042399
33. Bataa D. et al, 2023. Efficiency of Lignosulfonate Dust Suppress on an Unpaved Road. https://www.researchgate.net/publication/375799063
34. Fu, Q., Zhao, X., Zhang, Z., Xu, W., Niu, D., 2022. Effects of nanosilica on microstructure and durability of cement-based materials. Powder Technology 404, 117447. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117447
35. Beckett, C. et al, 2014. Effect of compaction water content on the strength of cement-stabilized rammed earth materials. Article in Canadian Geotechnical Journal, DOI: 10.1139/cgj-2013-0339
36. Onyelowe, K.C., Moghal, A.A.B., Ebid, A. et al. Estimating the strength of soil stabilized with cement and lime at optimal compaction using ensemble-based multiple machine learning. Sci Rep 14, 15308 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-66295-4

УДК 504.61; 502:63; 579:69
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-422-424

РОЛЬ МИКРОБИОТЫ В БИОРЕМЕДИАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ

Ерофеевская Л.А.[1], Вит А.А.[1], Салтыкова А.Л.[2]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: lora-07.65@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены результаты исследования роли микробиоты в биоремедиации мерзлотных почв, загрязнённых дизельным топливом. Оценивалась динамика содержания нефтепродуктов: до опыта, через 3 суток и через 50 суток. Показано, что внесение в мерзлотную почву суспензий штаммов углеводородокисляющих бактерий Bacillus sp. ВКМ B-2815D и Bacillus simplex ВКМ B-2817D почти вдвое увеличивало скорость деградации по сравнению с естественным самоочищением почвы, что свидетельствует об их потенциале для биоремедиации нефтезагрязнённых мерзлотных почв.*

Ключевые слова: *мерзлотная почва; дизельное топливо, биодеградация; углеводородокисляющие бактерии.*

THE ROLE OF THE MICROBIOTA IN THE BIOREMEDIATION OF OIL-CONTAMINATED PERMAFROST SOILS

Erofeevskaya L.A.[1], Vit A.A[1], Saltykova A.L.[2]
[1]Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[2]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

Abstract. *The results of a study on the role of the microbiota in the bioremediation of permafrost soils contaminated with diesel fuel are presented. The dynamics of hydrocarbon content were assessed: before the experiment, after 3 days, and after 50 days. It was shown that inoculation of permafrost soil with suspensions of hydrocarbon-oxidizing bacterial strains Bacillus sp. VKM B-2815D and Bacillus simplex VKM B-2817D nearly doubled the degradation rate compared with natural attenuation, indicating their potential for bioremediation of hydrocarbon-contaminated permafrost soils.*

Keywords: *permafrost soil; diesel fuel; biodegradation; hydrocarbon-oxidizing bacteria.*

В настоящее время проблема восстановления нефтезагрязненных земель в условиях криолитозоны приобретает все большую актуальность и становится одной из ключевых тем научных исследований, проводимых учеными Якутии. Ответные усилия на вызовы антропогенного и техногенного воздействий на природные экосистемы являются важным научным направлением в регионе. В этом контексте ряд исследователей активно занимаются изучением почвенной микробиологии, с целью разработать инновационные подходы и методы, способствующие успешной реабилитации нарушенных или утраченных природных ресурсов.

Так, например, в ИБПК СО РАН проведено комплексное изучение микробных сообществ мерзлотных лесных почв Якутского ботанического сада, на территории которого распространены почти все типы лесных почв, встречающиеся в Центральной Якутии. В ходе исследований было установлено, что общая численность микроорганизмов в изучаемых мерзлотных лесных почвах возрастает в ряду: подзол иллювиально-железистый → солодь → подзол иллювиально-гумусово-железистый → палевая серая → перегнойно-карбонатная. В микробных сообществах мерзлотных почв на легких аллювиальных отложениях доминируют мицелиальные грибы, в то время как в почвах на лессовидных аллювиальных суглинках преобладают аммонифицирующие бактерии [1, С. 22–33]. Данные группы микроорганизмов вносят значительный вклад в разложение органического вещества и обеспечение доступности питательных веществ для растений в мерзлотных почвах. Изучение и понимание роли этих микроорганизмов важно для сбалансированного управления почвенными системами и поддержания их плодородия.

В ЯНИИСХ СО РАН проведён скрининг природных микроорганизмов мерзлотных почв Центральной Якутии, в ходе которого из среднесуглинистой мерзлотной почвы Хангаласского улуса было выделено 14 изолятов, три из которых, идентифицированы как *Bacillus subtilis* и могут быть перспективными для использования в современной биотехнологии [2, С. 85–93].

В ИПНГ СО РАН проведены исследования по формированию коллекции углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ), выделенных из различных типов мерзлотных почв и грунтов Якутии. Описаны 27 штаммов УОМ, принадлежащих к различным таксономическим группам, которые также могут быть использованы в биотехнологических процессах для очистки нефтезагрязненных почв [3, 132 с.].

Таким образом, можно утверждать, что в последнее время почвенной микробиологии в Якутии уделяется внимание.

Цель настоящих исследований заключалась в оценке влияния микроорганизмов, выделенных из мерзлотных почв Якутии на процессы биоремедиации нефтезагрязнений в условиях криолитозоны.

Материалом для исследований служили почвы, загрязненные дизельным топливом и природные нефтедеструкторы (НД) в составе: *Bacillus* sp. ВКМ В-2815D и *Bacillus simplex* ВКМ В-2817D.

Методы исследований. Выделение микроорганизмов из почв проводили по общепринятым в микробиологии классическим методом посева на дифферинциальные и диагностические питательные среды [4, 224 с.].

Степень обогащенности почв микроорганизмами определяли по общей для микробиологии шкале Звягинцева [5, с. 48–54].

Численность микроорганизмов выражали в колониеобразующих единицах на 1 грамм абсолютно-сухого веса почвы (КОЕ/г АСВ), учитывая, что КОЕ – это единица учета жизнеспособных микроорганизмов: одна КОЕ соответствует одному живому микробному объекту (одной клетке или клеточной группе/колонии), способному дать видимую колонию на твердой питательной среде при посеве и инкубации. При подсчёте числа КОЕ учитывают условия разведения, объем или массу посева и поправляют на сухую массу образца, поэтому результат приводят как КОЕ/г АСВ почвы.

Условия проведения опытов. Опыты проводились в условиях вегетационных сосудов на супесчаной почве, отобранной в условно-чистой зоне, свободной от техногенного воздействия, в лесном массиве пригорода Якутска, расположенного в районе Маганского тракта 8 км (Мархинское лесничество, Муниципальный округ «Город Якутск»). Координаты отбора проб: 62.119957 с.ш.; 129.630183 в.д. Вес почвы 1 кг. Для загрязнения почвы использовалось арктическое дизельное топливо марки ДТ-А-К3 плотностью 833,5 кг/м³. Исходное загрязнение ДТ составляло 1,5 % по массе, что соответствовало с учетом плотности НП ≈17,95 мл на 1 кг почвы. Влажность опытных почв достигалась поливом и, поддерживалась в течение всего опыта около 60±5 %. Доступ кислорода в почву достигался путем рыхления почвы. Сосуды оснащались дренажной системой для предотвращения застоя воды, что очень важно для протекания процессов эффективной биодеградации. Обработка почв бактериальными суспензиями – однократная.

Концентрация клеток в бактериальных суспензиях для каждого отдельного штамма (*Bacillus* sp. ВКМ В-2815D и *Bacillus simplex* ВКМ В-2817D) составляла по 1 млрд. КОЕ/см^3. Экспонирование опытов – 50 суток.

Норма внесения бактериальных суспензий:

Bacillus sp. ВКМ В-2815D – 100 см^3/кг почвы;

Bacillus simplex ВКМ В-2817D – 100 см^3/кг почвы.

Варианты опытов:

Контроль (К): П (почва) + ДТ (дизельное топливо);

П + ДТ + НД-1 (нефтедеструктор-1: штамм *Bacillus* sp. ВКМ В-2815D);

П + ДТ + НД-2 (нефтедеструктор-2: штамм *Bacillus simplex* ВКМ В-2817D).

В процессе биоремедиации почвыф исследовали на микробиологические и геохимические показатели.

Результаты исследований. Химический анализ показал, что через трое суток после искусственного загрязнения почвы ДТ в концентрации 1,5 % по массе содержание НП в опытной почве составило 1128,7 мг/кг, то есть убыль свежего загрязнения ДТ под воздействием естественных факторов достигла примерно 24,75 %. Полученный результат согласуется с данными, полученными из открытых литературных источников [6, 23 с.; 7, с. 1082–1110; 8], в которых так же отмечается, что в течение первых трёх суток после нефтезагрязнения, под влиянием естественных факторов (ультрафиолетового излучения, процессов выветривания, растворения, испарения, эмульгирования и др.) происходит убыль до 25–60 % УВ, содержащихся в нефти и НП. На этом основании, в качестве начальной концентрации

загрязнения в опытах принималось значение остаточного содержания НП в почве контрольного варианта, установленное через трое суток после начала опыта – 1128,7 мг/кг, что соответствовало умеренному уровню загрязнения.

При выше описанных условиях проведения опытов, через 50 суток были получены следующие результаты (рис. 1):

– в контрольном варианте без НД содержание НП снизилось с 1128,7 мг/кг до 817,5 мг/кг; убыль ДТ в процессе самоочищения почвы составила – 27,57 %;

– в опыте с применением НД-1 содержание НП снизилось с 1128,7 мг/кг до 532,5 мг/кг, убыль ДТ в процессе биодеструкции под влиянием штамма *Bacillus* sp. ВКМ В-2815D составила – 52,82 %;

– в опыте с применением НД-2 содержание НП снизилось с 1128,7 мг/кг до 541,2 мг/кг, убыль ДТ в процессе биодеструкции под влиянием штамма *Bacillus simplex* ВКМ В-2817D составила – 52,05 %.

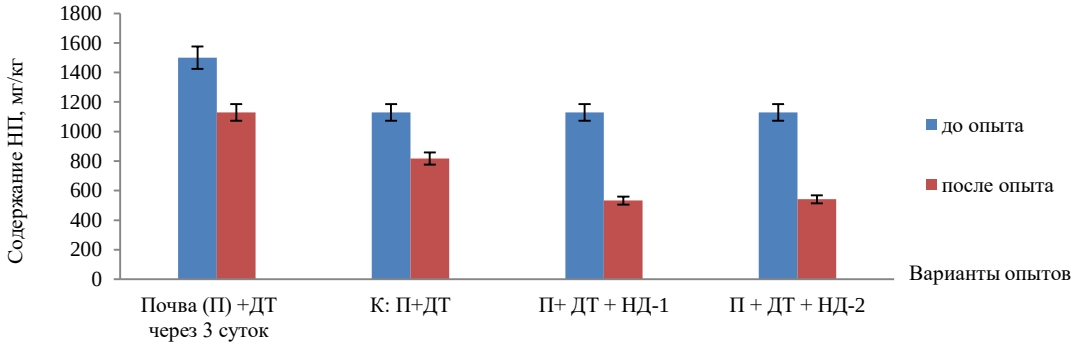


Рис. 1. Снижение содержания НП (ДТ 1,5%) в опытных почвах под влиянием отдельных штаммов НД за 50 суток (Исследования выполнены в ИЛ ГБУ «Служба Земледелия РС (Я)», г. Якутск, Аттестат компетентности лаборатории № ГОСТ.RU.22047 от 31.05.2024 г., Протокол испытаний № 73-1 от 23.08.2024 г.)

Таким образом, за 50 суток деградация НП под влиянием штаммов *Bacillus* sp. ВКМ В-2815D и *Bacillus simplex* ВКМ В-2817D была активнее почти в 2 раза, по сравнению с контрольным вариантом без НД, что свидетельствует о потенциале отобранных штаммов НД для их использования в биоремедиации нефтезагрязненных почв.

Исследования выполнены в рамках экспедиционных работ по Госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ №122011200369-1 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Кузьмина Н.П., Ермолаева С.В., Чевычелов А.П. Микробоценозы мерзлотных лесных почв Центральной Якутии // Сибирский лесной журнал. 2022. №6. С.22–33. DOI: 10.15372/SJFS20220603.
2. Тарабукина Н.П., Былгаева А.А., Степанова А.М., Парникова С.И., Неустроев М.П. Новые перспективные штаммы *Bacillus subtilis*, выделенные из мерзлотных почв Якутии // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т.53. №2. С.85-93. – DOI 10.26898/0370-8799-2023-2-11.
3. Биоремедиация нефтезагрязненных почв в климатических условиях Крайнего Севера / Л.А. Ерофеевская, Ю.С. Глязнецова, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая, С.Х. Лифшиц. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2022. 132 с. ISBN 978-5-6047823-9-2. DOI 10.53954/9785604782392.
4. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. – М.: Изд-во МГУ, 1980. 224 с.
5. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение, 1978. №6. С.48-54.
6. Карцева Н. Ю. Гигиеническая оценка процессов миграции и трансформации нефти в почве: специальность 14.00.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Москва, 2006. 23 с.
7. Лисичкин Г.В., Кулакова И.И. Ликвидация аварийных разливов нефти: состояние проблемы (обзор) // Журнал прикладной химии. 2022. Т.95. Вып.5. С.1082-1110. DOI: 10.31857/S0044461822090018.
8. Несмеянов А.А., Щеков А.А. Исследование испарения дизельного топлива с поверхности грунта при аварийных разливах // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. №1(139) // Электронный ресурс: DOI: https://doi.org/10/23670/IRLJ.2024/139.14 (дата обращения: 29.10.2025).

УДК 620.9
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-425-429

ЗАДАЧИ ПЕРЕВОДА НА СОРТОВОЙ УГОЛЬ КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Захаров В.Е., Петрова Т.Н.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: vasss@mail.ru

Аннотация. Использование рядового угля является основной причиной технологической стагнации и низкого уровня КПД коммунальных котельных Республики Саха (Якутия). В статье раскрываются ключевые задачи обеспечения региона сортовым качественным угольным топливом. Предварительная оценка верхней предельной цены сортового угля, на примере его производства на условном разрезе в центральной Якутии, указывает на эффективность инвестиций в условиях закрытого рынка и справедливого распределения среди разрезов поставок по основным группам потребителей. Отражена высокая чувствительность подготовки сортового угля к количеству выхода мелочи, что требует поиска оптимальных технологий дробления и путей её утилизации. Конкурентоспособность местного сортового угля с привозными возможно только после уточнения оптимальных технологий дробления, обогащения и утилизации штыба.

Ключевые слова: *топливоснабжение, уголь, энергетическая безопасность, малый разрез, сортировка угля.*

THE TASKS OF CONVERTING BOILER HOUSES OF THE MUNICIPAL ECONOMY OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA) TO HIGH-GRADE COAL

Zakharov V.E., Petrova T.N.
V.P. Larionov Institute of physical and technical problems of the North SB RAN

Abstract. *The use of ordinary coal is the main reason for technological stagnation and low efficiency of municipal boiler houses in the Republic of Sakha (Yakutia). The article reveals the key tasks of providing the region with high-quality coal. A preliminary estimate of the upper marginal price for high-quality coal based on the example of its extraction at a conditional mine in central Yakutia indicates the effectiveness of investments in a closed market and a fair distribution of supplies among the main consumer groups. There is a high sensitivity of the coal enrichment process to the amount of fines coming out, which requires the search for optimal crushing technologies and ways to dispose of it. The competitiveness of local coal in comparison with imported coal is possible only after clarifying the optimal technologies for crushing, processing and disposal of coal fines.*

Keyword: *fuel supply, coal, energy security, small mine, coal sorting*

Республика Саха (Якутия) является одним из лидеров угледобычи в России, уступая лишь Кемеровской области по итогам 2024г. Основной центр угледобычи – Южная Якутия, где добываются коксующиеся угли, в основном ориентированные на экспортный рынок. Уголь на территории Республики потребляются котельными централизованного теплоснабжения, на Нерюнгринской ГРЭС, мини-ТЭЦ п. Депутатский и месторождения Гросс, а также населением для нужд индивидуального отопления. Крупнейший потребитель – Нерюнгринская ГРЭС – технологически ориентирована на использование промпродукта обогащения южно-якутских углей. Подавляющая часть остальных внутренних потребителей обеспечивают малые разрезы, не имеющие возможностей выхода на внешние рынки, суммарной ежегодной добычей 1,1–1,2 млн. т. Весь уголь поставляется в рядовом виде. В настоящий момент практически у всех потребителей отсутствует процесс углеподготовки. Все угольные котельные характеризуются высокими потерями от механического и химического недожога. Открытое и длительное хранение угля приводит к повышению влажности и выветриванию угля [1–3].

Обширная территория региона, сложный рельеф, множество удаленных друг от друга не больших поселений, отсутствие качественной наземной транспортной инфраструктуры, высокая цена жидкого углеводородного топлива, низкий потенциал ВИЭ предопределяют дальнейшее широкое использование твердых видов топлива – прежде всего угля.

Низкая эффективность сжигания угля на ряду с усугублением неэффективности самих систем теплоснабжения в регионе [1] привели к кризису теплоснабжения в 2025 г. Одним из стратегических направлений выхода из кризиса является быстрое повышение эффективности использования угля. Первый шаг в этом направлении должен быть совершен в сторону полного перехода на сортовое угольное топливо. Это позволит достичь наилучшую эффективность сжигания, а также массово внедрить автоматизацию, диспетчеризацию котельных и кардинально снизить выбросы вредных веществ и углеродный след.

Отсутствие у традиционных поставщиков сортового угольного топлива вынуждает крупных потребителей искать альтернативные варианты. Так, для нужд АО «Теплоэнергосервис» и АО «Саха-энерго» (входят в группу ПАО «РусГидро»), обеспечивающих Усть-Янский район электроэнергией и теплом с 2020 года поставляется сортовой уголь из Хакасии и Казахстана.

Есть две основные пути решения данной задачи: начать сортировать уголь для внутренних нужд или завозить сортовой уголь из крупных центров угледобычи. Первый вариант позволяет сохранить действующие предприятия угледобычи, логистику углеснабжения и оставлять добавленную стоимость в экономике республики. Организация производства сортового угля требует предварительного экспериментального исследования в основном связанное с подбором технологии обогащения и дробления, определения количества выхода штыба (мелочь фракции 0-6 мм) и способов его утилизации. При больших объемах выхода штыба эффективность его использования прямо влияет на эффективность самого проекта по производству сортового угля. Наиболее распространенные направления использования угольной мелочи: сжигание на специализированных котлах и брикетирование.

Сжигание угля с большим содержанием мелочи целесообразно на котлах относительно большой мощности. В мире и в нашей стране под промпродукты углеобогащения строятся тепловые электростанции. В республике имеется положительный опыт строительства и эксплуатации угольной мини-ТЭЦ на месторождении Гросс в Олекминском районе мощностью 23,5 МВт. со среднегодовым потреблением 100 тысяч тонн. Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии на ТЭЦ Гросс исходя из отчетных данных существенно превосходит показатели ДЭС работающих в децентрализованной зоне республики и составляет 175 г у.т./кВт.ч. при расходе условного топлива на выработку тепловой энергии 208 кг у.т./Гкал, что сопоставимо по эффективности с газотурбинными ТЭС комбинированного цикла доказавшие свою эффективность в регионах Севера с большими потребностями в тепле. Данный опыт демонстрирует техническую возможность решения вопроса по утилизации угольного штыба. Этому способствует также близость качественных характеристик углей основных разрезов: Джебарики-Хайского, Харбалахского и Сангарского, а также их транспортная доступность между собой. Аналогичное техническое решение возможно реализовать при перепроектировании и возобновлении строительства законсервированной Зырянской ТЭЦ рядом с одноименным месторождением, поставляющем уголь для нужд Индигирской и Колымской групп улусов.

Брикетирование угольной мелочи в нашей стране особо не распространено, не смотря на значительное количество исследований технологий брикетирования. Единственное действующее промышленное предприятие по брикетированию бурого угля, известное авторам – АО «Березовский разрез». Из открытых источников известно, что в «Березовском разрезе» брикеты производятся из кокса бурого угля, полученного по технологии «Термококс» с использованием органического связующего – пшеничной муки. Проблема экономически оправданного связующего для малых разрезов республики остается открытым, в связи с отсутствием крупных сельскохозяйственных, химических и прочих производств, отходы которых традиционно рассматриваются в технологиях брикетирования. Но так как технологически брикетирование процесс не сложный возможен подбор разных связующих от коммунальных и промышленных отходов до закупки специализированного сырья на внешних рынках.

Второй вариант в Республике частично реализуется некоторыми теплоснабжающими организациями. Так Республика имеет опыт завоза в арктические районы сортовые угли из Хакасии и Казахстана через Мурманск по Северному морскому пути. Конечная стоимость сортового угля, завозимого по такой схеме сопоставимо со стоимостью рядового угля, завозимого по традиционной схеме из центральной Якутии. В период действия скидок на железнодорожные перевозки в западном направлении завоз сортового угля обходился вовсе на 25-30% дешевле (табл.1). Для основной группы потребителей, расположенных в центральной и вилюйской группе районов, завоз сортового угля возможен только по Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (АЯМ). Основным препятствием здесь, является перегруженность восточного полигона РЖД, отсутствие в настоящее время в центральной Якутии инфраструктуры для перевозки значительных объемов угля.

Таблица 1. Цена приобретения и стоимость доставки местного и привозного угля для потребителей янской группы районов РС(Я) в 2020–2021 годах

Месторождение	Местонахождение конечного потребителя	Протяженность транспортного пути, км	Конечная стоимость угля, руб/тнт			Цена приобретения угля, тыс. руб/тнт			Стоимость транспортировки, тыс. руб/тнт		
			2020	2021	2022	2020	2021	2022	2020	2021	2022
Джебарики-Хая (Якутия)	Верхоянский район	2000	22,9	23,1	24,7	3,2	3,5	4,1	19,7	19,6	20,6
Черногорское (Хакасия)	Усть Янский район	9000	15,2		26,3	3,4		6,8	11,8	0	19,5
Каражыра (Казахстан)	Усть Янский район	9500		16,9			3,4		0	13,5	0

Цены приобретения сортового и местного рядового угля в 2020–2021 гг были сопоставимы. Некоторая разница в цене наблюдается в 2022 году (табл. 1). Тариф на перевозку угля от потенциальных поставщиков до станции Нижний Бестях после подготовки инфраструктуры требует дальнейшей оценки. После чего появится возможность анализа ценовой конкурентоспособности местного сортового угля с привозными. В рамках данного этапа работы проведена предварительная оценка верхней предельной цены (в ценах 2025 г.) – максимальной цены на сортовой уголь, при котором затраты конечного потребителя остаются на текущем уровне. В расчетах принималось условное изменение эффективности сжигания угля с 70 до 85%. В таблице 2 приведена оценка верхней предельной цены сортового угля и добавленной стоимости сортового угля условного разреза, расположенного в центральной части Якутии в ценах 2025 года при полной реализации продукции потребителям центральной Якутии (первой группе потребителей). Результаты показывают, что при выходе штыба более 30% неминуемо приводит к росту затрат конечного потребителя. Эффективность в этом случае сохраняется только при выходе штыба менее 10%. При выходе штыба в районе 20% добавленная стоимость составит около 80 млн. руб. в год, что с учетом того что расчеты проведены для максимально возможной цены, является показателем на границе нулевой рентабельности, а без полной реализации штыба соответствует только фонду оплату труда персонала из 10 человек при средней заработной плате по региону. Это осложняет внедрение производства сортового угля для Харбалахского разреза, не имеющего возможностей участвовать в поставках угля для третьей группы потребителей.

Таблица 2. Предварительная оценка верхней предельной цены сортового угля и добавленной стоимости сортового угля условного разреза, расположенного в центральной части Якутии в ценах 2025 года при реализации продукции первой группе потребителей

	Уголь рядовой	Уголь сортовой		
Объем реализации угля, тыс. т				
Первая группа потребителей (Центральная Якутия)	200	165	165	165
Объем выхода фракции 0-13 мм, %		10	20	30
Объем выхода фракции 0-13 мм, тыс.т.		18	41	71
Объем добычи рядового угля, тыс.т.	200	183	206	235
Себестоимость (цена) рядового угля, руб./т	5000	5000	5000	5000
Верхняя предельная цена сортового угля, руб/т		6500	6500	6500
Цена фракции 0-13 мм, руб./т	1000	1000	1000	1000
Стоимость угля, тыс.руб.	1000000	915033	1029412	1176471
Выручка от реализации сортового угля, тыс.руб.		1070588	1070588	1070588

Выручка от реализации фракции 0-13 мм, тыс.руб.		18301	41176	70588
Добавленная стоимость сортового угольного топлива, тыс. руб.		173856	82353	-35294
то же без учета реализации фракции 0-13 мм., тыс. руб.		155556	41176	-105882
Стоимость доставки угля, руб/т				
Первая группа потребителей (Центральная Якутия)	2000	2000	2000	2000
Стоимость угля для конечного потребителя, тыс.руб.	1400000	1400000	1400000	1400000

В таблице 3 приведена оценка верхней предельной цены сортового угля и добавленной стоимости сортового угля условного разреза, расположенного в центральной части Якутии в ценах 2025 года при полной реализации продукции наиболее удаленным потребителям, расположенным на бассейне р. Яна (третьей группе потребителей). В данном случае из-за высокой транспортной составляющей конечной стоимости угля подготовка сортового угля остается высокорентабельной даже при высоких показателях выхода штыба, и верхняя предельная цена сортового угля ожидаемо является максимальной. Наиболее выгодным в условиях закрытого рынка является участие каждого разреза в поставках угля для третьей группы потребителей. При наличии смешанного портфеля поставок верхняя предельная цена сортового угля из местных разрезов может составить 7–8 тысяч рублей за тонну, что позволяет не увеличивать затраты конечных потребителей.

Таблица 3. Предварительная оценка верхней предельной цены сортового угля и добавленной стоимости сортового угля условного разреза, расположенного в центральной части Якутии в ценах 2025 года при реализации продукции третьей группе потребителей

	Уголь рядовой	Уголь сортовой		
Объем реализации угля, тыс. т				
Третья группа потребителей (бассейн р. Яна)	200	165	165	165
Объем выхода фракции 0-13 мм, %		10	20	30
Объем выхода фракции 0-13 мм, тыс.т.		18	41	71
Объем добычи рядового угля, тыс.т.	200	183	206	235
Себестоимость (цена) рядового угля, руб./т	5000	5000	5000	5000
Верхняя предельная цена сортового угля, руб/т		10357	10357	10357
Цена фракции 0-13 мм, руб./т	1000	1000	1000	1000
Стоимость рядового угля, тыс.руб.	0	915033	1029412	1176471
Выручка от реализации сортового угля, тыс.руб.		1705882	1705882	1705882
Выручка от реализации фракции 0-13 мм, тыс.руб.		18301	41176	70588
Добавленная стоимость сортового угольного топлива, тыс. руб.		809150	717647	600000
то же без учета реализации фракции 0-13 мм., тыс. руб.		790849	676470	529411
Стоимость доставки угля, руб/т				
Третья группа потребителей (бассейн р. Яна)	20000	20000	20000	20000
Стоимость угля для конечного потребителя, тыс.руб.	5000000	5000000	5000000	5000000

Заключение. Необходимость перехода на качественное сортовое угольное топливо в коммунальном хозяйстве республики назрела давно. Некоторые потребители уже ориентированы на привозной сортовой уголь отказавшись от предложений местного рядового угля. Снятие ограничений по перевозке угля до станции Нижний Бестях будет способствовать постепенному замещению местных углей привозными, что негативно скажется на финансовую устойчивость местных малых разрезов. Полное вытеснение с внутреннего рынка углей местных разрезов кардинально изменит условия обеспечения энергетической безопасности республики усилив влияние внешних слабоуправляемых угроз.

Организация производства сортового угля на базе местных разрезов требует решения задач по подбору технологии обогащения и дробления, а также по эффективному использованию штыба. В связи с отсутствием дешевого местного сырья для получения связующего для брикетирования наиболее привлекательным способом является сжигание штыба в специализированных котлах. В настоящее время таким объектом могла бы выступить угольная ТЭЦ малой мощности по примеру ТЭЦ, действующей на месторождении Гросс.

Предварительные расчеты показывают, что цена местного сортового угля при закрытом внутреннем рынке и грамотном механизме распределения портфеля поставок между разрезами может быть достаточной для инвестиций в подготовку сортового топлива. Конкурентоспособность цены местного

сортового угля требует уточнения технологий его подготовки, способов утилизации штыба и стоимости мероприятий по нивелированию угроз энергетической безопасности, возникающих при росте зависимости от привозного угля.

Работа выполнена в рамках проекта FWRS-2024-0031 Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учётом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных электроэнергетических систем труднодоступных, изолированных территорий Севера и Арктики.

Список литературы

1. Ivanova A.E., Zakharov V.E., Petrova T.N The current state, problems and perspective of development on the North region's Housing and Utilities After the example of the Republic of Sakha (Yakutia) (Conference Paper) 6-9 Oct. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020 DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271489.
2. V. Zakharov. D. Prokhorov, N. Pavlov. Russian Arctic region balance (Republic of Sakha (Yakutia)). E3S Web of Conferences 114, 02005 (2019) «Energy Systems Research 2019». DOI 201911402005
3. Захаров В.Е., Иванова А.Е., Петрова Т.Н. Энергетика Арктической зоны Республики Саха (Якутия): текущая ситуация и перспективы развития // «Экономика Востока России». 2019. №1. С.81-86

УДК 622.691.2-405
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-430-434

АНАЛИЗ ГАЗОГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СНАБЖЕНИЯ ГАЗОМ ТРУДНОДОСТУПНЫХ АРКТИЧЕСКИХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Калачева Л.П., Иванова И.К.
ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Институт проблем нефти и газа СО РАН
E-mail: lpko@mail.ru

Аннотация. *В работе проведен анализ газогидратных технологий для снабжения газом арктических районов Республики Саха (Якутия). Экспериментальное исследование процессов образования и разложения гидратов в воде и растворах солей различных концентраций показали возможность использования ГПГ-технологии для аккумулирования, хранения и транспортировки природного газа в климатических условиях и при существующей транспортной инфраструктуре региона. Экспериментально установлено концентрирование углеводородов С2-С4 в гидратной фазе в процессе образования гидратов в растворах солей, приводящее к повышению коэффициента жирности и теплотворной способности исходного газа. Показано, что холодные климатические условия арктических районов Республики Саха (Якутия) позволяют использовать газовые гидраты в качестве дополнительного источника энергии.*

Ключевые слова: *газовый гидрат, природный газ, растворы солей, коэффициент жирности и теплотворная способность газа, газогидратные технологии.*

ANALYSIS OF GAS HYDRATE TECHNOLOGIES FOR GAS SUPPLY TO HARD-TO-REACH ARCTIC AREAS OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)

Kalacheva L.P., Ivanova I.K.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

Abstract. *This paper analyzes gas hydrate technologies for supplying gas to the Arctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia). An experimental study of the hydrates formation and decomposition in bulk water and salt solutions of different concentrations demonstrated the feasibility of using gas hydrate technology for the accumulation, storage, and transportation of natural gas under the region's climatic conditions and existing transport infrastructure. Experiments demonstrated the concentration of C2-C4 hydrocarbons in the hydrate phase during hydrate formation in salt solutions, leading to an increase in the fat content and calorific value of the original gas. It is shown that the cold climatic conditions of the Arctic regions of the Republic of Sakha (Yakutia) allow to use gas hydrates as an additional energy source.*

Keyword: *gas hydrate, natural gas, salt solutions, fatness index and calorific value of gas, gas hydrate technologies.*

Обеспечение устойчивого социально-экономического развития арктической зоны Российской Федерации в значительной степени связано с решением проблем энергоснабжения. В настоящее время стоимость электроэнергии для потребителей этих территорий превышает среднероссийские показатели в 5–55 раз, а тарифы на тепловую энергию – в 3–17 раз [1]. Основой теплоснабжения являются котельные различной мощности, а также индивидуальные печи, использующие разнообразные виды топлива. Согласно данным на 2018 год, в арктических районах эксплуатировалось около 200 котельных, работающих на угле, дровах, нефтепродуктах, газоконденсате и дизельном топливе. Доля топливной составляющей в себестоимости производимой тепловой энергии достигает 60–70%, при этом в структуре затрат на топливо до 70–80% могут составлять транспортные расходы [2, 3]. Столь высокая доля логистических издержек объясняется исключительной сложностью организации поставок: лишь 8,7% площади региона находится в зоне круглогодичной транспортной доступности, в то время как для более чем 90% территории Республики возможна лишь сезонная доставка грузов, осуществляемая речным, морским и наземным транспортом. Анализ структуры потребления топлива указывает на преобладание дорогостоящих жидких углеводородов и насущную необходимость ее оптимизации в средне- и долгосрочной перспективе в рамках программ энергосбережения и диверсификации источников энергии [2]. Одним из таких альтернативных источников рассматриваются газовые гидраты, что

связано с их уникальной способностью аккумулировать значительные объемы газа – до 170 м³ газа в 1 м³ гидрата.

Для доставки газа до потребителей в мировой практике используются следующие технологии [4, 5]: сжиженный природный газ (СПГ); компримированный природный газ (КПГ); гидраты природного газа (ГПГ); адсорбированный природный газ (АПГ); синтетическое жидкое топливо (СЖТ); газ в электричество (ГвЭ). Для условий Российской Федерации наиболее подходят способы транспорта больших объемов непереработанного газа, т. е. СПГ-, КПГ-, ГПГ-технологии. В ряде исследований [6–8] приведены сравнительные экономические характеристики транспортировки природного газа по этим технологиям. На основе оценки капитальных и операционных расходов для каждой технологии в зависимости от годовых объемов транспортировки газа были рассчитаны денежные потоки и норма доходности проектов. Анализ демонстрирует, что каждая из технологий имеет четко выраженную нишу экономической эффективности, определяемую рыночными ценами на газовую продукцию. Так, транспортировка газа в виде СПГ эффективна в диапазоне больших объемов и расстояний (>1 млрд. м^3 газа на >1000 км), а порог безубыточности КПГ несколько ниже (≤1 млрд. м^3 на >1000 км). Перевозка природного газа в виде его гидратов применима для поставок ≤1 млрд. м^3 газа на относительно короткие расстояния – до 1000 км.

Перевод природного газа в гидратное состояние (ГПГ-технологии) открывает возможности для экономически целесообразной наземной и морской транспортировки газа при освоении небольших и удаленных месторождений, утилизации попутного нефтяного газа, а также для организации хранения гидратов с последующим использованием газа малыми и средними потребителями. В настоящее время природный газ хранится и транспортируется либо в виде гранул (пеллет) разного размера, либо в виде суспензии порошка в углеводородах. При этом простота конструкции хранилищ (теплоизолированные емкости) и мягкие условия хранения (атмосферное давление, небольшие отрицательные температуры) являются достоинствами газогидратного метода. Безопасность данного метода транспортировки и хранения определяется медленным выделением газа при разрушении хранилища [9]. Таким образом, гидратный способ транспортировки газа ориентирован прежде всего на локальное снабжение небольших населенных пунктов, находящихся в труднодоступных районах и удаленных от магистральных газопроводов [8].

Масса воды в гидрате составляет от 78 до 87%, то есть для перевода 1 м^3 газа в гидрат необходимо около 5 кг воды. Республика Саха (Якутия) обладает значительными ресурсами для организации производства газовых гидратов: 1) по состоянию на 01.09.2019 г. на месторождениях добыто 3,2 млрд м^3 природного газа; 2) Якутия занимает первое место среди регионов России по протяжённости речной сети и общей площади озёр и искусственных водоёмов, так насчитывается более 443 тыс. рек и малых водотоков и более 672 тыс. озер.

Важнейшей характеристикой энергетических возможностей и экономической эффективности топлива является теплота сгорания. В качестве базы принята единица условного топлива (у.т.), имеющая теплоту сгорания, равную 29,3 МДж/кг твердого и жидкого топлива и 29,3 МДж/м^3 газообразного топлива. Теплотворная способность газа зависит от его компонентного состава, которая характеризуется коэффициентом жирности. По коэффициенту жирности различают сухие (0.38%), полужирные (8–20%), жирные (20–30%) и высокожирные газы (>30%) [10].

Образование гидратов природного газа сопровождается его частичным фракционированием [11, 12]. При этом в гидратную фазу переходят более тяжелые компоненты природного газа, за счет концентрирования которых газ в гидратной фазе имеет более высокие коэффициент жирности и теплотворную способность.

В работе гидраты природного газа Средневилюйского газоконденсатного месторождения (ГКМ) были получены в объеме воды и водных растворов солей, типичных для природных вод. Анализ компонентного состава природного газа и газов в полученных гидратах был проведен методом газоадсорбционной хроматографии.

Исходный природный газ (ПГ) по коэффициенту жирности относится к сухим, обладает теплотворной способностью 1,2 у.т. (рис. 1). Коэффициент жирности газа в гидрате, полученного в воде, повышается в 2,83 раза, а эффективность как топлива – в 1,14 раз по сравнению с исходным природным газом. Использование растворов солей в процессе гидратообразования природного газа приводит к повышению теплоты его сгорания. Газ в гидратах, полученных в растворах гидрокарбоната натрия, по тепловым характеристикам сопоставим с газом в гидрате, полученном в воде. Газы в гидратах из 15% растворов NaCl и $CaCl_2$ классифицируются как жирные и высокожирные газы. Коэффициенты жирности и теплотворная способность газов в гидратах из растворов солей изменяются в пределах 16,75÷35,40 и 1,32÷1,62, соответственно. Теплота сгорания полученных гидратов (у.т.) сопоставима с

энергетической эффективностью от попутного нефтяного газа, отработанного масла (1,3 у.т.), топочного мазута (1,37 у.т.) до СПГ (1,57 у.т.). Следовательно, показана возможность использования вод открытых водоемов (озер, рек и морей), а также подземных и пластовых вод нефтяных и газовых месторождений в процессе синтеза гидратов для получения энергоэффективного топлива.

Главным параметром для хранения и транспортировки гидратов как топлива является их кинетическая устойчивость, которая характеризуется скоростью диссоциации и временем разложения 50% гидратов. Расчет этих величин выполнялся по методикам, изложенным в [13, 14].

В таблице 1 приведены кинетические характеристики процесса разложения гидратов природного газа. Видно, что с увеличением концентрации растворов солей скорость разложения гидратов увеличивается, следовательно, устойчивость гидратов снижается. Кинетическая стабильность гидратов из 15% растворов NaCl и $CaCl_2$ в 2 раза ниже, по сравнению с гидратами из воды. Причем, кинетическая устойчивость гидратов из растворов $NaHCO_3$ практически сопоставима с гидратом, полученным в воде. Таким образом, кинетическая стабильность гидратов природного газа возрастает в ряду «$CaCl_2$<NaCl<$NaHCO_3$<H_2O».

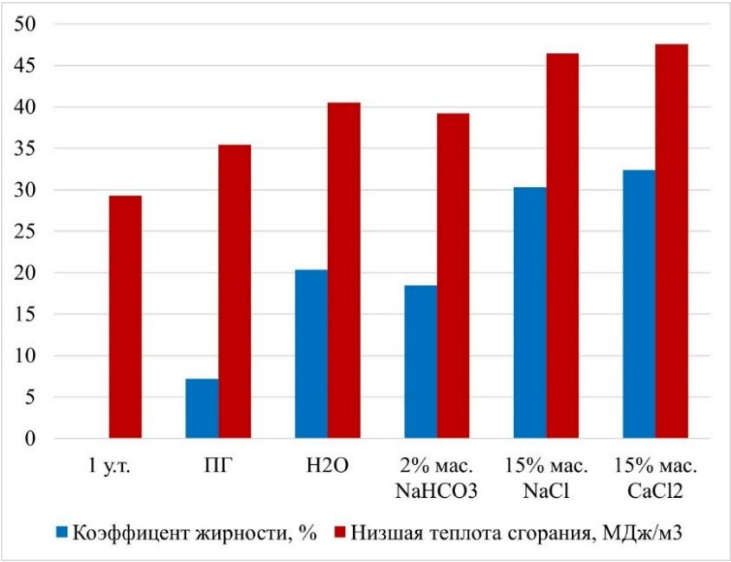


Рис. 1. Коэффициент жирности и теплотворная способность природного газа и газов в гидратах в сравнении с единицей условного топлива (у.т.)

Таблица 1. Кинетические параметры разложения гидратов природного газа, полученных в воде и растворах солей

Жидкая фаза	Концентрация, % масс.	Время разложения 50% гидратов, мин	Скорость разложения, %/мин
H_2O	0	2.54	19.69
Раствор NaCl	5.0	1.77	28.25
	10.0	1.55	32.25
	15.0	1.35	37.04
Раствор $CaCl_2$	5.0	1.56	32.05
	10.0	1.46	34.25
	15.0	1.21	41.32
Раствор $NaHCO_3$	0.25	2.49	20.11
	0.5	2.20	22.70
	1.0	2.13	23.50
	2.0	2.01	24.88

На основании приведенных результатов можно заключить, что для получения стабильных гидратов с высокой теплотворной способностью можно использовать пресные воды и воды гидрокарбонатно-натриевого типа с минерализацией до 20 г/л.

Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную возможность реализации газогидратных технологий для аккумулирования, хранения и использования природного газа в

качестве дополнительного энергоресурса в Республике Саха (Якутия). Предлагаемая технология предполагает получение формованных гидратов для автономного снабжения потребителей (рис. 2). Важной особенностью технологии является потенциальная возможность упрощения или исключения стадии подготовки исходного сырья: как газа (осушка и удаление механических примесей), так и воды (отстаивание и фильтрование, умягчение, деминерализация). Получение гидратов может производиться на стационарной установке, использующей естественно низкие температуры окружающей среды арктического региона для минимизации энергозатрат процесса. Для использования готового «гидратного топлива» рассматриваются два основных сценария: 1) регазификация гидратов с последующим компримированием для использования в стандартных газовых котлах; 2) непосредственное сжигание в котельных и индивидуальных печах в частном секторе.

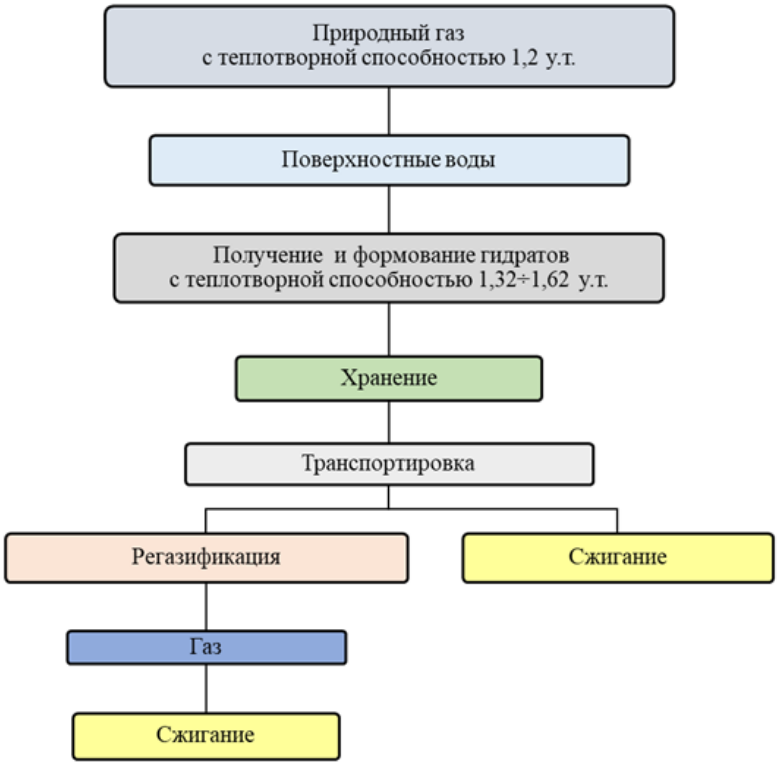


Рис. 2. Технологические этапы получения газовых гидратов и их использования в качестве топлива

Таким образом, для организации теплоснабжения арктических районов Республики Саха (Якутия) в качестве перспективного дополнительного источника энергии существует реальная возможность использования газовых гидратов. Суровые климатические условия арктического региона (среднегодовая температура не превышает +14°C) создают естественные предпосылки для синтеза, хранения и транспортировки газа в гидратном состоянии без значительных энергетических затрат и капитальных вложений. Это открывает путь к снижению зависимости от дорогостоящего привозного топлива и способствует устойчивому развитию труднодоступных территорий.

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и образования РФ (№ 122011100157-5) на научном оборудовании центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. Гиназов Д.Д., Воротников А.М. Энергосервисные контракты как инструмент развития северных территорий // АРКТИКА 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2024. № 3(19). С.74–81. DOI: 10.51823/74670_2024_3_74
2. Топливно-энергетический баланс Республики Саха (Якутия) / М-во экон. развития Республики Саха (Якутия), ин-т физ.-техн. Проблем Севера СО РАН: [науч. рук. и отв. исполн. д.т.н. Н.А. Петров]. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2005. 160 с.
3. Гаврилов В.Л., Ткач С.М., Батугина Н.С. Об эффективности использования различных видов топлива в труднодоступных районах Крайнего Севера // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата: сборник трудов II Всероссийской конференции. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2019. С.31–35.

4. Якушев В.С., Квон В.Г., Долгаев С.И., Истомин В.А. Анализ конкурентных преимуществ гидратных технологий в газовой промышленности // Аналитик – 2009: сб. науч.-техн. обзоров. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2010. С.4–27.
5. Veluswamy H.P., Kumar A., Seo Y., Lee J.D., Linga P. (2018) A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates. *Applied Energy*, vol. 216, pp. 262–285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.059
6. Rehder G., Eckl R., Elfgen M., Falenty A., Hamann R., Kähler N., Kuhs W.F., Osterkamp H., Windmeier C. (2012) Methane hydrate pellet transport using the self-preservation effect: a techno-economic analysis. *Energies*, vol. 5, pp. 2499–2523. DOI: 10.3390/en5072499
7. Kang H.J., Yang Y., Ki M.S., Shin M.S., Choi J., Cha J.-H., Lee D. (2016) A concept study for cost effective NGH mid – stream supply chain establishing strategies. *Ocean Eng.*, vol. 113, pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.052
8. Долгаев С.И., Квон В.Г., Истомин В.А., Герасимов Ю.А., Тройникова А.А. Сравнительные экономические характеристики гидратной транспортировки природного газа // Научно-технический сборник ВЕСТИ ГАЗОВОЙ НАУКИ. 2018. №1(33). С. 100–116.
9. Манаков А.Ю., Стопорев А.С. Актуальные аспекты физической химии газовых гидратов и их технологического применения // Успехи химии. 2021. Т.90. №5. С.566–600. DOI: 10.1070/RCR4986
10. Природный газ. Метан: справочник / С.Ю. Пирогов и др. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 848 с.
11. Нестехиометрические соединения: монография / Под ред. Л. Манделькорна. М.: Химия, 1971. 608 с.
12. Kalaceva L.P., Rojin I.I., Fyodorova A.F. (2017) The study of the stratum water mineralization influence on the hydrate formation process of the natural gas from the East Siberian platform fields. *SOCAR Proceedings*, no 2, pp. 56–61. DOI: 10.5510/OGP20170200315.
13. Калачева Л.П., Портнягин А.С. Свойства гидратов природного газа, полученных в модельных растворах гидрокарбонатно-натриевого типа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. №10-2. С.196–200. DOI: 10.17513/mjpfi.11887
14. Мельников В.П., Нестеров А.Н. Диссоциация газовых гидратов при атмосферном давлении // Газовая промышленность: Спецвыпуск «Газовые гидраты». 2006. С.55–61.

УДК 621.316.90
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-435-439

ПОДВЕСНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Ли-Фир-Су Р.П.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
e-mail: lifirsu@mail.ru

Аннотация. *Успешный многолетний опыт (с 1982 г.) натурных испытаний линейных полимерных изоляторов на действующих линиях электропередач АК «Якутскэнерго» (ВЛ 35 кВ и 110 кВ) показывает преимущества перед традиционными изоляторами из стекла и фарфора в условиях экстремального климата Севера. Расчетная долговечность полимерных изоляторов примерно 40 лет. Дальнейшие натурные испытания подвесных полимерных изоляторов имели бы ценность в определении долговечности, надежности электрических и механических параметров полимерных изоляторов и позволили бы их рекомендовать как высоконадежные изделия для промышленной энергетики Севера.*

Ключевые слова: *полимерные изоляторы, резко континентальный климат, натурные испытания, долговечность, высоконадежность*

SUSPENSION POLYMER INSULATORS IN EXTREME CLIMATIC CONDITIONS OF THE NORTH

Li-Fir-Su R.P.
The Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *Successful long-term experience (since 1982) in field testing of linear polymer insulators on existing Yakutskenergo power transmission lines (35 kV and 110 kV)shows advantages over traditional insulators made of glass and porcelain in the extreme climate of the North. The estimated durability of polymer insulators is approximately 40 years. Further field tests of suspended polymer insulators would be valuable in determining the durability and reliability of electrical and mechanical parameters of polymer insulators and would allow them to be recommended as highly reliable products for industrial energy in the North.*

Keywords: *polymer insulators, sharply continental climate, field tests, durability, high reliability*

Анализ опыта эксплуатации высоковольтных линий электропередачи зарубежных кампаний (в Англии, Японии, Германии, США) и в нашей стране показал, что 57% всех аварий на линиях приходится на изоляцию [1]. В Якутии эксплуатация линейных высоковольтных изоляторов из фарфора началась в 40-е годы, стеклянные начали применяться в 70-е прошлого столетия. За этот период накоплен достаточно большой опыт их эксплуатации. Изоляторы в резкоконтинентальном, холодном климате Севера быстрее теряют свои электрические, физико-технические свойства и выходят из строя [2]. В районах Крайнего Севера температура значительно ниже минус 50 ^{0}С. Например, абсолютный минимум температуры в г. Якутске достигал минус 64 ^{0}С, в г. Вилюйске – минус 62^{0}С, а в Оймяконе – минус 71 ^{0}С. При таких температурах происходит ускоренное снижение электромеханической прочности изолятора; прочность снижается и у арматуры изоляторов, что в целом приводит к сокращению срока их службы [3].

Основными причинами выхода из строя изоляторов следует считать:

- повреждения при транспортировке;
- неравномерное расширение сжатия частей изоляторов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения, вследствие большого перепада годовых (от –66 ºС до +38 ºС) и суточных температур [4].

Проведенный статистический анализ аварий в энергоузлах АК «Якутскэнерго» подтвердил подобную тенденцию (табл. 1).

Таблица 1. Распределение отказов и аварий по предприятиям АК “Якутскэнерго”, % (за 10 лет)

Электрические сети	Элементы ЛЭП: изоляторы
Западные	22,2
Центральные	50,0
Южно-Якутские	21,0
Вилюйские	32,5
Северные	21,3

Из таблицы 1 видно, что в Центральных и Вилюйских электрических сетях, которые охватывают наиболее холодные с повышенной солнечной радиацией и с резко континентальным климатом районы Якутии, наиболее частыми являются отказы изоляторов. Характер повреждения изоляторов подтверждает, что снижение механической прочности изоляторов связано с температурными изменениями.

Достижения науки о полимерах привели к созданию новых материалов, которые представляют большой интерес для электрической изоляции, в том числе, и для изоляторов высокого напряжения наружной установки. Это стекловолокно, пропитанное смолой и имеющее очень высокую прочность на растяжение и группа водоотталкивающих полимеров типа политетрафторэтилена (ПТФЭ) и силиконовых резин [5].

У нас в стране разработкой и исследованием полимерных изоляторов также занимаются ряд ведущих НИИ и предприятий (НИИПТ, ЛПИ, ВПО «Союзэлектросетьизоляция», СибНИИЭ, ООО «Полимеризолятор», ООО «ИНСТА» и др.).

Многолетний опыт эксплуатации, испытаний полимерных изоляторов за рубежом и у нас в стране позволяют достоверно сформулировать их преимущества перед традиционными изоляторами из фарфора и стекла [6–9].

В настоящее время в стране более 20 энергосистем эксплуатируют порядка 30…40 тыс. полимерных изоляторов с оболочкой из кремнийорганической резины, в том числе, и ОАО АК «Якутскэнерго».

Отдел электроэнергетики Института физико-технических проблем Севера СО РАН (г. Якутск) совместно с СибНИИЭ, ОАО АК «Якутскэнерго» и СКТБ «Союзэлектросетьизоляция» проводили натурные испытания полимерных изоляторов с 1982 года с целью определения их устойчивости к факторам холодного климата. На рис. 1 приведена конструкция полимерного изолятора, совместного с СибНИИЭ изготовления, для эксплуатации в условиях Севера. В качестве несущей арматуры используется стеклопластиковый стержень 1, состоящий из волокон бесщелочного стекла, пропитанных полиэфирной или эпоксидной смолой.

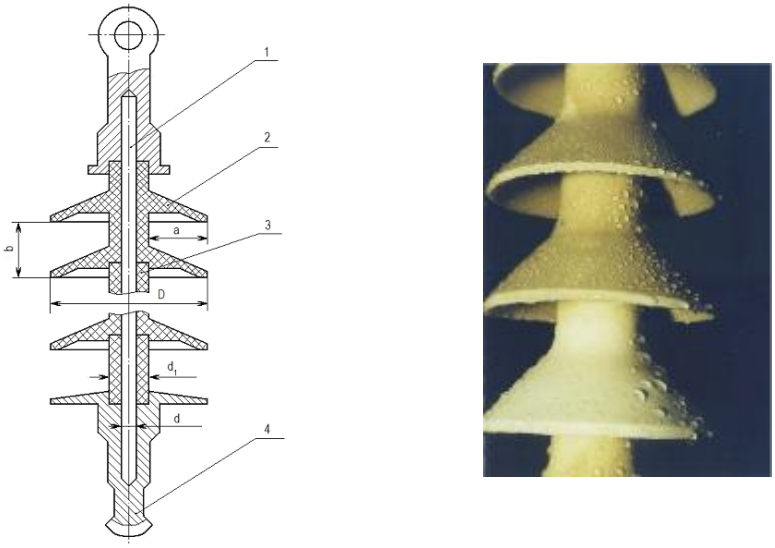


Рис. 1. Конструкция полимерного изолятора

В результате исследований множества электроизоляционных материалов в качестве основы для изготовления оболочек и герметизирующих покрытий для опытных образцов были выбраны кремнийорганические эластомеры. Поэтому в качестве защиты несущего стержня от атмосферных воздействий и загрязнений используются изоляционные кремнийорганические оболочки 2, а граница между

стержнем и оболочкой заполняется герметиком 3 из того же материала. Стальные оконцеватели 4 закрепляются посредством клиновой или прессуемой заделки.

С целью выяснения электрофизических характеристик, выбранных кремнийорганических материалов при воздействии неискаженной по спектру солнечной радиации, а также факторов холодного климата образцы этих материалов и эпоксидных компаундов экспонировались на открытом полигоне в условиях г. Якутска [10, 11].

Изоляторы проходили испытания на ВЛ Центральной Якутии, где факторы холодного климата наиболее ярко выражены, а характеристика загрязнения атмосферы соответствует I …III степени. Испытания проходили (подвесные и натяжные) 49 изоляторов на двух действующих ВЛ 35 кВ и 113 изоляторов на семи ВЛ 110 кВ.

Наблюдения за поведением полимерных изоляторов на действующих ВЛ 35 и 110 кВ в системе ОАО АК «Якутскэнерго» проводились с 1982 года. В 1985 году демонтирована первая партия изоляторов ПК-70/35. В 1988 и 1989 гг. были демонтированы изоляторы ПК-70/110 и ЛК-70/110.

Испытания изоляторов проводились согласно Методических указаний по определению трекинго-эрозионной стойкости полимерных изолирующих конструкций наружной установки и Указаний по проведению эксплуатационных испытаний опытно-промышленных партий подвесных полимерных изоляторов [12, 13].

Из таблицы 2 видно, что изоляторы хорошо сохраняют свои гидрофобные свойства, при увлажнении изоляторов не образуется сплошной водяной пленки, что обеспечивает высокие влагоразрядные напряжения изоляторов.

Таблица 2. Изменения поверхностных свойств полимерных изоляторов после эксплуатации на ВЛ в сетях «Якутскэнерго» в районе I СЗА

Состояние изолятора	Краевой угол смачивания	χ_s, мкСм			Влагоразряный градиент $E_н$, кВ/см
		верх. ребра	ствол	низ. ребра	
До эксплуатации	90°	0	0	0	2,85
После эксплуатации в течение 3-х лет ПК-70/35	105°	0,001	0,001	0,001	2,70

Напряжения возникновения короны измерялись на сухих, а также на увлажненных до насыщения изоляторах. У изоляторов без экранного диска на оконцевателе корона возникала на нижнем диске. На сухих изоляторах напряжение возникновения короны во всех случаях превышало рабочее напряжение. Наибольшие напряжения возникновения короны зафиксированы на изоляторах ЛК-70/110, не бывших в эксплуатации с диаметром нижнего экрана 107 мм.

При измерении влагоразрядных напряжений обнаружена слабая зависимость снижения влагоразрядных напряжений от степени загрязнения атмосферы и длительности эксплуатации изоляторов. Так, изоляторы, эксплуатировавшиеся в течении 4-х лет, имели, соответственно, напряжения 320,7 и 312,6 кВ. Полимерные изоляторы ПК-70/35 имеют значения влагоразрядных напряжений в пределах 123…142 кВ. По влагоразрядным напряжениям относительно рабочего напряжения полимерные изоляторы имеют большой запас прочности (более, чем 3-х кратный).

50%-ное разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности изоляторов типа ЛК-70/110 находится в пределах 524…528 кВ, ПК-70/110 – в пределах 567…573 кВ, а ПК-70/35 – в пределах 295…296 кВ. Выдерживаемое напряжение грозового импульса при положительной полярности изоляторов типа ЛК-70/110 составляет 500-510 кВ, ПК-70/110 – 565…566 кВ, а ПК-70/35 – 285…287 кВ.

Таблица 3. Данные по электрической прочности полимерных изоляторов

Тип изолятора	Период эксплуатации	Напряжение возникновения короны (в сухом и увлаж. сост.), кВ	Удельная поверхностная проводимость, мкСм	50%-ное разрядное напряжение при Е.З., кВ	50%-ное разрядное и выдер-живаемое напряжение грозового импульса, кВ	50%-ное разрядное и выдерживаемое напряжение коммутационного импульса, кВ	Трекинго-стойкость, напряжение возник-новения ПЧР, кВ	Примечание
ПК-70/35-К	1982-1988	75 72	0	142,1	295 287	254 248	ПЧР не возник	
ПК-70/35-ПК	«-»	85 70	0	123,5	296 285	257 250	«-»	
ПК-70/110-ПК	1984-1988	60 55	0	320,7	567 566	530 514	«-»	
ПК-70/110-К	«-»	77 60	0	312,7	573 565	539 521	«-»	
ЛК-70/110	1987-1989	-	ствол-0, низ-0, верх-0	333,3	526,8 508,6	481,4 465,0	«-»	Диаметр экрана – 90мм
ЛК-70/110	«-»	77 72	«-»	323,3	528,3 510,0	477,0 460,2	«-»	«-»
ЛК-70/110	«-»	-	«-»	330,0	524,3 500,2	462,6 443,4	«-»	«-»
ЛК-70/110	не был в экспл.	135 80	0	359,2	557,0 547,0	531,0 516,0	«-»	Диаметр экрана – 107 мм
ЛК-70/110	«-»	135 82	0	349,2	552,0 542,0	529,0 517,0	«-»	«-»

Нормированное выдерживаемое напряжение грозового импульса изоляторов класса 110 кВ по ГОСТ 1516.1-76 составляет 480 кВ, изоляторов класса 35 кВ – 195 кВ. Таким образом, полимерные изоляторы испытание напряжением грозового импульса в соответствии с требованием ГОСТа выдержали. 50%-ное разрядное напряжение коммутационного импульса положительной полярности изоляторов типа ЛК-70/110, ПК-70/110 находятся в пределах 462…539 кВ, изоляторов типа ПК-70/35 – 254…257 кВ. Выдерживаемое напряжение изоляторов типа ЛК-70/110, ПК-70/110 составляет 443…521 кВ, изоляторов ПК-70/35 – 248…250 кВ.

Испытания на трекинго-эрозионную стойкость все изоляторы выдержали. После 6 циклов воздействия напряжения и тумана следов эрозии не обнаружено. Изоляторы выдержали воздействие импульсов с крутым фронтом без повреждений.

Результаты испытаний полимерных изоляторов на разрыв, демонтированных в 1989 г., приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты испытаний полимерных изолятор на прочность при растяжении

Тип изолятора	Фактическая разрушающая механическая сила, кН	Характер повреждений
ЛК-70/110	114	Сползание оконцевателя
ЛК-70/110	126	Обрыв пестика
ЛК-70/110	135	«-»

Нормированная механическая нагрузка для изолятора составляет 70 кН. Все испытанные изоляторы удовлетворяют этому требованию.

Следует отметить, что проходящие испытания на ВЛ полимерные изоляторы, установленные на портальных деревянных опорах, снижают габариты ВЛ относительно земли. Поэтому с 1987 г. на ВЛ 110 кВ установлены 20 шт. специально изготовленных укороченных полимерных изоляторов марки ПК-70/110 ППУ.

В заключение, по независимым от нас причин дальнейшие натурные испытания были приостановлены более 25 лет. Как раз заканчиваются заводские сроки эксплуатации установленных полимерных изоляторов. И поэтому в данный момент проверка долговечности, электрических и механических параметров полимерных изоляторов в условиях экстремального климата Севера имеет огромную актуальность.

Список литературы

1. Аргунов Л.И. Исследование поведения высоковольтной линейной изоляции в Якутии //НТП и физико-технические проблемы Севера. Якутск, 1972. С.31-42.
2. Аргунов Л.И. Линии электропередачи в Якутии. Якутск, 1976. 184 с.
3. Кобылин В.П. Повышение эксплуатационной надежности электросетевого хозяйства на Севере / В.П. Кобылин. – Новосибирск: Наука, 2006. 223 с.
4. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутск: 1973. 120 с.
5. Гутман И.Ю., Соломоник Е.А., Тиходеев Н.Н. Полимерные изоляторы для воздушных линий электропередачи.//Энергетическое хозяйство за рубежом. 1982. №4. С.21-25.
6. *Дордин Ю.*Р., Платонов Н.Н. и др. Высоковольтные изоляторы из полимерных материалов для ЛЭП в условиях Севера. Якутск: Материалы и конструкции для техники Севера. 1984. С.64-71.
7. *Дордин Ю.Р., Платонов Н.Н. и др.* Линейные высоковольтные изоляторы из полимеров в условиях Севера // Modelling of environmental effects on electrical equipment. 8-th International Symposium, CSSR. 1987. P.434-442.
8. *Дордин Ю.Р., Платонов Н.Н.* и др. Результаты испытаний линейных полимерных изоляторов в климатических условиях Центральной Якутии // Направления развития и совершенствования ТЭК районов Азиатского Севера. Якутск, 1990. С.107-113.
9. Многолетний опыт эксплуатации подвесной полимерной изоляции в условиях Якутии //Труды I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Часть IV. Якутск, 2002. Кобылин В.П., Седалищев В.А., Платонов Н.Н.
10. Кобылин В.П., Седалищев В.А., Платонов Н.Н., Ли-Фир-Су Р.П. Способы повышения эксплуатационной надежности элементов ВЛ и подстанций. В сб. межрегион. научно-техни-го семинара «Энергетика Северо-Востока: состояние, проблемы и перспективы развития». Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2005. С.210-220.
11. Кобылин В.П., Седалищев В.А., Ли-Фир-Су Р.П. и др. Повышение качества электроснабжения в экстремальных условиях Севера /В.П. Кобылин, В.А. Седалищев, Р.П. Ли-Фир-Су и др. Якутск: Компания Дани Алмас, 2010. 160 с. (по проекту № 10-08-07025-д РФФИ).
12. Методические указания по определению трекинго-эрозионной стойкости полимерных изолирующих конструкций наружной установки. Новосибирск, 1980. 20 с.
13. Указания по проведению эксплуатационных испытаний опытно-промышленных партий подвесных полимерных изоляторов. Новосибирск, 1985. 26 с.

УДК 543.087.9
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-440-443

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОТОРНЫХ МАСЕЛ ИК-СПЕКТРОСКОПИЕЙ И МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Макарова Л.К.
Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: lidamak2016@mail.ru

Аннотация. *В работе рассматривается использование методов машинного обучения для классификации и выявления аномалий на инфракрасных спектрах моторного масла Motul. Проведен анализ актуальности проблемы автоматизации контроля качества смазочных материалов. В исследовании применены алгоритмы анализа главных компонент, опорных векторов и ансамблевых моделей. Полученные результаты демонстрируют высокую точность распознавания составов масел и эффективное выявление отклоняющихся образцов. Научная новизна состоит в интеграции современных машинных методов для обработки спектральных данных, что способствует развитию автоматизированных систем контроля качества моторных масел.*

Ключевые Слова: *моторное масло, ИК-спектроскопия, методы машинного обучения, нейронные сети, метод опорных векторов, метод К-ближайших соседей*

IDENTIFICATION OF MOTOR OILS BY INFRARED SPECTROSCOPY AND MACHINE LEARNING METHODS

Makarova L.K.
Northeast Federal University named after M.K. Ammosov

Abstract. *This work examines the use of machine learning methods for the classification and anomaly detection of Motul motor oil using infrared spectra. The study analyzes the relevance of automating the quality control process for lubricants. Principal component analysis, support vector machines, and ensemble models were applied. The results demonstrate high accuracy in the identification of oil compositions and effective detection of anomalous samples. The scientific novelty of this work is in the integration of advanced machine learning techniques for spectral data processing, which contributes to the development of automated systems for motor oil quality control*

Keywords: *motor oil, infrared spectroscopy, machine learning methods, neural networks, support vector machine, k-nearest neighbors method.*

Машинное обучение широко используется в инфракрасной (ИК) спектроскопии для повышения точности и эффективности анализа спектральных данных. В частности, методы машинного обучения применяются для предсказания ИК-спектров молекул, классификации и распознавания структурных фрагментов, а также для интерпретации сложных спектров, что традиционными методами бывает сложно.

К популярным алгоритмам относятся деревья решений, нейронные сети глубокого обучения, методы понижения размерности (PCA) и методы разложения спектров (MCR, ALS), которые обеспечивают уменьшение шума, выделение значимых компонент и построение описательных моделей. Это также способствует ускорению анализа больших объемов спектроскопических данных и внедрению автоматизации в исследовательские и производственные процессы.

В ИК-спектроскопических исследованиях нефтепродуктов основной проблемой является недостаток спектральных баз данных, а также скудность информации о взаимосвязях спектральных данных с физико-химическими параметрами. Для малых наборов данных ИК-спектров нефтепродуктов лучше подходят алгоритмы машинного обучения, способные эффективно работать при ограниченном объеме обучающих примеров, обладающие устойчивостью к переобучению и хорошей интерпретируемостью, такие как метод опорных векторов (SVM), метод частичных наименьших квадратов (PLS), метод случайного леса (Random Forest) и метод К-ближайших соседей (KNN).

Так, например, метод опорных векторов хорошо справляется с малыми по размеру и высокоразмерными данными, обеспечивает высокую точность классификации и регрессии, имея при этом невысокие требования к размеру выборки. Метод PLS традиционный и популярный для анализа спектров,

эффективно справляется с коррелированными и многомерными данными, подходит для регрессии при малом объеме выборки. Метод случайного леса имеет встроенный механизм борьбы с переобучением, устойчив к шуму и неполноте данных, хорошо работает на небольших наборах, при этом обеспечивает интерпретируемость. К-ближайших соседей простой ненаправленный метод классификации, эффективен при небольших объемах, но чувствителен к шуму и выбору метрики.

Простые сверточные нейронные сети (например, с одним-двумя скрытыми слоями) при использовании регуляризации и аугментации данных могут применяться при наличии средних по объему выборок, но требуют осторожности из-за риска переобучения.

Важным элементом успешного применения методом машинного обучения является чистота данных, которая заключается в качественной предварительной обработке данных: нормализации и стандартизации, устранении шумов, выделении ключевых признаков и использования методов понижения размерности (например, PCA). Часто эффективная работа с малыми наборами достигается с помощью комбинации методов, например, PLS для снижения размерности с последующей классификацией SVM или случайным лесом.

Таким образом, для малых наборов ИК-спектров нефти предпочтительны методы SVM, KNN и случайные леса благодаря их надежности, эффективности и возможности работать с ограниченными данными, которые было принято использовать в данной работе.

Целью работы являлось использование моделей машинного обучения для классификации и выявления аномалий на ИК-спектрах моторного масла марки Motul.

Задачами являлись:

1. Получение ИК-спектров исходного моторного масла и создание рабочей выборки для обучения моделей классификации;

2. Обучение моделей опорных векторов, К-ближайших соседей, случайного леса;

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлось полиальфаолефиновое гидрокрекинговое синтетическое моторное масло марки Moly Green 5w30 (VHVI Group III + PAO), которое отличается низкой рабочей вязкостью (60,26 мм^2/с при 40°C, 10,25 мм^2/с при 100°C).

ИК-спектры исходного масла регистрировали на приборе iRed 7800 u-L (SILab, Россия) в кюветах из KBr толщиной пропускающего слоя 50 мкм в режиме пропускания со следующими параметрами съемки: количество сканов – 20, разрешение – 4 см$^{-1}$, диапазон волновых чисел 400-4400 см$^{-1}$, аподизация спектров выполнялась с помощью алгоритма Happ-Henzel.

База спектральных данных состояла из 70 спектров исходных и отработанных масел, каждый из которых содержал значения пропускания по 25 наиболее интенсивным значениям волновых чисел, и таким образом полная матрица содержала 1750 параметров.

Для выявления аномалий был использован метод опорных векторов (SVM). Для обучения использовали данные из 45 спектров, для валидации оставшиеся 25 спектров (разделение выборки 65/35).

Результаты и обсуждение. Были получены ИК-спектры, на которых наблюдаются типичные пики поглощения базовой основы и присадок (рис. 1). В отработанном масле также появляются дополнительные пики обусловленные нагаром (1630, 1516, 1275, 1009, 602 см$^{-1}$), возрастают интенсивности карбонильных и карбоксильных-групп (1710, 1600 см$^{-1}$) за счет увеличения окисленных компонентов.

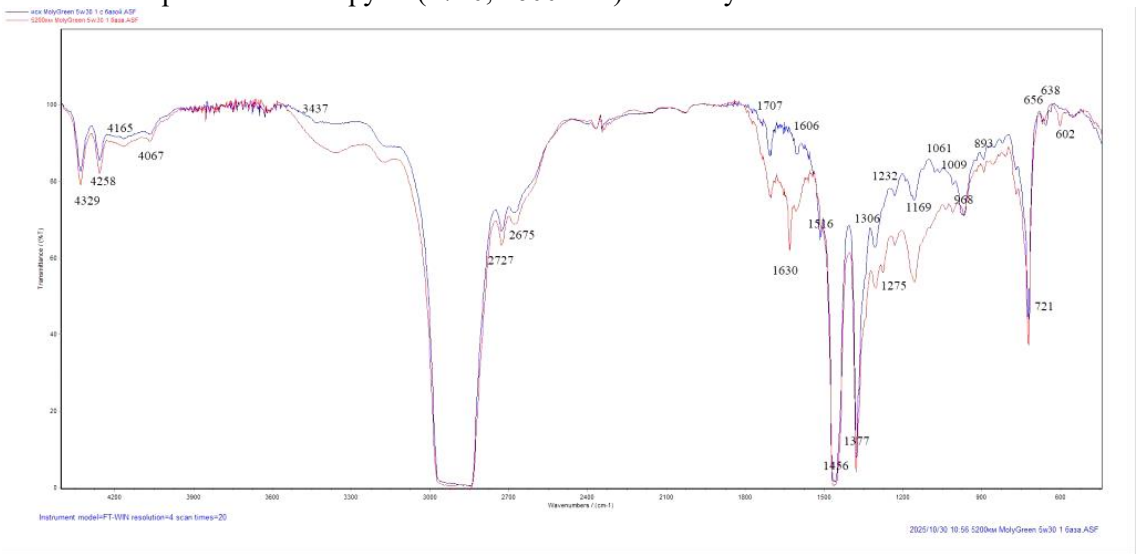
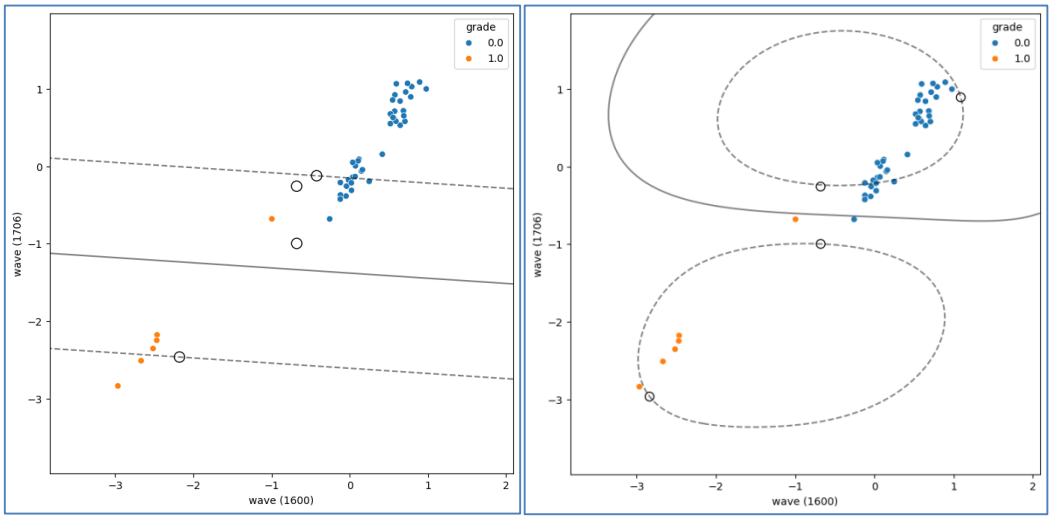


Рис. 1. ИК-спектры исходного (синий) и отработанного (красный) масла

При обучении модели опорных векторов был проведен поиск оптимальных гиперпараметров: C – параметра регуляризации, kernel – типа функции ядра и gamma – параметр ядра с помощью функции GridSearchCV из библиотеки sklearn.

В ходе обучения модели опорных векторов с оптимизированными гиперпараметрами были получены следующие границы решений (рис. 2), на которых видно, что наиболее удачно справилась с задачей классификации модель с rbf-ядром.

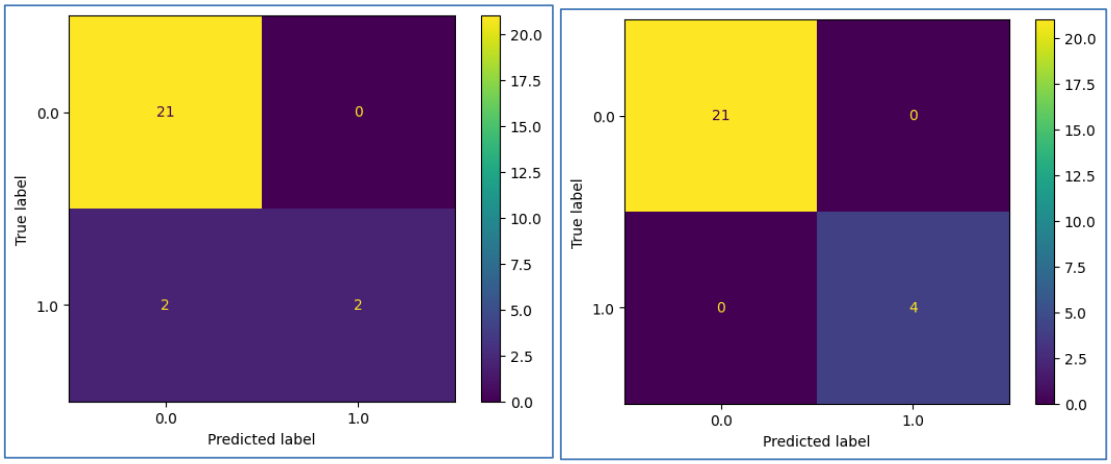


а) б)

Рис. 2. Границы решений при обучении в моделях опорных векторов с параметрами: а) kernel = 'linear', C = 1, gamma = 0.001), б) , kernel = 'rbf', C = 5.644, gamma = 0.334

Видно, что классификатор с линейной функцией ядра при найденных значениях параметра регуляризации C = 1 и параметра ядра gamma = 0.001 не допускает ошибочных решений по классу 0, а по классу 1 – 2 ошибки из 6.

После валидации были получены следующие матрицы спутанности моделей (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. Матрицы спутанности: а) модели с линейной функцией ядра, б) с rbf-функцией ядра

А также получены следующие метрики качества (табл.1).

Таблица 1. Метрики качества обученных моделей SVM

Функция ядра	Показатель			
	Accuracy	Recall	Precision	F1-score
Линейная	0,92	0,50	1,00	0,67
rbf	1,00	1,00	1,00	1,00

Видно, что модель с rbf-ядром имеет абсолютные метрики качества, а линейная модель, по-видимому, практически не обучается и выявляет аномалии 50/50, что похоже на то, что модель просто классифицирует наугад.

Заключение. Таким образом, были обучены модели классификации для выявления аномальных образцов моторного масла Moly Green 5w30, которыми могут выступать как фальсификаты, так и отработанные моторные масла данной марки. Лучшую метрику качества показала модель с rbf-ядром.

Список литературы

1. Асадуллаев Р.Г., Ситникова М.А., Слетов А.А., Малых С.Б., Ситников А.В. Обзор методов искусственного интеллекта, применяемых в анализе данных функциональной спектроскопии в ближнем инфракрасном диапазоне // Российский психологический журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-iskusstvennogo-intellekta-primenyaemyh-v-analize-dannyh-funktsionalnoy-spektroskopii-v-blizhnem-infrakrasnom
2. Бабаханова Х. А., Садриддинов А. А., Абдуназаров М. М., Бабаханова М. А., Громыко И. Г. Применение методов инфракрасной спектроскопии в исследовании составов для проклейки бумаги // Научно-Технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022, Т.22. № 6. С.1048-1054
3. Гринчук О.В. Методы определения подлинности изображений лиц. Диссертация. кандидата технических наук: 05.13.17. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.frccsc.ru/sites/default/files/docs/ds/002-073-05/diss/30-grinchuk/ds05-30-grinchuk_main.pdf?787
4. Костин М.А. ЯМР И ИК спектральная диагностика водородных связей с участием группы P=O. Диссертация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://disser.spbu.ru/files/2024/disser_kostin_mikhail.pdf
5. Лаптинский К.А., Буриков С.А., Сарманова О.Э., Вервальд А.М., Утегенова Л.С., Пластинин И.В., Доленко Т.А. Диагностика вредных примесей в водных средах с помощью спектроскопических методов и алгоритмов машинного обучения, [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/getFT.phtml?jrnid=os&paperid=1380&what=fullt&option_lang=rus
6. Система грантов Российского научного фонда. Установление закономерностей колебательных спектров цеолитов с использованием квантово-химического моделирования и методов машинного обучения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rscf.ru/prjcard_int?22-23-01007
7. Филиппов В.Г., Михайлов Я.А., Елышев А.В. Машинное обучение и анализ больших данных в области катализа. // Кинетика и катализ, 2023. Т.64. №2. С.139-152
8. Черкасова Е.А., Куренкова Д.Х., Егорова А.В., Мажукина О.А., Егорова А.Ю. Применение методов машинного обучения при изучении ИК-спектров в образовательном процессе. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://old.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2025/01/15/cherkasova_e.a._kurenkova_d.h._egorova_a.v._mazhukina_o.a._egorova_a.yu_.pdf
9. Шаров В.А. Оптические и электронные явления в нитевидных нанокристаллах AIIIB V при механической деформации. Диссертация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ioffe.ru/serve/theses/content/Thes_0576content.pdf
10. Beglaryan B.G. Toward Accurate PAH IR Spectra Prediction: Handling Charge Effects with Classical and Deep Learning Models / B.G. Beglaryan, A. S. Zakuskin, V. A. Nemchenko, T. A. Labutin //Journal of Chemical Information and Modeling. 2025, vol. 65, no.10, pp. 4854-4865. DOI:10.1021/acs.jcim.5c00372

УДК 621.311.243
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-444-447

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ВЕРТИКАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Местников Н.П.[1,2,3], Манусов В.З.[4], Хоютанов А.М.[2], Давыдов Г.И.[2]
[1]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова
[2]Якутский научный центр СО РАН
[3]Якутский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта
[4]Югорский государственный университет
E-mail: sakhacase@bk.ru

Аннотация. *Статья посвящена исследованию возможности применения вертикально-пространственного расположения фотоэлектрических модулей солнечных электростанций на территории Якутии. Исследования проведены путем выполнения имитационных вычислений на базе цифровой платформы «Global Solar Atlas» и сопоставления различных комбинаций размещения секций модулей по системе «Восток/Юг/Запад». По итогам проведенных исследований установлено, что при комбинации 17/70/15% и 10/80/10% с применением плоских отражательных систем выработка электроэнергии от солнечной электростанции превышает среднегодовую выработку от станции с линейным размещением.*

Ключевые слова: *вертикально-пространственное положение, фотоэлектрический модуль, солнечная электростанция, плоские отражательные системы, Якутия.*

INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF THE VERTICAL SPATIAL POSITION OF PV-MODULES OF PV-POWER PLANTS IN YAKUTIA

Mestnikov N.P.[1,2,3], Manusov V.Z.[4], Khoyutanov A.M.[2], Davydov G.I.[2]
[1]North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov
[2]Yakut Scientific Center SB RAS
[3]Yakut Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport
[4]Yugorsky State University

Abstract. *The article is devoted to the study of the possibility of using the vertical spatial arrangement of PV-modules of PV-power plants in Yakutia. The research was carried out by performing simulation calculations based on the Global Solar Atlas digital platform and comparing various combinations of module sections according to the East/South/West system. Based on the results of the conducted research, it was found that with a combination of 17/70/15% and 10/80/10% using flat reflective systems, the electricity generation from a PV-power plant exceeds the average annual output from a linear station.*

Keyword: *vertical spatial position, photovoltaic module, solar power plant, flat reflective systems, Yakutia.*

Гелиоэнергетика – это одна из главных направлений возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ), занимающаяся применением энергии Солнца для преобразования в тепловую или электрическую энергию (далее – э/э) в зависимости от вида используемого устройства [1–3]. К примеру, для получения э/э необходимо применение фотоэлектрических модулей (далее – ФЭМ), функционирующий на основе фотоэлектрического эффекта, а для генерации тепловой энергии используются солнечные коллекторы или концентраторы солнечной энергии, состоящие из отражательных систем, зеркал или линз Френеля, для нагрева теплоносителя [4, 5].

Представленная статья посвящена изучению применимости пространственно-вертикального размещения ФЭМ фото-солнечных электростанций (далее – ФСЭС). В текущий момент существуют несколько способов размещения модулей: BIPV – размещение ФЭМ на крышах или фасадах зданий в горизонтальном положении с несущими конструкциями; стационарное (наземное/линейное) размещение модулей на несущих конструкциях с возможностью изменения угла наклона относительно Земли;

вертикальный способ, сущность которого заключается размещении модулей в пространственно-вертикальном порядке с возможностью изменения угла наклона и ориентированием в восточную или западную сторону; системы автоматического/ручного ориентирования ФЭМ в сторону Солнца по нормали (далее – солнечный трекинг), что увеличивает среднесуточную выработку э/э на 17…40% при сравнении с линейным способом [5–7].

BIPV, стационарный, пространственно-вертикальный способ и солнечный трекинг активно применяются на северных территориях. Однако при BIPV-способе модули размещаются только на крыше или фасадах зданий, стационарный является классическим способом и требует значительных площадей земельного участка для размещения модулей, солнечный трекинг имеет крайне высокую капитальную стоимость (издержки увеличиваются на 150…200%) и не может эксплуатироваться при температуре воздуха ниже –40 ^{0}С [8].

Пространственно-вертикальный способ имеет значительные перспективы в виде следующих преимуществ: малые площади размещения; минимизация затенения близлежащего пространства; сглаживание суточного графика выработки э/э от ФСЭС, что положительно влияет на поддержание оптимальных рабочих свойств системы накопления э/э (далее – СНЭЭ); простота монтажа. Но существуют следующие недостатки: уменьшение суточной выработки; наличие вероятности образования «эффекта паруса» при резких порывах ветра, что требует применение специализированных креплений с последующим увеличением издержек.

Учитывая текущую степень проработанности данного направления гелиоэнергетической отрасли, остается открытым вопрос определения оптимальной комбинации пространственно-вертикального размещения ФЭМ ФСЭС на северных территориях.

Пространственно-вертикальное размещение ФЭМ ФСЭС выполняется путем разделения на секции в виде процентов по количеству с ориентированием по системам «Восток/Запад» и «Восток/Юг/Запад». В текущий момент выполнено разделение секций модулей по следующим комбинациям – 50/50%, 40/20/40%, 30/40/30%, 25/50/25%, 15/70/15% и 10/80/10%

Установленная мощность рассматриваемого объекта подобрана, исходя из соображения того, что на северных регионах России активно эксплуатируются ФСЭС микро- и малой мощности (до 100 кВт) для электроснабжения изолированных и отдаленных населенных пунктов при синхронизации с дизельной электростанцией (далее – ДЭС). В качестве локации имитируемой ФСЭС выбран населенный пункт Хонуу на севере Якутии, входящий в арктическую зону России.

По результатам проведенных имитационных вычислений на базе цифровой платформы «Global Solar Atlas» на рисунке 1 построен график среднегодовой выработки э/э от ФСЭС с различными вариантами вертикального размещения модулей.

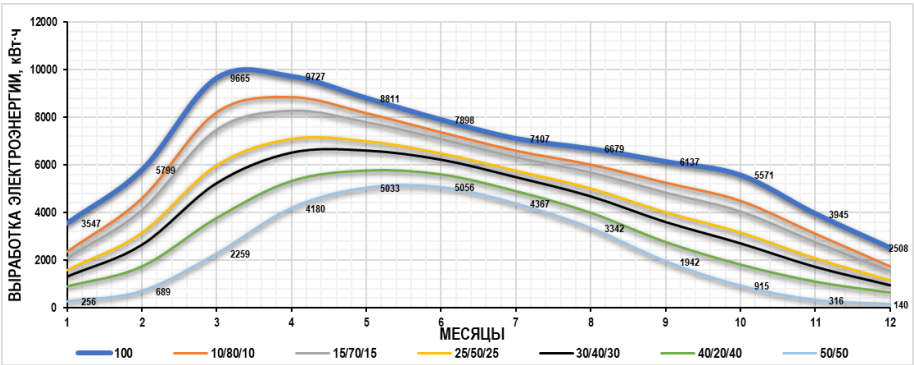


Рис. 1. Среднегодовой график выработки электроэнергии от фото-солнечной электростанции с вертикальным размещения модулей

Анализ вышеуказанного графика показал, что при линейном размещении ФЭМ среднемесячная выработка э/э от ФСЭС больше на 13,7…63,2%, чем все предложенные варианты вертикального размещения модулей в течение всего года. Результаты данного анализа представлены в табл. 1. В связи с этим предложено комплексное применение пространственно-вертикального размещения ФЭМ с плоскими отражательными системами (далее – ПОС). На рисунке 2 представлен график среднегодовой выработки э/э от ФСЭС с различными вариантами комплексного применения вертикального размещения ФЭМ и ПОС.

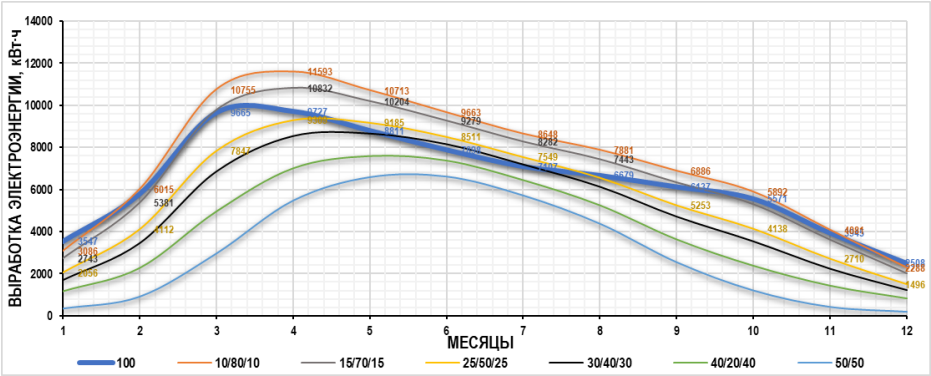
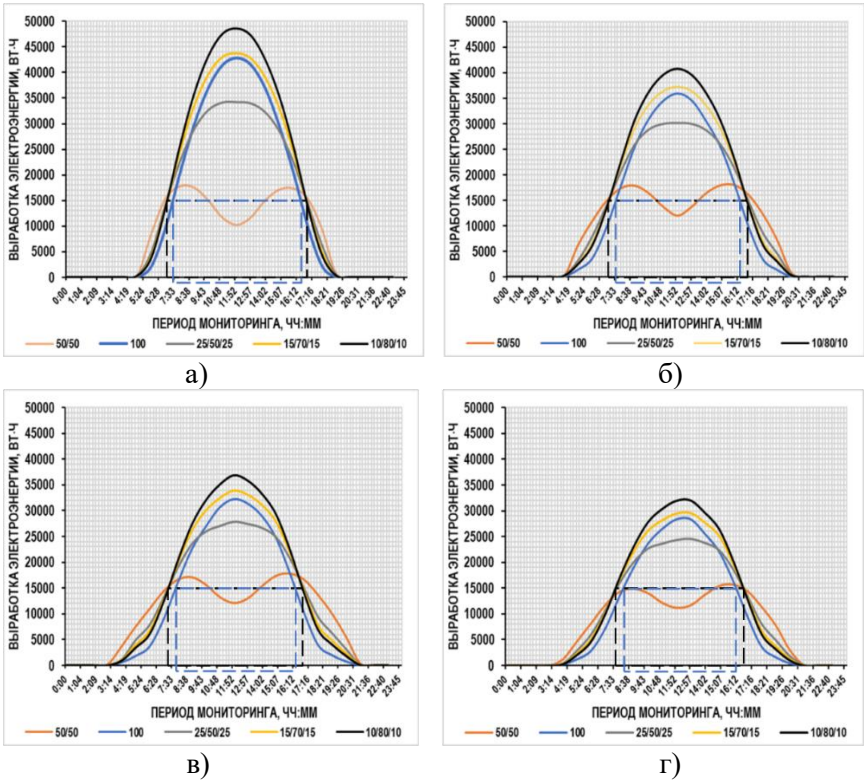


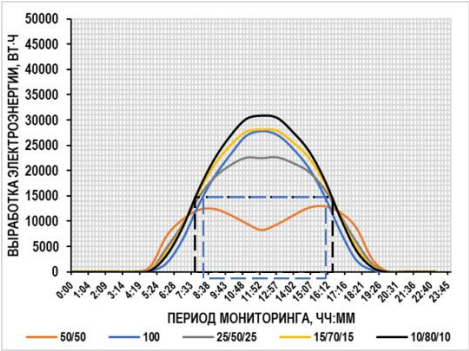
Рис. 2. Среднегодовой график выработки электроэнергии от фото–солнечной электростанции с вертикальным размещения и отражателями

Анализ вышеуказанного графика показал, что в период максимальной производительности объектов гелиоэнергетики и минимизации эксплуатирования ДЭС в течение апреля…августа среднемесячная выработка э/э от рассматриваемой ФСЭС увеличивается на 2,2…20,6% от трех исследуемых вариантов (25/50/25% 15/70/15% и 10/80/10%) при сравнении с линейным размещением. Затем среднегодовая выработка э/э от ФСЭС при условии комплексной реализации только двух вариантов (15/70/15% и 10/80/10%) увеличивается на 5…13% при сравнении с линейным размещением.

На рисунке 3 представлены среднесуточные графики выработки э/э от ФСЭС с вертикальным размещением ФЭМ по трем вариантам (10/80/10%, 15/70/15% и 25/50/25%) в течение апреля…августа.

Анализ приведенных графиков показал, что в течение суток при условии применения ПЭС выработка э/э от ФСЭС с вертикальным размещением модулей в значительной мере превышает выработку при линейном размещении. Пунктирными линиями указано, что период процедуры гарантированного заряда СНЭЭ, состоящая из АКБ, при вертикальном размещении ФЭМ (10/80/10% и 15/70/15%) увеличивается на 0,3 час/сутки в апреле, на 0,4 час/сутки в мае, на 0,45 час/сутки в июне, на 0,6 час/сутки в июле и 0,4 час/сутки в августе. В данном периоде поддерживается постоянное значение накапливаемой мощности – 105…120 кВт·ч в течение 7…8 часов в сутки, что хватит для гарантированного заряда для СНЭЭ, состоящей из 63…72 АКБ единичной емкостью по 200 А·ч при максимальном – 90% и минимальном заряде – 20%. Достигнутый результат обеспечивает функционирование СНЭЭ для электропитания малого села в течение ночного периода.





д)

Рис. 3. Среднегодовой график выработки электроэнергии от фото–солнечной электростанции с вертикальным размещения и отражателями: а) апрель; б) май; в) июнь; г) июль; д) август

Заключение. Доказана применимость ключевых комбинаций пространственно-вертикального размещения ФЭМ ФСЭС с отражательными системами в комплексе на северных территориях России, которые ориентированы по трем направлениям: восток, юг и запад.

Выполнены имитационные вычисления на базе цифровой платформы «Global Solar Atlas», где в качестве имитируемого объекта выбрана ФСЭС микро- мощности в с. Хонуу на севере Якутии, входящий в арктическую зону России. Имитационные вычисления направлены для расчета среднемесячной и среднегодовой выработки э/э.

По итогам проведенных вычислений установлено, что производительность ФСЭС в случае применения всех комбинаций пространственно-вертикального размещения уступают в случае линейного размещения ФЭМ.

В случае комплексного применения плоских отражательных систем и пространственно-вертикального размещения модулей производительность ФСЭС выше, чем при линейном размещении. К примеру, среднегодовая выработка э/э от ФСЭС с отражательными системами и вертикальном размещении с комбинациями 10/80/10% и 15/70/15% выше на 5…13%, чем при линейном размещении.

Необходимо отметить, что при комбинациях 25/50/25%, 15/70/15% и 10/80/10% для ФСЭС с отражательными системами выработка э/э увеличивается на 2,2%, 14,4% и 20,6% соответственно в течение апреля…августа.

Период гарантированного заряда системы накопления энергии при вертикальном размещении с отражателями для ФЭМ (10/80/10% и 15/70/15%) увеличивается на 0,3…0,6 час/сутки в течение апреля…августа.

Представленная работа произведена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRG-2025-0009 и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0031 по приоритетному направлению ПФНИ в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) 2.5.1 – Энергетика и рациональное природопользование.

Список литературы

1. Попель О.С. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в централизованной и автономной энергетике / О.С. Попель, Б.Ф. Реутов, А.П. Антропов // Теплоэнергетика. 2010. №11. С.2-11.
2. Попель О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике / О.С. Попель // Российский химический журнал. 2008. Т.52, №6. С.95-106.
3. Местников Н.П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера: Монография / Н.П. Местников. Ч.1. Якутск: ООО РИЦ «Офсет». СВФУ им. М.К. Аммосова «Офсет», 2021. 113 с. ISBN 978-5-91441-336-8.
4. Местников Н.П. Способы повышения энергоэффективности фото-солнечных электростанций в условиях Севера / Н.П. Местников. Якутск: СВФУ им. М.К. Аммосова, 2024. 150 с. ISBN 978-5-7513-3777-3.
5. Попель О.С. Разработка технологий создания высокоэффективных кремниевых фотоэлектрических модулей и сооружения солнечных электростанций / О.С. Попель, Е. Сергеева // Региональная энергетика и энергосбережение. 2018. №3. С.18-20.
6. Дебрин А.С. Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, В.Н. Урсегов // Вестник КрасГАУ. 2018. №6(141). С.136-141.
7. Казаков Ю.Н. Усовершенствование технологии монтажа солнечных панелей на крышах зданий методом автоматического соединения их фиксаторов с пазами каркаса и устройства ребер / Ю.Н. Казаков, О.А. Тимощук, К.С. Попова // Вестник гражданских инженеров. 2020. №5(82). С.123-129.
8. Местников Н.П. Исследование особенностей функционирования фотоэлектрической установки в условиях экстремально низких температур / Н.П. Местников, А.М. Альзаккар // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2023. Т.8, №1(31). С.97-103.

УДК 621.311.243
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-448-451

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОДНОСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Местников Н.П.[1,2,3], *Манусов В.З.*[4]
[1]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова
[2]Якутский научный центр СО РАН
[3]Якутский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта
[4]Югорский государственный университет
E-mail: sakhacase@bk.ru

Аннотация. *Статья посвящена исследованию особенностей эксплуатации плоских отражательных систем для односторонних фотоэлектрических модулей солнечных электростанций. Проведенные натурные исследования показали, что после применения плоских отражательных систем среднесуточная выработка электроэнергии от фотоэлектрических модулей увеличивается на 26…27%, но с повышением среднесуточной температуры поверхности модулей с +40,7 ^{0}C до +43,7 ^{0}C. Результаты исследований могут быть применены в качестве одного из технических мероприятий для повышения энергоэффективности не только солнечных электростанций, но и для систем солнечного теплоснабжения.*

Ключевые слова: *плоские отражательные системы, фотоэлектрический модуль, солнечная электростанция, температура, выработка электроэнергии.*

INVESTIGATION OF THE APPLICATION FEATURES OF FLAT REFLECTIVE SYSTEMS FOR SINGLE-SIDED PHOTOVOLTAIC MODULES OF SOLAR POWER PLANTS

Mestnikov N.P.[1,2,3], *Manusov V.Z.*[4]
[1]North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov
[2]Yakut Scientific Center SB RAS
[3]Yakut Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport
[4]Yugorsky State University

Abstract. *The article is devoted to the study of the operation features of flat reflective systems for single-sided PV-modules of PV-power plants. Field studies have shown that after the use of flat reflective systems, the average daily power generation from PV-modules increases by 26...27%, but with an increase in the average daily surface temperature of the PV-modules from +40.7 ^{0}C to +43.7 ^{0}C. The research results can be applied as one of the technical measures to increase energy efficiency not only for PV-power plants, but also for solar heat supply systems.*

Keyword: *vertical spatial position, PV-module, PV-power plant, flat reflective systems, Yakutia.*

Известно, что в рамках повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей (далее – ФЭМ) возможно применение различных средств и способов, одним из которых являются плоские отражательные системы (далее – ПОС) энергии солнечного излучения. Плоские отражательные системы – это специализированные поверхности, используемые для направления и концентрации солнечного излучения на активные участки ФЭМ [1, 2]. Основное назначение ПО – увеличить кол–во попадающего солнечного излучения на поверхность ФЭМ, повышая энергоэффективность солнечных электростанций (далее – СЭС).

Преимущества плоских отражателей:

– увеличивается энергоэффективность СЭС за счет дополнительного количества солнечной инсоляции.

– простота конструкции и низкая стоимость изготовления делают ПО доступными для массового применения.

– возможность интеграции в существующие проекты в области гелиоэнергетики без значительных изменений технологического цикла функционирования СЭС.

Известно, что ключевым параметром способности материала отражать излучение – коэффициент теплового излучения с граничными значения в пределах – 0…1. Материалы с минимальным коэффициентом теплового излучения (e) характеризуются способностью отражать большую часть поступающего теплового излучения, снижая тем самым передачу тепла путём излучения.

Коэффициенты излучения (e) являются минимальными у металлизированного полиэтилентерефталата (0,02) алюминиевой фольги (0,04), олова неокисленного (0,04), полируемой меди (0,02) и полированного хрома (0,08). Однако металлизированный полиэтилентерефталат и алюминиевая фольга имеют малую прочность, что является недостатком при монтаже ПО. При увеличении толщины вышесказанных материалов данный недостаток устраняется. Кроме того, металлизированный полиэтилентерефталат и металлизированная алюминиевая фольга имеются в широком доступе с малой капитальной стоимостью – 188,88 руб./м^2 и 60 руб./м^2 соответственно. А неокисленное олово, полируемая медь, полированный хрома имеют высокую стоимость с малой доступностью при крайне малой толщине.

Рекомендовано применение металлизированной алюминиевой фольги для создание стандартных ПОС, размеры отражателя должны соответствовать фактическим размерам ФЭМ, чтобы отраженное солнечное излучения доходила вдоль всей поверхности модуля.

На рисунке 1 представлена структурная схема размещения ФЭМ с ПОС.

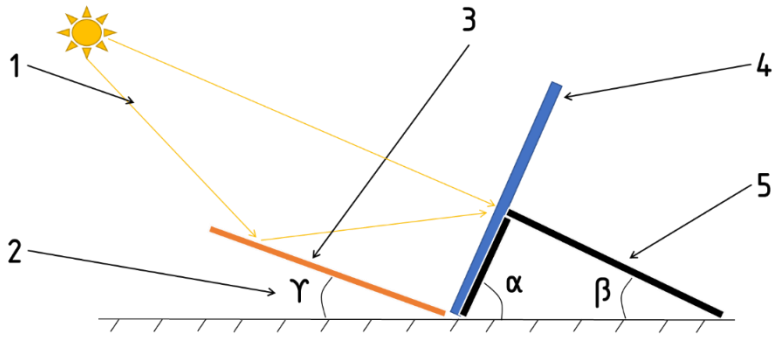


Рис. 1. Схема размещения фотоэлектрического модуля с отражательной системой:
где 1 – направление солнечного излучения; 2 – угол наклона плоского отражателя;
3 – плоский отражатель; 4 – фотоэлектрический модуль; 5 – несущая конструкция

На вышеуказанном рисунке видно, что ПОС размещается перед односторонней ФЭМ, поддерживаемой несущей конструкцией. Однако отражатель не может быть размещения просто на земной поверхности, т.к. отраженное излучение не в полном мере попадет на поверхность модуля. В связи с этим угол размещения ПО в значительной мере зависит от высоты Солнца в зените и угла наклона ФЭМ относительно Земли.

На рисунке 2. представлены внешние виды исследуемых ФЭМ в рамках выполнения натурных исследования с использованием ПОС.

а) б) в)

Рис. 2. Внешние виды фотоэлектрических модулей с отражателями:
а) вид слева; б) по центру; в) вид справа

На рисунке 3 представлены графики зависимости КПД, генерирующей мощности ФЭМ, электрических потерь и температуры поверхности модуля от солнечной инсоляции соответственно.

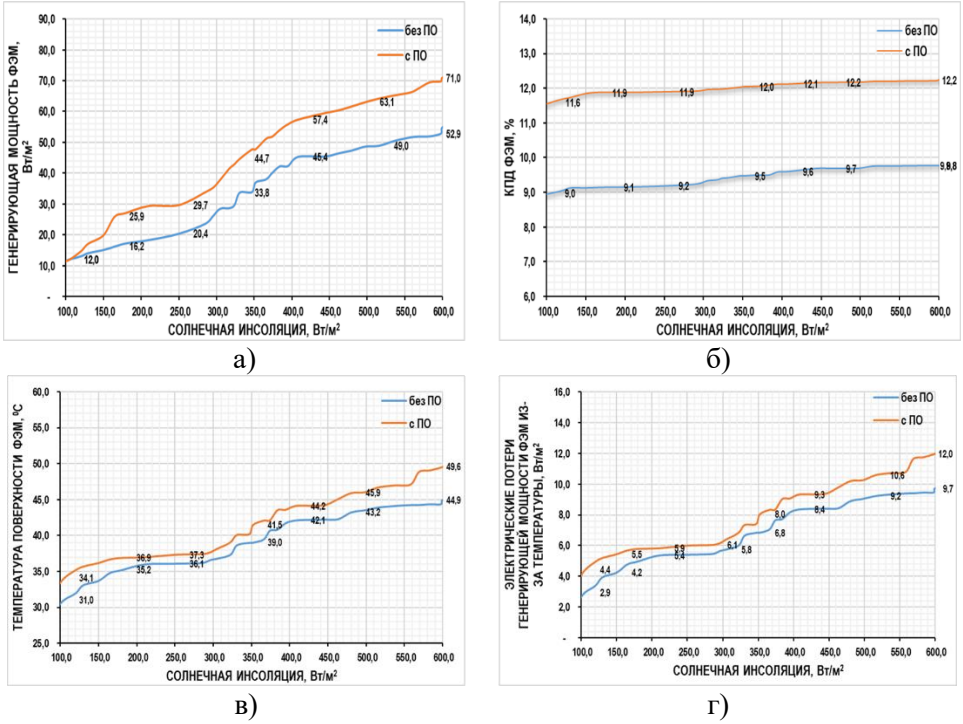


Рис. 3. Графики зависимости параметров функционирования фотоэлектрических модулей с плоскими отражателями от солнечной инсоляции: а) генерирующая мощность; б) КПД модуля; в) поверхностная температура модуля; г) электрические потери модуля из–за температуры

Анализ графика зависимости выработки э/э от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная генерирующая мощность ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 53,85 Вт/м^2, а мощность модулей без отражателей – 41,98 Вт/м^2. Следовательно, выработка э/э от ФСЭС после применения ПО увеличилась на 28,27% [3, 4].

Анализ графика зависимости КПД ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднестатистический КПД ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составил 12,28%, а КПД модулей без отражателей – 9,70%. Следовательно, КПД ФЭМ ФСЭС после применения ПО увеличилась на 2,58% по фактическим показателям.

Анализ графика зависимости поверхностной температуры ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная температура поверхности ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 43,7 ^{0}С, а без отражателей – 40,7 ^{0}С (меньше на 3 ^{0}С). Следовательно, поверхностная температура ФЭМ после применения ПО увеличилась на 7,37% с возможным последующим повышением электрических потерь о причине избыточного нагревания модулей от отражателей [281, 282].

Анализ графика зависимости электрических потерь ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточные электрические потери ФЭМ с отражателями по причине избыточного нагревания поверхности модуля составила 10,0 Вт/м^2. В случае отсутствия ПО электрические потери модулей при аналогичных климатических условиях составила 8,5 Вт/м^2. В связи с этим электрические потери ФЭМ после применения ПО увеличились на 17,81% по причине избыточного нагрева модулей.

Заключение. По результатам проведенных натурных исследований установлено, что после применения плоских отражательных систем для фотоэлектрических модулей увеличивается доля отраженной энергии солнечного излучения на переднюю поверхность односторонней модули посредством применения плоских отражателей. С помощью данного способа выработка электроэнергии от фото–солнечной электростанции с плоскими отражателями увеличивается на 26…28% в течение всего года, но увеличивается поверхностная температура модуля на 7,37% с последующим увеличением электрических потерь вырабатываемой мощности.

Представленная работа произведена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRG-2025-0009 и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0031 по приоритетному направлению ПФНИ в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) 2.5.1 – Энергетика и рациональное природопользование.

Список литературы

1. Кувшинов В. В., Гусева Е. В., Ивантеев И. С. Повышение энергетических характеристик фотоэлектрических модулей за счет отраженного излучения // Естественные и технические науки. 2021. №5(156). С.216-218.
2. Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. / Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии // Строительство и техногенная безопасность // Симферополь: КФУ им. Вернадского, 2019. №15(67). С.141-149.
3. Местников, Н. П. Исследование применимости плоских отражателей для фотоэлектрических станций в условиях северных регионов России / Н. П. Местников, В. З. Манусов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2024. Т.9. №2(36). С.112-119. – DOI 10.25744/genb.2024.28.62.015.
4. Местников, Н. П. Исследование применимости атермальных материалов в плоских отражателях для фотоэлектрических станций / Н. П. Местников, В. З. Манусов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2024. Т.9, №3(37). С.109-116. DOI 10.25744/genb.2024.37.3.015.

УДК 621.311.243
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-452-455

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ДВУХСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Местников Н.П.[1,2,3], *Манусов В.З.*[4], *Реев В.Г.*[1,2]
[1]Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова
[2]Якутский научный центр СО РАН
[3]Якутский институт водного транспорта (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта
[4]Югорский государственный университет
E-mail: sakhacase@bk.ru

Аннотация. *Статья посвящена исследованию особенностей эксплуатации плоских отражательных систем для двухсторонних фотоэлектрических модулей солнечных электростанций. Проведенные натурные исследования показали, что после применения плоских отражательных систем среднесуточная выработка электроэнергии от двухсторонних модулей увеличивается на 36…37%, но с повышением среднесуточной температуры поверхности модулей с +33,2 ^{0}C до +34,8 ^{0}C. Результаты исследований могут быть применены в качестве одного из технических мероприятий для повышения энергоэффективности не только солнечных электростанций, но и для систем солнечного теплоснабжения.*

Ключевые слова: *плоские отражательные системы, двухсторонний фотоэлектрический модуль, солнечная электростанция, температура, выработка электроэнергии.*

INVESTIGATION OF THE APPLICATION FEATURES OF FLAT REFLECTIVE SYSTEMS FOR BIFACIAL PV-MODULES OF PV-POWER PLANTS

Mestnikov N.P.[1,2,3], *Manusov V.Z.*[4], *Reev V.G.*[1,2]
[1]North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov
[2]Yakut Scientific Center SB RAS
[3]Yakut Institute of Water Transport (branch) of the Siberian State University of Water Transport
[4]Yugorsky State University

Abstract. *The article is devoted to the study of the features of the operation of flat reflective systems for bifacial PV-modules of solar power plants. Field studies have shown that after the use of flat reflective systems, the average daily power generation from bifacial PV-modules increases by 36...37%, but with an increase in the average daily surface temperature of the PV-modules from +33.2 ^{0}C to +34.8 ^{0}C. The research results can be applied as one of the technical measures to increase energy efficiency not only for PV-power plants, but also for solar heat supply systems.*

Keyword: *vertical spatial position, bifacial PV-module, PV-power plant, flat reflective systems, Yakutia.*

Известно, что в рамках повышения энергоэффективности фотоэлектрических модулей (далее – ФЭМ) возможно применение различных средств и способов, одним из которых являются плоские отражательные системы (далее – ПОС) энергии солнечного излучения. Плоские отражательные системы – это специализированные поверхности, используемые для направления и концентрации солнечного излучения на активные участки ФЭМ [1, 2]. Основное назначение ПО – увеличить кол–во попадающего солнечного излучения на поверхность ФЭМ, повышая энергоэффективность солнечных электростанций (далее – СЭС).

Преимущества отражательных систем:

– увеличивается энергоэффективность СЭС за счет дополнительного количества солнечной инсоляции.

– простота конструкции и низкая стоимость изготовления делают ПОС доступными для массового применения.

– возможность интеграции в существующие проекты в области гелиоэнергетики без значительных изменений технологического цикла функционирования СЭС.

Известно, что ключевым параметром способности материала отражать излучение – коэффициент теплового излучения с граничными значения в пределах – 0…1. Материалы с минимальным коэффициентом теплового излучения (e) характеризуются способностью отражать большую часть поступающего теплового излучения, снижая тем самым передачу тепла путём излучения.

Коэффициенты излучения (e) являются минимальными у металлизированного полиэтилентерефталата (0,02) алюминиевой фольги (0,04), олова неокисленного (0,04), полируемой меди (0,02) и полированного хрома (0,08). Однако металлизированный полиэтилентерефталат и алюминиевая фольга имеют малую прочность, что является недостатком при монтаже ПО. При увеличении толщины вышесказанных материалов данный недостаток устраняется. Кроме того, металлизированный полиэтилентерефталат и металлизированная алюминиевая фольга имеются в широком доступе с малой капитальной стоимостью – 188,88 руб./м^2 и 60 руб./м^2 соответственно. А неокисленное олово, полируемая медь, полированный хрома имеют высокую стоимость с малой доступностью при крайне малой толщине.

Рекомендовано применение металлизированной алюминиевой фольги для создание стандартных ПОС, размеры отражателя должны соответствовать фактическим размерам двухсторонней ФЭМ, чтобы отраженное солнечное излучения доходила вдоль всей поверхности модуля, а также на тыльную и фронтальную сторону.

На рисунке 1 представлена структурная схема размещения двухсторонней ФЭМ с ПОС.

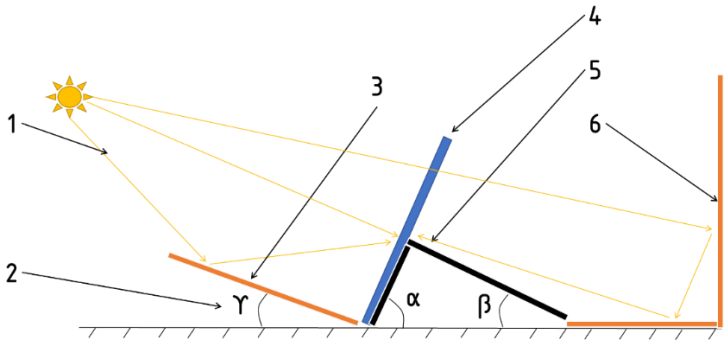


Рис. 1. Схема размещения двухстороннего фотоэлектрического модуля с отражательной системой: где 1 – направление солнечного излучения; 2 – угол наклона плоского отражателя; 3 – передний плоский отражатель; 4 – фотоэлектрический модуль; 5 – несущая конструкция; 6 – фронтальный плоский отражатель

На вышеуказанном рисунке видно, что ПОС размещается перед и сзади двухсторонней ФЭМ, поддерживаемой несущей конструкцией. Однако отражатель не может быть размещения просто на земной поверхности, т.к. отраженное излучение не в полном мере попадет на поверхность модуля. В связи с этим угол размещения ПОС в значительной мере зависит от высоты Солнца в зените и угла наклона ФЭМ относительно Земли.

На рисунках 2–3 представлены внешние виды исследуемых двухсторонних ФЭМ в рамках выполнения натурных исследования с использованием ПОС.

Рис. 2. Внешние виды двухсторонних фотоэлектрических модулей с отражательными системами

а) б)

Рис. 3. Внешние виды исследуемых модулей с отражательными системами:
а) монтаж фронтального отражателя; б) модуль с двумя отражателями

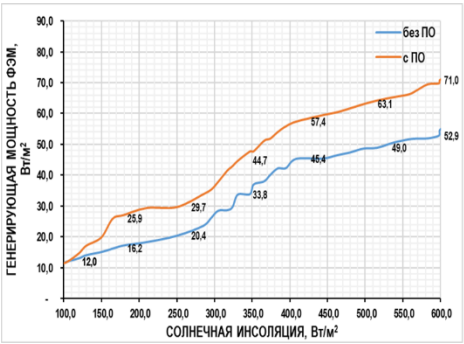
На рисунке 4 представлены графики зависимости КПД, генерирующей мощности двухсторонней ФЭМ, электрических потерь и температуры поверхности модуля от солнечной инсоляции соответственно [284, 285].

Анализ графика зависимости выработки э/э от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная генерирующая мощность двухстороннего ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 71,8 Вт/м^2, а мощность модулей без отражателей – 52,6 Вт/м^2. Следовательно, выработка э/э от ФСЭС после применения ПО увеличилась на 36,52%.

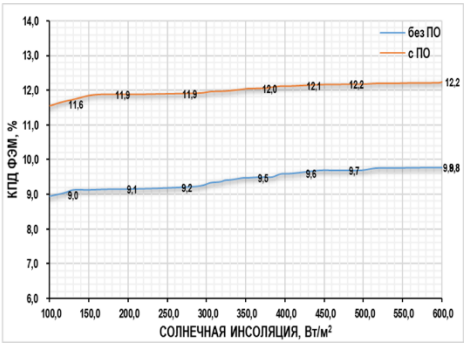
Анализ графика зависимости КПД двухстороннего ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднестатистический КПД двухстороннего ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составил 23,0%, а КПД модулей без отражателей – 16,8%. Следовательно, КПД ФЭМ ФСЭС после применения ПО увеличилась на 6,1% по фактическим показателям.

Анализ графика зависимости поверхностной температуры двухстороннего ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная температура поверхности двухстороннего ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 34,8 ^{0}С, а без отражателей – 33,2 ^{0}С (меньше на 1,6 ^{0}С). Следовательно, поверхностная температура двухстороннего ФЭМ после применения ПО увеличилась на 4,84% с возможным последующим повышением электрических потерь о причине избыточного нагревания модулей от отражателей [3,4].

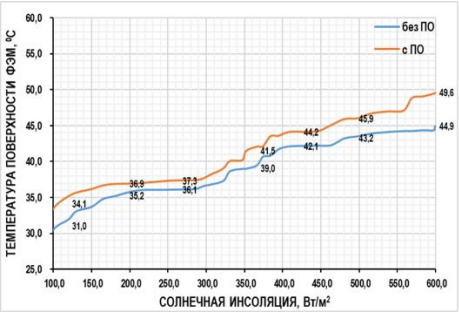
Анализ графика зависимости электрических потерь двухстороннего ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточные электрические потери модуля с отражателями по причине избыточного нагревания поверхности модуля составила 4,41% от среднесуточной генерирующей мощности. В случае отсутствия ПО электрические потери модулей при аналогичных климатических условиях составила 3,69%. В связи с этим электрические потери ФЭМ после применения ПО увеличились на 19,51% (+0,1951 о.е.) по причине избыточного нагрева модулей.



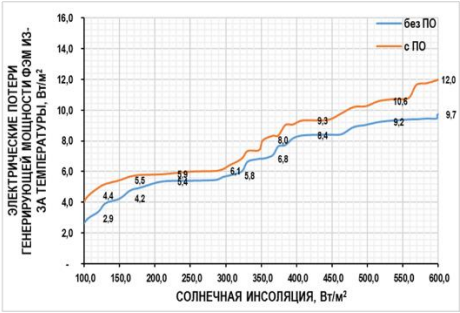
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Графики зависимости параметров функционирования фотоэлектрических модулей с плоскими отражателями от солнечной инсоляции: а) генерирующая мощность; б) КПД модуля; в) поверхностная температура модуля; г) электрические потери модуля из–за температуры

Анализ графика зависимости выработки э/э от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная генерирующая мощность ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 53,85 Вт/м^2, а мощность модулей без отражателей – 41,98 Вт/м^2. Следовательно, выработка э/э от ФСЭС после применения ПО увеличилась на 28,27% [3, 4].

Анализ графика зависимости КПД ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднестатистический КПД ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составил 12,28%, а КПД модулей без отражателей – 9,70%. Следовательно, КПД ФЭМ ФСЭС после применения ПО увеличилась на 2,58% по фактическим показателям.

Анализ графика зависимости поверхностной температуры ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточная температура поверхности ФЭМ с ПО на период выполнения натурных исследования составила 43,7 ^{0}С, а без отражателей – 40,7 ^{0}С (меньше на 3 ^{0}С). Следовательно, поверхностная температура ФЭМ после применения ПО увеличилась на 7,37% с возможным последующим повышением электрических потерь о причине избыточного нагревания модулей от отражателей [3,4].

Анализ графика зависимости электрических потерь ФЭМ от солнечной инсоляции показал, что среднесуточные электрические потери ФЭМ с отражателями по причине избыточного нагревания поверхности модуля составила 10,0 Вт/м^2. В случае отсутствия ПО электрические потери модулей при аналогичных климатических условиях составила 8,5 Вт/м^2. В связи с этим электрические потери ФЭМ после применения ПО увеличились на 17,81% по причине избыточного нагрева модулей.

Заключение. По результатам проведенных натурных исследований установлено, что после применения плоских отражательных систем увеличивается доли отраженной энергии солнечного излучения на переднюю и фронтальную поверхности двухсторонней (бифациальной) фотоэлектрической модули посредством применения плоских отражателей. С помощью данного способа выработка электроэнергии от фото-солнечной электростанции с данными отражателями увеличивается на 35…36% в течение всего года, но увеличивается поверхностная температура модуля на 4,85% с последующим увеличением электрических потерь вырабатываемой мощности.

Представленная работа произведена в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSRG-2025-0009 и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0031 по приоритетному направлению ПФНИ в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) 2.5.1 – Энергетика и рациональное природопользование.

Список литературы

1. Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Ивантеев И.С. Повышение энергетических характеристик фотоэлектрических модулей за счет отраженного излучения // Естественные и технические науки. 2021. №5(156). С.216-218.
2. Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. / Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии // Строительство и техногенная безопасность // Симферополь: КФУ им. Вернадского, 2019. №15(67). С.141-149.
3. Местников Н.П. Разработка и исследование плоских отражателей для двухсторонних фотоэлектрических панелей фотосолнечных электростанций / Н.П. Местников, А.К. Корякин, А.А. Налыйдырова // Международный технический журнал. 2024. №4(91). С.21-28. DOI 10.34286/2949-4176 2024-91-4-21-28.
4. Корякин А.К. Исследование технико-экономического обоснования применимостиплоских отражателей для фотосолнечной электростанции на территории Севера / А.К. Корякин, Н.П. Местников, В.Г. Реев // Международный технический журнал. 2024. №4(91). С.37-44. DOI 10.34286/2949-4176-2024-91-4-37-44.

УДК 629.3.018(571.56)
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-456-459

ОСОБЕННОСТИ ЛАБОРАТОРНО-ДОРОЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Ноев И.И.[1,2], Филиппов Д.В.[2], Сабынин В.В.[3]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
[3]Компания «Север-Авто»
E-mail: noev56@mail.ru

Аннотация. *Статья посвящена организации и проведению лабораторно-дорожных испытаний автомобильных шин в естественных условиях холодной российской зимы. Представлена уникальная методика поэтапной подготовки снеговых и ледовых покрытий, разработанная специалистами Автодорожного факультета. Полигон проводит сравнительные испытания ключевых параметров зимних шипованных шин. Обозначена уникальность и важность полигона как универсального испытательного центра для тестирования и натурных испытаний автомобильных шин в уникальных климатических условиях.*

Ключевые слова: *лабораторно-дорожные испытания, автомобильные шины, испытательный полигон, снежный покров, тесты, треки.*

FEATURES OF LABORATORY AND ROAD TESTS OF WINTER AUTOMOBILE TIRES IN THE NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS OF YAKUTIA

Noev I.I. [1,2], Filippov D.V.[2], Sabynin V.V.[3]
[1]V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS
[2]North-Eastern Federal Universi
[3]Sever-Auto company

Abstract. *The article is dedicated to the organization and conduct of laboratory and road tests of automotive tires under the natural conditions of a cold Russian winter. A unique methodology for phased preparation of snow and ice surfaces, developed by specialists from the Road Faculty, is presented. The proving ground conducts comparative tests of key parameters of studded winter tires. The uniqueness and importance of the proving ground as a universal testing center for laboratory and field tests of automotive tires in unique climatic conditions are highlighted.*

Keyword: *laboratory-road tests, car tires, test track, snow cover, tests, tracks.*

Современный автомобильный рынок постоянно требует повышения эксплуатационных свойств автомобиля, таких как, управляемость, безопасность, экономичность и долговечность. Достичь этих целей невозможно без существенного улучшения характеристик шин. Именно поэтому сообщество шинников уделяет огромное внимание процессу фиксации и стандартизации ключевых норм и показателей, определяющих надежность и эффективность шин.

Вопросам влияния низких температур на эффективность эксплуатации автомобилей и их адаптации посвящено значительное число работ, например, Карницкого В.В., Абдрашитова Р.Т., Крамаренко Г.В., Анискина Л.Г., Афанасьева Л.Л., Бондаренко В.А., Власова В.М., Карнаухова В.Н., Кузнецова Е.С., Лосавио Г.С., Николаева В.А., Резника Л.Г., Семенова Н.В., Юрковского И.М., Жигадло А.П. и других.

На территории Республики Саха (Якутии), расположенной от средних до высоких широт, где зима длится от 6 до 8 месяцев, в течение года до 30-50% осадков выпадает в твердом виде. Климат города Якутска – резко-континентальный, выражающийся в больших колебаниях температуры воздуха как внутри года, так и в течение суток. Зимой рассматриваемая территория находится под преимущественным влиянием сибирского антициклона, обуславливающим повсюду устойчивую морозную погоду [3]. Летом территория находится в основном в области низкого давления. Лето – короткое, жаркое (табл. 1).

Таблица 1. Средние многолетние и экстремальные значения температуры воздуха по метеостанции Якутск, градусов по Цельсию

Характеристики	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Среднемесячная и годовая температура воздуха													
Средняя	-42,1	-36,0	-22,2	-7,3	5,9	15,4	18,9	15,0	6,1	-8,2	-28,5	-39,5	-10,2
Минимальная	-45,7	-40,8	-29,7	-13,9	-0,1	8,2	11,8	8,5	0,6	-12,7	-33,7	-43,3	-15,8
Максимальная	-38,9	-30,0	-13,9	0,2	12,2	21,8	25,2	21,5	11,8	-3,7	-23,9	-36,3	-4,3
Минимальная температура воздуха													
Ср.абс.миним.	-53,8	-50,6	-42,9	-29,5	-8,3	0,3	4,5	0,4	-7,7	-28,2	-45,4	-52,0	-25,9
Абсол.миним.	-63	-64,4	-54,9	-41,0	-	-5,3	-1,5	-7,8	-14,8	-40,9	-54,6	-59,8	
Максимальная температура воздуха													
Ср.абс.макс.	-27,6	-21,5	-2,4	10,3	22,4	30,0	32,8	29,6	21,2	7,8	-11,8	-24,2	6,7
Абсол.макс.	-5,8	-2,0	12,4	21,1	31,1	35,0	38,3	35,4	27,0	18,6	3,1	-3,9	

Снежный покров в окрестностях Якутска держится до 200 дней в год. Первое появление снежного покрова отмечается в сентябре. Устойчивый снежный покров образуется в конце октября – начале ноября. Вследствие низких температур зимы и высоких летних годовые амплитуды в Центральной Якутии достигают рекордных значений, как нигде в мире. Средние амплитуды воздуха в Якутске равны 62 °С, а абсолютные 100 °С и больше. Таким образом, климат г. Якутска является благоприятным условием для специфичных отраслей, требующих проведения различных работ в зимний период времени. Интенсивное нарастание снежного покрова происходит в начале зимы (ноябрь). Максимальной высоты он достигает в конце февраля и остаётся на этом уровне почти в течение месяца, до 3 декады марта [3]. Средняя, из наибольших за зиму, высота снежного покрова за многолетний период наблюдений составила 31 см, максимальная – 47 см, минимальная – 20 см (табл. 2).

Таблица 2. Высота снежного покрова в поле по снегосъемкам на последний день декады (см)

Месяцы																					Наибольшая за зиму		
X			XI			XII			I			II			III			IV					
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	сред	мак	мин
-	5	10	13	18	18	19	21	21	22	24	25	26	27	28	28	29	29	28	23	11	56	90	31

Испытания отечественных и зарубежных производителей автомобильных шин проводятся в Якутии с 2012 года. Специализированный испытательный полигон был создан в 2019 году на научно-технической базе Автодорожного факультета Северо-Восточного федерального университета на территории опережающего социально-экономического развития «Якутия» (ТОР «Якутия») в микрорайоне Кангалассы. Полигон обеспечивает организацию и техническое сопровождение по проведению исследовательских и лабораторно-дорожных натурных испытаний автомобильных шин, транспортных средств, оборудования, материалов и технологий в условиях низких температур для промышленных предприятий и компаний, гарантируя заказчикам качественное и своевременное оказание услуг [5].

На испытательном полигоне мы осуществляем разработку и внедрение уникальной методики поэтапной подготовки снеговых и ледовых покрытий. Благодаря этому, обеспечивается непрерывность и безопасность проведения испытаний в зимний период.

Для проведения тестовых заездов снежное покрытие испытательных трасс специально подготавливается. Подготовительные работы снежного покрытия испытательных треков включает в себя следующие технологические операции: снегонакопление и перевозка вдоль трасс; планировка снежной поверхности; равномерное уплотнение снега пневмокатком дорожного покрытия; выравнивание поверхности снегового покрытия; установка дорожных знаков и ограничительных линий.

Обязательным условием начала формирования уплотненного снежного слоя на испытательных трассах является выпадение продолжительных и/или интенсивных осадков в виде снега в количестве, необходимом для достижения допустимого уплотненного снежного слоя. Наращивание этого слоя производится

при последующих снегопадах. Наиболее важными физическими свойствами снега, оказывающими непосредственное влияние на процесс зимнего содержания, являются твердость, влажность, плотность в зависимости от формы выпадающих снежинок, силы ветра при его выпадении. В течение всей зимы снежный покров непрерывно уплотняется, в его плотность увеличивается в среднем на 10–12%.

Уплотнение снегового покрытия (послойно) производится при достижении толщины снега от 5–10 см, снег максимально прессуется до состояния укатанной дороги. Пневмокаток для уплотнения снегового покрытия является составным элементом технической системы грузового автомобиля КАМАЗ. Наибольшее уплотнение снегового покрытия треков производится в 10-15 проходов по одному следу. При возрастании плотности снегового покрытия необходимо добавить определенный вес дополнительного груза на пневмокаток. После уплотнения снегового покрытия вдоль трековых трасс обязательно производится «выглаживание» всей поверхности при помощи прицепного устройства (решетки).

Твердость снега характеризуется его способностью сопротивляться проникновению твердого тела (специального конуса или цилиндра). Величина твердости выражается усилием, отнесенным к площади проекции отпечатка конуса или цилиндра в снегу, и имеет размерность по системе СИ в кг/см2. Твердость снега увеличивается с возрастанием плотности покрытия и температуры окружающей среды. После механического воздействия на снеговое покрытие его твердость продолжает возрастать с течением продолжительности достижения отрицательных температур.

Показатели хорошего состояния снежного покрова для проведения испытаний:

– *КТСП – коэффициент твердости снежного покрова (обзор с фиксированной точки);

– КТСП*: 82 – 86 (обычная утрамбовка, на поверхности покрытия остаются борозды после тягового хода);

– при плохом состоянии образуются снежные взрывы и наледи (скользит, но держит сцепление).

Особенностью подготовки ледовых треков при низких температурах (–35 °C ≈ –50 °C) являются сохранение и функционирование зеркальной поверхности льда во время испытаний по требованиям стандартов. Для этого поверхность льда должна быть идеально гладкой и с определенной плотностью. С учетом выпадания снега в этот период сезона необходимо ежедневно проводить процедуру выравнивания поверхности и удаления снежного покрова с равномерным распылением воды для подготовки нового слоя до 2–5 см. льда с обязательным соблюдением до полного замерзания [2].

Лабораторно-дорожные испытания проводятся на полигоне, оборудованном набором специальных трасс. Например, для определения сцепных свойств шин автомобиля на снежной поверхности используется несколько треков (прямая площадка, криволинейная замкнутая трасса). Аналогично и на ледовой поверхности. Однако для обеспечения единообразия условий, релевантности и сопоставимости ледовое покрытие подлежит восстановлению до первоначальных значений после испытаний каждого комплекта шин.

Кроме того, контролируются метеоусловия: температура воздуха не выше минус 5℃, при колебаниях, во время одного вида испытаний, не более 1℃, отсутствие атмосферных осадков, стабильно пасмурная погода. Техническое состояние тестового автомобиля, оснастки должно соответствовать требованиям нормативной документации и заказчика.

В рамках подготовки к сезону 2024–2025 зимних тестов шин, полигон подготовил тестовые треки, расположенные в новой, более удобной локации – на поверхности замёрзшего озера «Круглое»: два ледовых и два снеговых (рис. 1). Стандартная длина криволинейной трассы составляет 900 метров при ширине 8 метров. Трасса имеет замкнутую конфигурацию, левые и правые повороты. Габариты прямоугольной площадки – 150 метров в длину и 30 метров в ширину.

Рис. 1. Площадка для тестирования сезон 2024–2025

В феврале 2025 года на Испытательном полигоне СВФУ по заказу российской компании «Север Авто» прошли испытания легковых автомобильных шин. В выборочном сравнительном тестировании участвовали зимние шипованные шины семи брендов, производства Индонезии, Китая и России. Для участия в тесте были выбраны шины средне-ценового и эконом сегментов, востребованных в России в начале 2025 года. В ходе испытаний оценивались тягово-сцепные свойства шин на льду и снегу, в том числе разгон, торможение, управляемость при температуре до –26 градусов по Цельсию [1].

При оценке свойств шин использовалась стандартная методика и измерительное оборудование Racelogic VBOX. Так, при проверке управляемости учитывалось время прохождения круга и каждому комплекту шин давалось семь попыток. При тестировании сцепления при разгоне во внимание принималось время, требующееся автомобилю для разгона до определенной скорости: с 5 до 15 км/ч на льду и с 10 до 35 км/ч на снегу. Для тестов на торможение учитывалось расстояние, которое потребовалось автомобилю для замедления с 15 до 5 км/ч на льду и с 25 до 10 км/ч на снегу. При проверке тормозных свойств каждый комплект шин получал по 10 попыток. По результатам выборочного сравнительного тестирования составлен протокол с фиксированием данных измерительных приборов, отражающих фактическое поведение исследуемых шин. Данные протокола проанализированы и перенесены в итоговую зачётную таблицу.

Результаты испытаний зимних шипованных шин, проведённых в суровых условиях Якутии, станут для компании «Север Авто» важным инструментом при выборе надёжных и безопасных моделей для своих клиентов в различных ценовых сегментах. Благодаря объективным замерам сцепления, тормозных свойств и управляемости на льду и снегу, полученным на основе объективных измерений, компания сможет ориентироваться на реальные эксплуатационные характеристики, а не только на заявления производителей.

Такой подход позволит формировать ассортимент, в котором приоритет отдан шинам, способным обеспечивать надёжность во время поездок на автомобиле в холодное время года. В результате это внесёт реальный вклад в повышение безопасности на российских дорогах, снижая риск аварий в зимний период.

Таким образом, информация, основанная на тестах и исследованиях, позволяет автолюбителям выбирать более качественную и надежную продукцию, а производителям шин получать обратную связь по результатам дополнительных испытаний в полевых условиях для совершенствования потребительских качеств шин.

Список литературы

1. Алексеева Т. На автодорожном факультете СВФУ подвели результаты тестирования зимних шин [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/instituty/adf/news/detail.php?SECTION_ID=& ELEMENT_ID=279345.
2. Исследование сцепных свойств шин / Ю. А. Шапошников, Р. И. Орлов // Современные направления технологического развития и повышения эффективности промышленного производства в экономике Алтайского края: материалы всерос. науч.-практ. конф. Барнаул, 2021. С.146-149.
3. Петрова А. Н. Метеорологические наблюдения на опытной площадке Испытательного полигона СВФУ / А. Н. Петрова, И. И. Ноев, Д. В. Филиппов // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 150-летию М. И. Сумгина. Якутск, 2023. С.215-217.
4. Филиппов Д. В. Полигонные испытания транспортных средств и технологий в условиях низких температур / Д. В. Филиппов, И. И. Ноев // Транспортные системы и дорожная инфраструктура Крайнего Севера: сборник материалов III всероссийского форума. Якутск, 2022. С.125-129.
5. Филиппов Д. В. Реализация ключевых преимуществ Дальневосточного региона на примере Испытательного полигона СВФУ в ТОР «Якутия» / Д. В. Филиппов, И. И. Ноев // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции «Климат–2020: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы. Москва, 2020. С.244-254.

УДК 620.9
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-460-463

ПРИОРИТЕТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ): ОПЕРАТИВНЫЕ МЕРЫ И ДОЛГОСРОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Павлов Н.В.
Институт физико-технических проблем Севера СО РАН
E-mail: pavlov_nv@iptpn.ysn.ru

Аннотация. *Статья посвящена анализу проблем и разработке приоритетов модернизации энергетики Республики Саха (Якутия). Актуальность исследования обусловлена уникальными вызовами, с которыми сталкивается регион: экстремальный климат, длительный цикл поставок топлива, высокая доля в потреблении топлива потребителями изолированного энергорайона и растущая нагрузка на бюджет из-за необходимости субсидирования межтарифной разницы. Методологической основой работы является подход системных исследований в энергетике. В статье предложен подход, интегрирующий оперативные меры стабилизации и долгосрочную технологическую трансформацию. Среди ключевых стратегических векторов выделены: модернизация традиционной генерации, внедрение интегрированных систем тепло- и хладоснабжения (ИСТХ), активное освоение потенциала ВИЭ, а также опора на научные разработки в области новых материалов и прогнозной диагностики.*

Ключевые слова: *Республика Саха (Якутия), модернизация энергетики, ВИЭ, Арктика, интегрированные энергосистемы, энергетическая эффективность.*

PRIORITIES FOR ENERGY MODERNIZATION IN THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA): IMMEDIATE MEASURES AND LONG-TERM TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Pavlov N.V.
Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS

Abstract. *This article presents a systemic analysis of the challenges and strategic priorities for modernizing the energy sector of the Republic of Sakha (Yakutia). The relevance of this research is driven by the unique constraints the region faces, including an extreme climate, protracted fuel supply cycles, a high share of isolated power systems, and increasing fiscal pressure from the need to subsidize inter-tariff cross-subsidies. The methodological framework of the study is based on a systems research approach applied to the energy sector. The article proposes an approach that integrates operational measures for stabilization with a long-term technological transformation. Key strategic vectors identified include: modernizing conventional generation, deploying integrated heat and cold supply systems, actively harnessing renewable energy potential, and leveraging R&D in new materials and predictive diagnostics.*

Keyword: *Sakha Republic (Yakutia), energy modernization, renewable energy sources, Arctic, integrated energy systems, energy security.*

Введение. Вопросы развития энергетики и обеспечения энергетической безопасности Республики Саха (Якутия) – крупнейшего субъекта Российской Федерации – имеют высокую актуальность. Энергетика региона функционирует в уникальных сложных условиях, которые предопределяют ее структурные особенности. Анализ топливно-энергетического баланса выявляет совокупность взаимосвязанных проблем: суровый резко континентальный климат с экстремальными годовыми перепадами температур (до 90°C), требующий повышенных нормативов надежности и резервирования; сезонный характер завоза топлива; короткие сроки навигации; сложная многовидовая транспортная схема с множественными перевалками; длительный цикл доставки (до 2,5 лет), катализирующий рост тарифов; значительная неравномерность графиков нагрузки; физический и моральный износ генерирующего и сетевого оборудования; высокие потери в теплосетях и хронический дефицит инвестиций [1, 2].

Эти вызовы усугубляются факторами: значительной долей потребления дорогостоящего дизельного топлива потребителей изолированной энергосистемы в общем потреблении топлива и энергии, а также растущей нагрузкой на бюджет, который вынужден субсидировать разницу между стоимостью энергии и тарифом для потребителей. В этой связи повышение эффективности использования топлива и энергии было и остается одним из главных приоритетов стратегии развития экономики и энергетики республики [3, 4].

Принятие стратегических решений в области модернизации энергетики в условиях Арктики и Субарктики представляет собой комплексную многоаспектную задачу, требующую учета технических, экономических, экологических и социальных критериев эффективности.

В статье предлагается формирование системы приоритетов модернизации энергетики Якутии, структурно разделенной на оперативные меры и долгосрочные технологические решения, основанные на современных глобальных трендах и научных разработках.

Системный анализ проблем энергетики Якутии и оперативные приоритеты. Проблемы энергетики Республики Саха (Якутия) носят системный и взаимосвязанный характер, что требует для их решения применения методологии системных исследований в энергетике, основы которой заложены академиком Л.А. Мелентьевым [5]. Выделенные им свойства энергосистем – динамичность, гибкость и экономичность в экстремальных условиях республики проявляются с выраженной спецификой.

– логистическая и ценовая уязвимость: Длительный цикл поставок топлива (от планирования до конечного потребления может пройти до 2,5 лет) приводит к необходимости формирования значительных запасов, что «замораживает» крупные финансовые ресурсы и увеличивает издержки. Конечная стоимость топлива в удаленных населенных пунктах при этом в несколько раз превышает закупочную.

– высокие эксплуатационные затраты и технологические потери**:** Эксплуатация энергетической инфраструктуры в условиях экстремальных температурных колебаний и вечной мерзлоты провоцирует ее ускоренный износ. Ситуацию усугубляют высокие потери в тепловых сетях, приводящие к дальнейшему удорожанию процесса

Изучение динамики энергоемкости валового регионального продукта (ВРП) республики подтверждает его зависимость от инфраструктурных вложений и климатических факторов. Снижение энергоемкости напрямую связано с реализацией масштабных проектов модернизации и требует целенаправленной государственной поддержки [3].

Ключевой мерой по стабилизации ситуации и контролю затрат стало принятие в 2025 году Плана мероприятий. Его реализация до 2030 года (с перспективой до 2035) нацелена на ограничение бюджетной нагрузки, связанной с субсидированием межтарифной разницы в коммунальной энергетике. [6]:

1. Совершенствование системы топливоснабжения: Изменение логистики доставки топлива с переводом на более эффективные маршруты и виды транспорта для снижения транспортных расходов.

2. Диверсификация топливного баланса: Особое внимание уделено газификации. В рамках программы по развитию газовой инфраструктуры в центральных и крупных промышленных районах республики активно реализуются проекты по газификации населённых пунктов.

3. Внедрение ресурсосберегающих технологий: Сокращение расходов на топливо и электроэнергию с внедрением энергосберегающего оборудования и оптимизации режимов работы котельных и сетей.

4. Внедрение инструментов учета: Массовая установка приборов учета для снижения коммерческих потерь, формирования объективной основы для тарифообразования и стимулирования энергосбережения среди потребителей [6].

В целом, реализуемые меры направлены на повышение энергетической эффективности, снижение коммунальных расходов и укрепление энергетической безопасности региона. Для развития энергоснабжения региона на долгосрочный период необходима парадигма, нацеленная на глубокую технологическую трансформацию.

Долгосрочные технологические решения. Энергетика сохранит роль базового элемента, что актуализирует задачу ее глубокой модернизации.

– повышение эффективности генерации. Внедрение эффективных электростанций, работающих на природном газе, а также повышение эффективности сжигания угля.

– диверсификация топливного баланса. Дальнейшая газификация районов республики и использование сжиженного природного газа (СПГ) для энергоснабжения удаленных потребителей.

– интегрированные системы тепло- и хладоснабжения (ИСТХ). Технология предполагает использование сбросного тепла газотурбинных установок ТЭЦ в летний период для производства холода с помощью абсорбционных холодильных машин. Моделирование внедрения этого решения в условиях г. Якутска показала следующие результаты: сокращение расхода электроэнергии на кондиционирование до 29% в месяц и годовая экономия до 519 млн рублей при снижении выбросов CO_2 на 58 тонн [8]. В условиях прогнозируемого роста глобальной температуры и увеличения потребности в охлаждении воздуха в регионах Крайнего Севера данная технология также является одним из направлений повышения энергетической эффективности.

– переход на использование высококачественного сортового угля является фактором повышения энергетической безопасности. Данная мера обуславливает повышение эффективности сжигания топлива, что приведет к сокращению объемов потребления и, как следствие, транспортировки угля [2].

Имеющиеся потенциальные ресурсы возобновляемых источников энергии определяют их как один из векторов для снижения зависимости от привозного топлива в децентрализованной зоне электроснабжения.

Несмотря на высокоширотное положение, значительное количество солнечных дней в году создает предпосылки для эффективного использования объектов генерации энергии работающих на энергии Солнца. Исследования, проведенные Институтом физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) в г. Якутске, показали эффективность вакуумных солнечных коллекторов, используемых для нужд отопления. Их интеграция в традиционные системы отопления позволяет экономить до 30-40% тепловой энергии в весенне-осенний период, демонстрируя окупаемость в условиях высоких тарифов на топливо [7]. Использование энергии малых рек сохраняет актуальность для электроснабжения изолированных населенных пунктов [9].

Внедрение технологий Smart Grid и создание гибридных микрогридов на основе ВИЭ, дизельной генерации и накопителей с интеллектуальным управлением являются одним из путей к снижению эксплуатационных издержек в удаленных населенных пункта.

Фундаментальные и прикладные исследования институтов ЯНЦ СО РАН формируют основу для повышения надежности и долговечности энергетической инфраструктуры.

– разработка новых материалов: Ведутся разработки новых гибридных материалов (металлические и композиционные), эластомерных композитов, исследуются механизмы хрупкого и усталостного разрушения сталей и композитов при сверхнизких температурах и в коррозионных средах [10].

– многомасштабное моделирование и прогнозирование надежности: Применение системно-структурного подхода и численного моделирования позволяет прогнозировать накопление микроповреждений в элементах критической инфраструктуры: трубопроводах, опорах ЛЭП, корпусах котлов [11, 12]. Данный инструментарий обеспечивает переход от планово-предупредительного ремонта к сервису по фактическому состоянию, что повышает надежность и оптимизирует жизненный цикл объектов.

Заключение. Модернизация энергетики Республики Саха (Якутия) – это сложная, многогранная задача, требующая применения принципов системных исследований.

Оперативные меры должны быть сфокусированы на стабилизации тарифной и бюджетной политики, оптимизации логистики и проведении неотложных работ по модернизации наиболее изношенной инфраструктуры и развитию наиболее энергетически эффективных технических решений. Долгосрочная стратегия должна быть нацелена на глубокую трансформацию энергетического сектора, ключевыми векторами которой являются: диверсификация генерации через активное внедрение ВИЭ, превращающее климатические особенности в энергетические преимущества; повышение энергетической эффективности, в том числе, и через внедрение ИСТХ, модернизацию существующей генерации; диверсификации топливного баланса и углубления качественной подготовки местных ресурсов; опора на научный потенциал, предусматривающая внедрение новых материалов и методов прогнозной диагностики.

Республика Саха (Якутия) в силу своих уникальных природно-климатических и логистических условий представляет собой идеальный полигон для апробации и масштабирования передовых технологий, определяющих будущее энергетики арктических и северных территорий. Реализация системы приоритетов заложит основу для перехода к надежной и технологически прогрессивной модели энергоснабжения региона.

Работа выполнена в рамках проекта *FWRS-2024-0031. Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учётом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных электроэнергетических систем труднодоступных, изолированных территорий Севера и Арктики.*

Список литературы

1. Кузьмин А.Н., Михеева Е.Ю., Павлов Н.В. Перспективы развития малой теплофикации в Республике Саха (Якутия) Новосибирск, 2013. 101 с.
2. Zakharov V., Prokhorov D., Pavlov N. Russian arctic region energy balance (Republic of Sakha (Yakutia)). E3S Web of Conferences, vol.114. 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/201911402005
3. Иванова А.Е., Павлов Н.В., Петрова Т.Н. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов в Республике Саха (Якутия) // Региональная экономика: теория и практика. 2017. Т. 15. № 11 (446). С. 2123-2137 DOI: 10.24891/re.15.11.2123
4. Pavlov N., Petrov N. Coal industry of the Republic of Sakha (Yakutia): tools and forecast. E3S Web of Conferences, vol. 77. 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/20197703002
5. Мелентьев Л.А. Методология системных исследований в энергетике. 1983. 455 с.

6. План мероприятий, направленный на сдерживание роста субсидий организациям коммунального комплекса на межтарифную разницу до 2030 года, с видением до 2035 года, утвержденный протоколом Главы Республики от 13.04.2025
7. Prokhorov D.V, Zakharov V.E., Vasilev S.S. Using of evacuated solar tube collectors for heating in Central Yakutia conditions. Energy Systems Research. 2023, vol.6, no.4(24), pp.67-71. DOI: 10.25729/esr.2023.04.0007
8. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Павлов Н.В., Васильев С.С. Методы развития интегрированных систем тепло- и холодоснабжения в условиях Крайнего Севера // Известия РАН. Энергетика. 2025. №4. С.3-15 DOI: 10.31857/S0002331025040018
9. Константинов А.Ф., Ноговицын Д.Д., Фельдман Б.Н. Перспективы строительства малых ГЭС в Арктической зоне Якутии // Гидротехническое строительство. 1996. №2. С.48-52.
10. Lepov V.V., Petrov N.A., Prokhorov D.V., Pavlov N.V., Zakharov V.E. Concept of integrity, reliability and safety of energy and transport systems for cold climate regions. E3S Web of Conferences. «ENERGY-21 – Sustainable Development and Smart Management». 2020. DOI: 10.1051/e3sconf/202020905009
11. Lepov V.V., Petrov N.A., Pavlov N.V. System analysis of the modern materials and technologies in power engineering and industry for the Russian North and Arctic. AIP conference proceedings. Rudenko international conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2021). 2023, vol.2552. DOI: 10.1063/5.0112831
12. Лепов В.В., Соколова М.Д., Лукин Е.С., Голиков Н.И., Павлов Н.В. Применение новых материалов и технологий для эффективного освоения Севера и Арктики // сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова. 2023. С.341-346.

УДК 621.315.66
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-464-466

ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОТИВОПУЧИННЫХ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Попов С.Н.[1], *Федоров Ю.Ю.*[1], *Унжаков А.С.*[2]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН». Обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск
[2] Общество с ограниченной ответственностью «Алроса Охрана», г. Мирный
e-mail: north.ykt@mail.ru

Аннотация. *Для эффективного противодействия выпучиванию опор линий электропередач из грунта в процессе его промерзания предлагается одновременно усиливать сцепление нижней части опор с многолетнемерзлым грунтом под зоной его сезонного протаивания и снижение адгезии примерзания поверхности опор к грунту в его верхних слоях. Разработаны две конструктивных варианта противопучинных опор.*

Ключевые слова: *линиии электропередач, выпучивание опор, технические решения*

EFFECTIVE DESIGN OF ANTI-SWELL SUPPORT FOR ELECTRIC POWER LINES

Popov S.N.[1], *Fedorov Yu.Yu.*[1], *Unzhakov A.S.*[2]
[1]Federal Research Center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences». Separate Division of the Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Limited Liability Company «Alrosa Ohrana»

Abstract*. To effectively counteract the bulging of power line supports from the ground during its freezing, it is proposed to simultaneously increase the adhesion of the lower part of the supports to the permafrost soil under the zone of its seasonal thawing and reduce the adhesion of the surface of the supports to the soil in its upper layers. Two design options for anti-bulging supports have been developed.*

Keyword: *power lines, support bulging, and technical solutions.*

В последние годы практика эксплуатации линий электропередач на территории Якутии показывает интенсификацию выпучивания опор из грунта повышенной влажности. Основной причиной наблюдающихся процессов является потепление климата и связанное с ним увеличение толщины сезонного протаивания грунта, обуславливающее повышение размеров его объемного расширения при замерзании влаги, содержащейся в грунте в осенне-зимний период. Например, в г. Якутске это явление особенно заметно для стальных опор уличного освещения. В связи с высокой теплопроводностью металла ореол протаивания грунта у них существенно выше, чем у железобетонных или деревянных. В результате этого выпучивание стальных опор при установке в грунтах с повышенной влажностью может достигать 8–10 см в течение одного года. На рис. 1 представлена фотография основания стальной опоры, выпученной на 90 см в течение восьмилетней эксплуатации. С учетом того, что заглубление опор уличного освещения не превышает трех метров, при сохранении темпов выпучивания срок их службы может не превысить 15 лет и потребуются значительные затраты для восстановления их работоспособности.

Анализ известной научно-технической и патентной информации показывает, что для снижения выпучиваемости опор линий электропередач из грунта предлагается, как правило, два подхода. Во-первых, нанесение на подземную часть основания криофобного покрытия, понижающего адгезию примерзания влажного грунта к опоре в слое сезонного протаивания. Такой способ позволяет уменьшить величину касательных сил морозного пучения. Во-вторых, в некоторых патентах предлагается повышать сцепление основания опоры с грунтом ниже слоя сезонного протаивания с использованием различных технологических способов.

Например, в патенте [1] в зоне сезонного протаивания предлагается поверхность основания опоры покрывать термоусаживающимся полимерным рукавом. Полимерные материалы типа полиэтилена характеризуются высокими криофобными свойствами, что может в значительной мере обеспечить снижение выпучиваемости опор из грунта. Недостатком такого рода покрытий является технологическая сложность их реализации в полевых условиях и возможность разрушения при транспортировке.

Более сложным и дорогостоящим является техническое решение, предлагаемое в патенте [2], в котором верхняя часть основания опоры, расположенная в зоне сезонного протаивания выполнена в виде монолитного блока из несмерзающегося с грунтом полимера, а нижняя часть имеет форму решетчатого каркаса. Объединение в одном конструктивном оформлении двух подходов к решению проблемы выпучиваемости является наиболее эффективным, однако реализация рассмотренного предложения в широких масштабах весьма затруднительна.

Наиболее предпочтительными для снижения выпучиваемости опор из грунта, на наш взгляд, являются способы, сочетающие применение полимерных покрытий (типа лакокрасочных) в верхней части оснований с простейшими механическими сцепляющими с грунтом устройствами в нижней части.

В качестве полимерного криофобного покрытия [3] можно использовать, например, покрытия на эпоксидной основе, предлагаемые Уральским заводом полимерных технологий «Маяк» типа ПСПП «Reline» по ТУ 20.30.12-001-75457705-2018, качественное нанесение которых возможно, как ручными, так и механизированными способами.

Механическое зацепление нижних частей оснований опор можно предусмотреть с использованием технических решений, достаточно подробно представленных в описаниях патентов [4,5]. Для опор трубчатой конструкции с использованием стальных или стеклопластиковых труб предлагается ниже границы максимально возможного сезонного протаивания в стенках закреплять в шахматном порядке стальные шпильки, выступающие за внешние пределы труб на ширину зазоров между опорой и котлованом [4].

После заполнения котлована грунтом шпильки в него вмерзают и фиксируют положение основания, затрудняя его вертикальные перемещения.

Для железобетонных опор прямоугольного и трапециевидного сечения возможно ниже слоя сезонного протаивания по их внешнему периметру устанавливать стяжные хомуты в виде ребер, соединения деталей которых расположены по боковым сторонам [5]. Схематический чертеж опоры представлен на рисунке 2.

Рис. 1. Выпученная стальная опор уличного освещения в г.Якутске

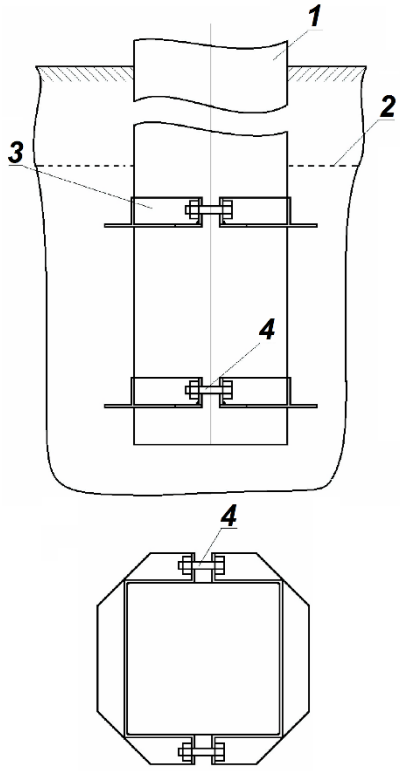


Рис. 2. Противопучинная опора линии электропередачи

Описанные технические решения отличаются простотой конструктивного оформления и значительно более широкими возможностями практической реализации. Испытания разработанных конструкций на стендах и в эксплуатационных условиях планируются начать в ближайшее время.

Список литературы

1. Противопучинная свая и покрытие для него. Патент РФ 89541, МПК E02D, 5/60, 27/35 /Алявдин Д.В., Малюшин Н.А. Заявители и патентообладатели Алявдин Д.В., Малюшин Н.А., заявка № 2009132336 /22, заяв.26.08.2009. опубл.10.12.2009, бюл. № 33.
2. Фундамент опоры. Патент РФ 2054093, МПК E02D, 27/35. 31/14 / Лязгин А.Л., Осипов А.П., Остробродов С.В. и др. Заявители и патентообладатели Лязгин А.Л., Осипов А.П., Остробродов С.В. и др., заявка №93003692 /33, заяв.28.01.1993., опубл.10.02.1996, бюл. № 4.
3. Уральский завод технологий полимеров, http: polymerpro.ru
4. Опора линии электропередачи. Патент РФ 217583, МПК E04H 12/01, E02D 27/42 /Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Унжаков А.С., Заявитель и патентообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН, заявка №202229786, заяв. 17.11.2022. опубл.21.04.2023, бюл. №12
5. Противопучинная опора линии электропередачи. Патент РФ 215710, МПК E04H 12/01, E02D 27/42 /Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Унжаков А.С., Заявитель и патентообладатель ФИЦ ЯНЦ СО РАН, заявка №2012129787, заяв. 17.11.2022. опубл. 22.12.2022, бюл. №36.

УДК 620.9, 620.165
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-467-470

РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТОВ НА УДАРНЫЕ И ВИБРАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ВАКУУМНЫХ ТРУДОК СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Прохоров Д,В.[1], Прохоров В.А.[2]
[1]Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова
E-mail: prokohorov_iptpn@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования проблем транспортировки вакуумных трубок солнечных коллекторов на большие расстояния. На примере поставок в г. Якутск показано, что большое количество вакуумных трубок могут быть повреждены при перевозке даже по асфальтированным дорогам. С целью выявления причин разрушения трубок был проведен анализ повреждений, выявивший характерные разрушения от действия изгибающего момента при вибрационных и ударных нагрузках. На основе исследования конструкции трубок и их упаковки разработаны расчетные схемы для внешней и внутренней колб трубок для дальнейшего расчета на прочность.

Ключевые слова: *вакуумный солнечный коллектор, вакуумные трубки, ударные нагрузки, прочностной анализ, расчетная схема, балка на упругих опорах, хрупкое разрушение.*

DESIGN SCHEMES FOR SHOCK AND VIBRATION LOAD ANALYSIS DURING TRANSPORTATION OF EVACUATED SOLAR COLLECTOR TUBES

Prokhorov D.V.[1], Prokhorov V.A.[2]
[1]Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
[2]Ammosov North-Eastern Federal University

Abstract. *The article presents the results of a study on the problems associated with the long-distance transportation of solar collector evacuated tubes. Using deliveries to the city of Yakutsk as an example, it is shown that a significant number of evacuated tubes can be damaged during transit, even on paved roads. To identify the causes of tube failure, a damage analysis was conducted. This analysis revealed characteristic failures caused by the bending moment under vibrational and impact loads. Based on a study of the tube design and their packaging, calculation models for the outer and inner bulbs were developed for subsequent strength analysis.*

Keyword: *evacuated tubes, evacuated tube solar collector, impact loads, strength analysis, design model, beam on elastic supports, brittle fracture.*

Введение. С начала 2022 года в Отделе проблем энергетики ИФТПС СО РАН (г. Якутск) проводятся натурные исследования эффективности системы солнечного отопления на основе вакуумных трубчатых коллекторов [1–2]. Ключевым элементом экспериментального стенда является вакуумный солнечный коллектор, состоящий из 15 трубок типа «Heat pipe», приобретённый у компании ООО «Технолайн» (г. Владивосток).

Опыт транспортировки показал её высокую ненадёжность. Из первой партии в 15 трубок, доставленной из Владивостока в Якутск, неповреждёнными прибыли только 4 (рис. 1). Из второй партии в 11 трубок, отправленной другой транспортной компанией, целыми пришли 7. Для компенсации недостачи 4 трубки были дополнительно приобретены в г. Якутске. Таким образом, перевозка вакуумных трубок на большие расстояния, даже по асфальтированным дорогам, сопряжена со значительными рисками повреждения, что приводит к прямым финансовым потерям и упущенному времени.

Актуальность данного исследования подчёркивается высоким потенциалом солнечных вакуумных коллекторов для теплоснабжения удалённых населённых пунктов с хорошей инсоляцией и дорогостоящим теплом. При этом доставка оборудования в такие регионы, как правило, осуществляется водным транспортом или по зимникам, где ударные нагрузки многократно превышают воздействия при движении по асфальтобетонным дорогам, что усугубляет проблему.

Рис. 1. Разбитые вакуумные трубки

Конструкция, характеристики и размеры. Вакуумная трубка типа «Heat pipe» представляет собой коаксиальную конструкцию, основным элементом которой является стеклянный термос, выполненный по технологии «колба в колбе» (рис. 2). В верхней части колба герметизирована пробкой с центральным отверстием диаметром 8 мм. Внутри вакуумной трубки размещена медная трубка диаметром 8 мм, запаянная с обоих концов. На её верхнем конце имеется расширение до 14 или 24 мм, выполняющее функцию конденсатора-теплообменника. Внутри медной трубки находится теплоноситель. Фиксация медной трубки в центре внутренней стеклянной колбы осуществляется алюминиевой пластиной-пружиной, которая также обеспечивает теплопередачу от колбы к трубке [3]. Геометрические характеристики трубок приведены в таблице 1 [3–4].

Рис. 2. Вакуумная трубка типа «Heat pipe» [3]

Таблица 1. Геометрические характеристики трубок

Длина трубки	1,8 м
Внешний диаметр	58 мм
Внутренний диаметр	47 мм
Толщина внешней трубки	1,8 мм
Толщина внутренней трубки	1,6 мм
Толщина слоя вакуума	2,1 мм

Материал трубки – боросиликатное стекло 3.3 [4–5]. Характеристики боросиликатного стекла 3.3 показаны в таблице 2 [6–8].

Таблица 2. Характеристики материала трубок

Плотность при 20 ºС	2230 кг/м^3
Предел прочности на изгиб	45 МПа
Предел прочности на растяжение	7 МПа
Предел прочности на сжатие	100 МПа
Модуль упругости	64 ГПа

Расчетные схемы для расчета на прочность. Вакуумная трубка типа «Heat pipe» выполнена по технологии «колба в колбе». При прочностном анализе каждую колбу рассматривают отдельно, для чего разрабатываются соответствующие расчётные схемы.

При анализе разрушенных трубок было установлено, что часть из них имеет характерные признаки разрушения от изгибающего момента – косые или поперечные изломы (рис. 3). Вероятнее всего от вибрационной нагрузки образовались усталостные микротрещины, которые от ударной нагрузки хрупко разрушились из-за низкой трещиностойкости стекла.

а)

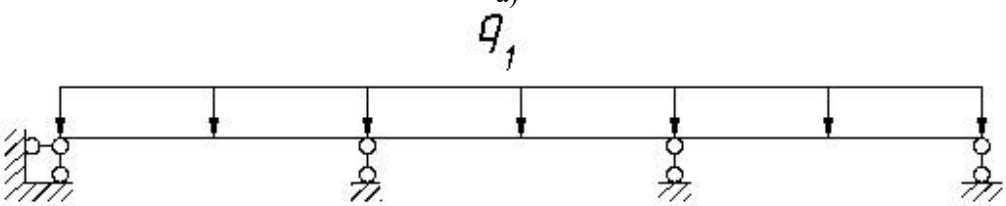
б)

Рис. 3. Характерные разрушения вакуумных трубок: а) внешних колб; б) внутренних колб

Трубки были размещены в два ряда на четырёх полистирольных опорах и упакованы в картонные коробки с деревянной обрешёткой.

Внешнюю колбу можно смоделировать в виде балки, лежащей на четырёх упругих опорах (рис. 4а). Поскольку коэффициент податливости опор неизвестен и характеристики опор абсолютно одинаковы, допустимо использование упрощённой расчётной схемы – балки на четырёх шарнирно-подвижных опорах (рис. 4б). Собственный вес колбы учитывается как распределённая нагрузка.

а)



б)

Рис. 4. Схемы для внешней колбы: а) реальная схема; б) расчетная схема

Внутреннюю колбу можно смоделировать в виде балки, опирающейся с одной стороны на упругую опору (четырехлепестковая пружина), а с другой – на упругоподатливую (обеспеченную совместной запайкой внутренней и внешней колб в устье). По всей длине колбы на неё действует алюминиевая пластина-пружина, расположенная снаружи, между колбами. Её воздействие, как и собственный вес внутренней колбы, моделируется распределёнными нагрузками. Эти нагрузки можно объединить в одну результирующую распределённую нагрузку, интенсивность которой равна разности их интенсивностей (рис. 5б).

Для упрощения расчёта расчётную схему можно свести к балке на двух шарнирных опорах (неподвижной и подвижной). Данное упрощение приводит к завышению реальных напряжений изгиба, что создаёт дополнительный запас прочности.

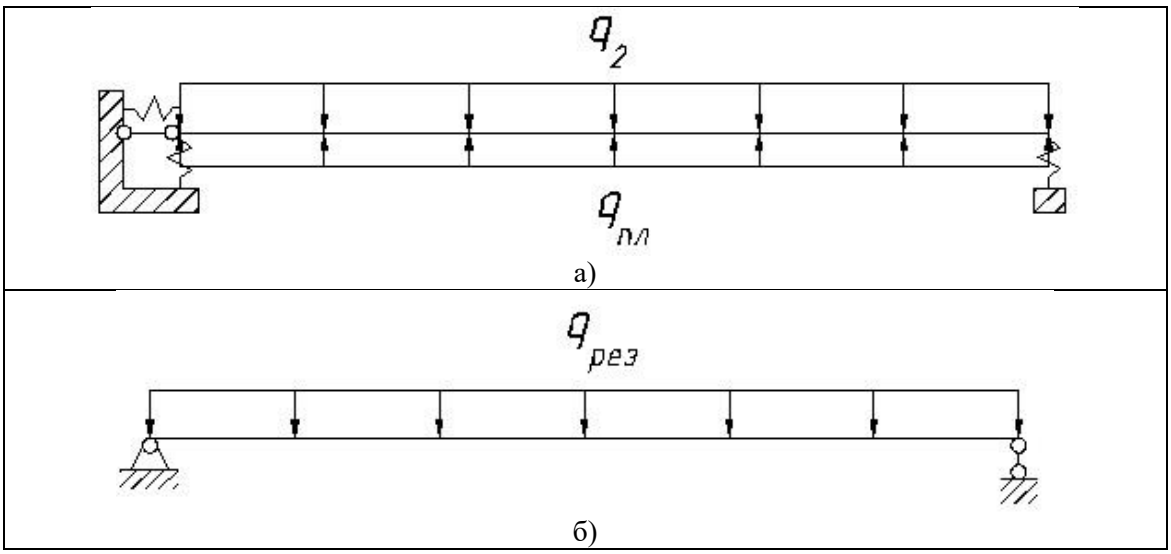


Рис. 5. Схемы для внутренней колбы: а) расчетная схема; б) упрощенная расчетная схема

Заключение

1. Проведён анализ разрушенных трубок и определён характер их повреждений. Установлено, что часть трубок имеет характерные признаки разрушения от действия изгибающего момента – косые или поперечные изломы.

2. Исследована конструкция трубок и их упаковка для транспортировки. На основе этого были разработаны расчётные схемы для оценки нагрузок. Внешняя колба смоделирована как балка на четырёх жёстких опорах. Внутренняя колба смоделирована как балка на двух шарнирных опорах (неподвижной и подвижной). Применение данных упрощённых схем позволяет эффективно определить максимальные нагрузки и локализовать наиболее нагруженные участки.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках проекта государственного задания №FWRS-2024-0031 программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.*

Список литературы

1. Прохоров Д.В., Захаров В.Е., Васильев С.С. Применение солнечных трубчатых вакуумных коллекторов для отопления в условиях Центральной Якутии: особенности эксплуатации и монтажа экспериментального стенда // EURASTRENCOLD-2023. Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова. Киров, 2023. С.507-511.
2. Dmitry V. Prokhorov, Semen S. Vasilev Efficiency Evaluation of Evacuated Solar Tube Collectors in Sakha Republic (Yakutia) // Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2024) [E3S Web of Conferences 584, 01050]. 2024. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458401050.
3. https://energotrade.su/ (дата обращения 10.11.2025).
4. http://andi-grupp.ru/ (дата обращения 10.11.2025).
5. https://e-solarpower.ru/ (дата обращения 10.11.2025).
6. ГОСТ EN 1748-1-1-2016 Стекло боросиликатное. Технические требования.
7. ISO 3585-1998 Borosilicate Glass 3.3 – Properties.
8. EN 1595:1997 Pressure equipment made from borosilicate glass 3.3 – General rules for design, manufacture and testing.

УДК 621.564.25, 621.564.36
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-471-475

ИЗУЧЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗЛОЖЕНИЯ ГИДРАТА ФРЕОНА R134A В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Решетникова В.Р., Корякина В.В.
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
E-mail: vikiresh2005@gmail.com

Аннотация. *Исследованы кинетика и термодинамика роста и разложения гидратов фреона-R134a в дистиллированной воде, снежной массе и растворах $CaCl_2$. Установлено, что синтез из жидкого фреона и снега при атмосферном давлении эффективен при температурах ниже –26 °С и процесс лимитируется диффузией. Энергия активации разложения гидрата составила 38,7 кДж/моль, газосодержание – 40 мл/г воды. Методом ДСК определены термодинамические параметры и показано влияние предыстории системы и ингибирующего действия эвтектического раствора $CaCl_2$ (~25 °С) на гидратообразование. Процесс технологически управляем и перспективен для применения.*

Ключевые слова: *гидрат, гидратообразование, фреон R134a, жидкий фреон, термодинамические параметры, фазы.*

STUDY OF FORMATION AND DECOMPOSITION OF FREON-R134A HYDRATE IN VARIOUS MEDIA

ReshetnikovaV.R., KoryakinaV.V.
M. K. Ammosov's North-Eastern Federal University

Abstract. *The kinetics and thermodynamics of the growth and decomposition of R134a freon hydrates have been studied. It has been established that synthesis from liquid freon and snow at atmospheric pressure is effective at temperatures below -26°C, and the process is limited by diffusion. The activation energy of hydrate decomposition was 38.7 kJ/mol, and the gas content was 40 ml/g of water. The thermodynamic parameters were determined by the DSC method and the effect of the system's background and the inhibitory effect of a eutectic solution of $CaCl_2$ (~25°C) on hydrate formation was shown. The process is technologically controllable and promising for use.*

Keyword: *hydrate, hydrate formation, freon R134a, liquid freon, thermodynamic parameters, phases.*

Гидратообразование – гетерогенный физико-химический процесс между водой и газом (жидкостью)-гидратообразователем, при котором происходит изменение фазового состояния исходных веществ из жидкого и/или газообразного в твердое газогидратное. Разложение газогидратов протекает с образованием исходных веществ без потери их качественных и количественных характеристик. Поэтому процесс гидратообразования все шире находит свое применение в таких областях как улавливание и секвестрация парниковых газов, транспортировка и хранение природного газа, обезвоживание морской воды, и др. [6].

Цель: исследование физико-химических особенностей процессов роста и диссоциации гидратов фреона R134a.

Одними из модельных гидратных систем для изучения физико-химических параметров процессов синтеза и диссоциации газогидратов являются системы на основе фреонов [4]. Известно, что гидрат фреона формирует гранецентрированную кубическую структуру КС-II, формула элементарной ячейки которой $16D \times 8H \times 136H_2O$[1]. Так как размеры молекул фреона достаточно крупные, в ячейке гидрата ими заполняются только большие полости H, и, таким образом, общая формула гидрата приобретает вид $8H \times 136H_2O$. В перерасчете на 1 молекулу газа приходится 17 молекул воды:

$$C_2H_2F_4 + 17H_2O \rightarrow C_2H_2F_4 \cdot 17H_2O$$

Объектами исследования являлись гидраты 1,1,1,2-тетрафторэтана (CF_3CH_2F, фреон-134a, R134a, Zhejiang Sanmei Chemical Ind. Co., Ltd., Китай), синтезированные по методике, разработанной нами в данной работе.

Синтез гидрата осуществляли из снега/льда и жидкого фреона при температурах от –45 до –35 °С и давлении 101,1 кПа. Твердой фазой служил снег/лед, жидкой фазой – сконденсированный фреон, соотношения между фазами 1 к 1, время смешивания фреона со снегом 5 минут. Время выдержки льда

размеров 1x1x1 см в жидком фреоне составляло от 1 до 60 минут. Также были получены гидраты фреона в среде эвтектического 30 мас. % раствора хлорида кальция.

Скорость образования гидратов фреона изучали визуальной регистрацией толщины гидратной фазы, формируемой на поверхности ледяной заготовки. Описание кинетики проводили путем подбора кинетических моделей твердофазных реакций по моделям Аврами-Ерофеева, Таммана и Яндера [3].

Кинетику разложения полученных гидратов из снежной массы изучали волюмометрически при трех температурах (10, 20 и 25 °С). По полученным кинетическим данным вычисляли константы скорости и энергии активации реакции разложения гидрата фреона:

$$k = \frac{1}{t}\ln\frac{V_0}{V};$$

$$\ln\frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

где k – константа скорости диссоциации гидрата;V_0– объем газа, выделившийся в момент времени t, мл; V – объем газа, выделившийся в конце диссоциации, мл; t– момент времени, мин; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль•К); Т– температура, К.

Фазовые превращения в системе «фреон–раствор» изучали на микро-ДСК в два цикла «охлаждения-нагрева». Условия гидратообразования в ДСК-ячейке выбирались исходя из соображений о жидкофазном гидратообразовании и составляли: избыточное давление фреона 1,5 бар в системе с дистиллированной водой и 3,2 бар в системе с раствором $CaCl_2$, минимальная температура 246 К, скорость V охлаждения/нагревания 0,25 К/мин.

Таблица 1. Параметры ДСК-эксперимента

$m_{\text{р-ра}}$, г	m_{H_2O}, г	$T_{\text{нач}}$, °С	$T_{\text{кон}}$, °С	$p_{\text{фреон}}$, бар	$V_{\frac{\text{охл}}{\text{нагр}}}$, К/мин	$t_{\text{эксп}}$, ч
53	37	20	-30	3,2	0,25	20

Термодинамические параметры – энтальпии и энтропии образования были вычислены на основании полученных ДСК-грамм:

$$\Delta H_{\text{обр}} = \Delta Q;$$

$$\Delta S_{\text{обр}} = \frac{\Delta H_{\text{обр}}}{T_{\text{пл}}};$$

$$\alpha = \frac{\Delta H_{\text{обр}}}{108{,}9} * 100\%,$$

где $\Delta H_{\text{обр}}$– энтальпия гидратообразования, Дж/г H_2O; ΔQ – тепловой поток фазового перехода, Дж/г; $\Delta S_{\text{обр}}$ – энтропия гидратообразования, Дж/(г H_2O•К); α – степень гидратообразования, %; 108,9 – энтальпия образования 100% гидрата фреона, Дж/г H_2O.

Обсуждение результатов. Полученный из снежной массы гидрат фреона представлял собой снегоподобную массу. По сравнению с обычным снегом, гидрат таял медленнее и после разложения в воде оставались пузырьки растворенного фреона.

На рисунке 1 приведена кривая роста гидратной пленки на поверхности льда. Видно, что кривая представляет собой параболическую функцию, что характерно для процессов с диффузионным контролем.

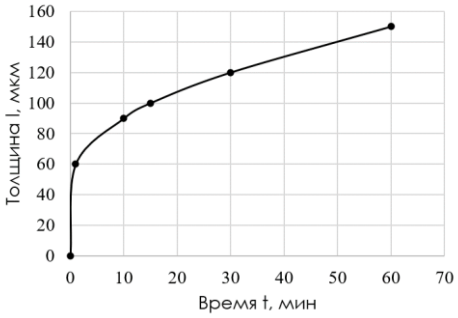


Рис. 1. Зависимость толщины гидратной пленки, растущей на поверхности льда, от времени синтеза гидрата

В течение уже первой минуты формируется пленка гидрата толщиной в 60 мкм, а период полупревращения гидратной пленки составляет около 5 минут. Таким образом, для полного гидратообразования из снежной массы и жидкого фреона будет достаточно времени в 3–5 минут, так как типичные снежные кристаллы имеют толщину около 80 мкм [2].

Исследование роста гидратов фреона на поверхности льда показало, что скорость формирования гидратной пленки хорошо согласуется с кинетической моделью Яндера, которая описывает твердофазные взаимодействия, лимитируемые односторонней объемной диффузией вещества (рис. 2). По модели Яндера константа скорости гидратообразования из жидкого фреона и льда определяется как тангенс угла наклона кинетической кривой и равна 0,011 мин$^{-1}$. Не согласованность кинетики гидратообразования с моделью Таммана показывает, что дефекты на поверхности льда в ходе гидратообразования отсутствуют, а не совпадение с моделью Аврами-Ерофеева на поздних стадиях процесса указывает на преобладающий механизм диффузии, а не зародышеобразования.

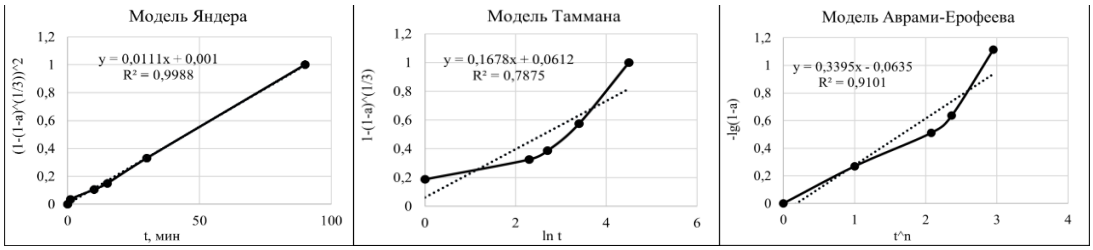


Рис. 2. Кинетические кривые однонаправленного роста гидрата фреона на поверхности льда

Исследование кинетики диссоциации гидратов фреона показало, что газосодержание составляет 40 мл/1 мл воды (рис. 3).

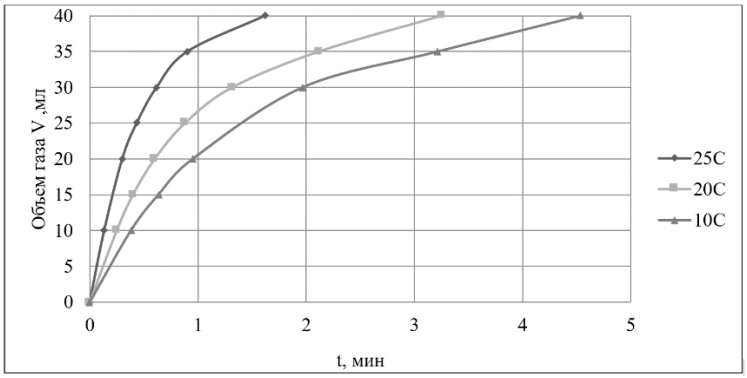


Рис. 3. Кинетические кривые разложения гидрата фреона, полученного из снежной массы при различных температурах

С ростом температуры скорость диссоциации гидрата фреона увеличивается и при возрастании температуры на 10 градусов увеличивается в 1,8 раз (табл.2). Диссоциация происходит без индукции, то есть без задержек – нет эффекта самоконсервации, что согласуется с работой [5].

Таблица 2. Значения констант скорости и энергии активации разложения гидрата фреона, синтезированного из снежной массы

Температура, Т, К	Константа скорости, К, мин$^{-1}$	$E_{акт}$, кДж/моль
283	0,37	38,7±4,5
293	0,83	
298	1,00	

Установлено, что энергия активации реакции разложения гидрата составляет 38,7 кДж/моль, что сопоставимо с реакциями, протекающими с измеримыми скоростями, и следовательно, диссоциация синтезированных из снежной массы гидратов будет идти с технологически регулируемой скоростью при стандартных условиях.

Была получена ДСК-грамма системы «жидкий фреон – дистиллированная вода». Образование гидрата из жидкого фреона происходит при плавлении льда и сопровождается конденсацией избытка газообразного фреона.

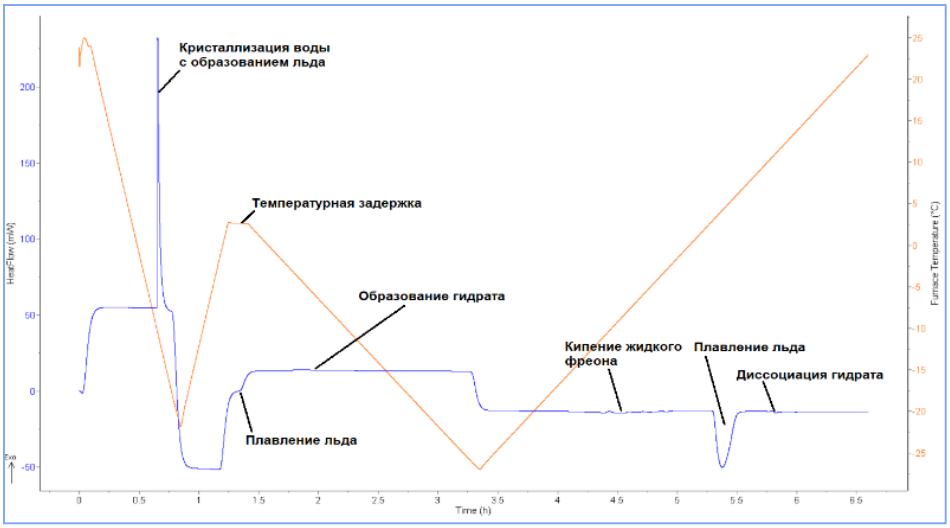


Рис. 4. ДСК-грамма системы «жидкий фреон – дистиллированная вода»

Исходя из данных, была рассчитана степень гидратообразования (табл.3).

Таблица 3. Характеристики диссоциации гидрата фреона, полученного из дистиллированной воды

Параметры	ΔH, Дж/г воды	$T_{нач}$, °C	$T_{кон}$, °C	Степень гидратообразования, %
Значения	108,9	10,8	11,9	5

Была получена ДСК-грамма сегментов охлаждения и нагревания системы «жидкий фреон – раствор $CaCl_2$» в координатах «температура – тепловой поток».

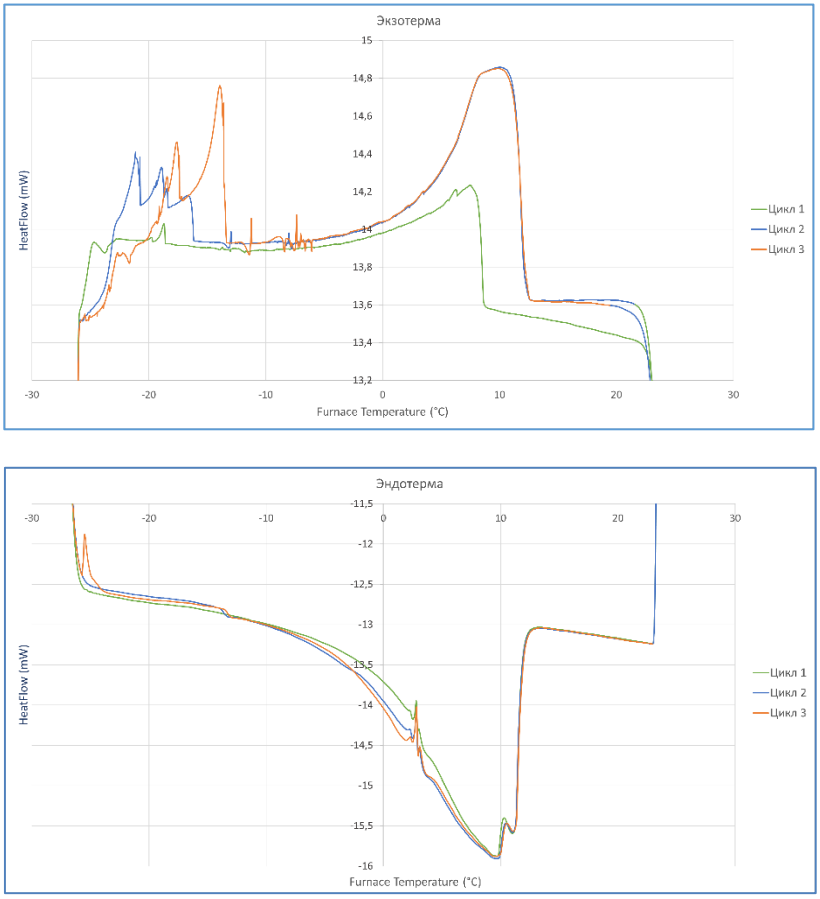


Рис. 5. ДСК-грамма сегментов нагревания/охлаждения системы «жидкий фреон – раствор CaCl2 (30%)» в координатах «температура – тепловой поток»

Во втором цикле температура гидратообразования возрастает, что и сохраняется в третьем цикле, что связано с сокращением периода индукции за счет растворения газа в первом цикле. Температуры диссоциации гидрата во всех циклах сохраняются, что связано с равновесными условиями процесса плавления гидратов. Исходя из данных, была рассчитана степень гидратообразования (табл.4), во втором цикле степень превращения воды в гидрат возрастает, что также связано с предысторией системы.

Таблица 4. Характеристики процессов образования и диссоциации гидрата фреона, полученного из раствора $CaCl_2$

Цикл	$T_{кр}$, °C	$T_{пл}$, °C	$\Delta_{обр}H$, Дж·г$^{-1}$ H_2O	$\Delta S_{обр}$, Дж·г$^{-1}$ $H_2O \cdot K^{-1}$	Степень гидратообразования, %
I	-15,6	9,7	-21,7	-0,077	20
II	-15,9	9,8	-47,9	-0,167	44
III	-15,9	9,6	-44,4	-0,155	41

Таким образом, проведенные исследования кинетики роста и диссоциации гидратов фреона показали:

1. Синтез гидрата фреона можно проводить эффективно при атмосферном давлении и температурах ниже –26 °C из жидкого фреона и снега, тогда как получение гидрата фреона в этих условиях из жидкой воды малоэффективно;
2. Диссоциация синтезированных из снежной массы гидратов будет идти с технологически регулируемой скоростью при стандартных условиях;
3. Показано, что газосодержание гидрата фреона, полученного из снега, составляет 40 мл/1 г воды;
4. Установлены температуры и термодинамические параметры фазовых переходов в системах «жидкий фреон – вода» и «жидкий фреон – эвтектический раствор CaCl2»;
5. Показано влияние предыстории системы на температуры кристаллизации и степень превращения воды в гидрат, что, вероятно, связано с сокращением периода индукции гидратообразования за счет растворения газа в растворе в первом цикле;
6. Установлено, что ингибирующее действие эвтектического раствора составляет в среднем около 25 ºC.

Список литературы

1. Бык, С.Ш. Газовые гидраты / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина. – М.: Химия, 1980. 296 с.
2. Морозов Ю. Занимательная метеорология Д.О. Святского и Т.Н. Кладо / Ю. Морозов // Наука и жизнь. 2009, №2. С.52.
3. Корякина, В. В. Особенности образования и разложения гидратов природного газа в обратных эмульсиях : специальность 02.00.04 «Физическая химия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Корякина Владилина Владимировна ; ФИЦ ЯНЦ СО РАН. Якутск, 2020. 129 с.
4. Мадыгулов, М. Ш. Образование и диссоциация газовых гидратов из замороженных водных растворов поливинилпирролидона : специальность 02.00.04 «Физическая химия» : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Мадыгулов Марат Шаукатович ; ФГБУН ТюмНЦ СО РАН. Тюмень, 2021. 148 с.
5. Madygulov, M. Sh. Study of gas hydrate metastability and its decay for hydrate samples containing unreacted supercooled liquid water below the ice melting point using pulse NMR/Marat Sh. Madygulov, Anatoliy N. Nesterov, Alexey M. Reshetnikov, Valeriy A. Vlasov, Alexey G. Zavodovsky//Chemical Engineering Science. 2015, vol. 137, pp. 287-292.
6. Sloan E. D. Clathrate Hydrates of Natural Gases / E. D. Sloan, C.A. Koh. – 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 752 p.

УДК 504.61; 502:63; 579:69
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-476-479

ИЗУЧЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОРЕМЕДИАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Салтыкова А.Л.[1], Вит А.А.[2], Ерофеевская Л.А.[2]
[1]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН
[2]Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр» СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
E-mail: ny94@list.ru

Аннотация. *Представлен биотехнологический подход к повышению эффективности биоремедиации мерзлотных почв, загрязнённых различными видами нефтепродуктов, с использованием нефтебиосорбента на основе побочных продуктов животноводства и фиторемедиантов, устойчивых к условиям криолитозоны. Установлено, что при разных типах загрязнения применение нефтебиосорбента обеспечивает среднее снижение концентрации загрязняющих веществ на 52–56% за 50 суток, что является хорошим показателем для очистки мерзлых почв. Для фиторемедиации нефтезагрязнённых субстратов рекомендована травосмесь из бодяка щетинистого, кипрея узколистного и костреца безостого, продемонстрировавшая наибольшую способность к формированию и сохранению зелёной биомассы в условиях криолитозоны.*

Ключевые слова: *мерзлотная почва, нефтепродукты, биоремедиация, нефтебиосорбент, фиторемедиация.*

STUDY OF POTENTIAL METHODS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF BIOREMEDIATION IN PERMAFROST CONDITIONS

Saltykova A.L.[1], Vit A.A.[2], Erofeevskaya L.A.[2]
[1]Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia
[2]Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS – Division of Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

Abstract. *A biotechnological approach to enhancing the effectiveness of bioremediation of permafrost soils contaminated with various types of petroleum products is presented, using an oil-biosorbent based on livestock by-products and phytoremediants tolerant to cryolithozone conditions. It was found that for different types of contamination the application of the oil-biosorbent provides an average reduction in contaminant concentration of 52–56% over 50 days, which is a favorable result for remediation of frozen soils. For phytoremediation of oil-contaminated substrates, a grass mixture of Cirsium setosum, Chamerion angustifolium, and Koeleria cristata is recommended, which demonstrated the greatest ability to produce and maintain green biomass under cryolithozone conditions.*

Keywords: *permafrost soil; petroleum products; bioremediation; oil-biosorbent; phytoremediation.*

В результате разливов нефти, ненадлежащего хранения и обращения с горюче-смазочными материалами (ГСМ), а также в процессе добычи и переработки нефти плодородные земли нередко выводятся из сельскохозяйственного использования на длительный срок. Сегодня это представляет собой актуальную экологическую проблему. Нефтезагрязнение повреждает не только почвенный покров, но и растительность, животный мир и водные экосистемы, приводя к долговременным нарушениям в пострадавших экосистемах. Восстановление нефтезагрязнённых территорий – важная часть решения этой проблемы и обеспечения устойчивого экономического развития. В настоящее время ведутся активные исследования по восстановлению биоценозов на аварийных участках с применением различных методов, о чем свидетельствуют многочисленные публикации отечественных и зарубежных авторов [1, с. 133–175; 2, с. 155–161; 3, с. 205–209; 4, с. 210; 5, с. 32–34; 6, с. 8; 7, с. 5; 8, с. 41–43; 9, с. 143–145; 10, с. 125–127]. Тем не менее, несмотря на разнообразие исследований и предлагаемых подходов, на пути их внедрения и масштабирования существуют существенные препятствия. Многие опублико-

ванные работы не раскрывают полных аналитических данных, а сведения о доступных микробных препаратах для ликвидации нефтяных разливов часто ограничены: они либо охраняются коммерческой тайной, либо представлены в рекламных материалах и не прошли практическую проверку. Такое положение осложняет обмен опытом, верификацию результатов и замедляет создание универсальных и доступных решений. Дополнительные трудности возникают из-за специфики нефтезагрязнённых территорий, особенно в условиях Крайнего Севера: удалённость площадок, сложная логистика и дефицит инновационных продуктов и технологий, которые могли бы изготавливаться в промышленных объёмах вблизи мест добычи и переработки нефти [11, с. 243]. В связи с этим разработка эффективных и устойчивых методов реабилитации нарушённых земель в холодном климате остаётся приоритетной задачей, требующей комплексных исследований и системных решений.

Цель настоящих исследований заключалась в поиске эффективного способа биоремедиации почв в условиях криолитозоны.

Материал для исследований. В качестве материала для экспериментов использовали пробы нефтезагрязнённых почв, отобранные на полигоне опытной биоремедиации в криолитозоне, а также нефтебиосорбент на основе побочных продуктов животноводства (Патент РФ № 2816706) и ряд нефтетолерантных растений, перспективных для фиторемедиации мерзлотных почв.

Методы исследований. Отбор проб почвы и пробоподготовку проводили по государственным стандартным методикам [12, 8 с.; 13, 16 с.].

Содержание в почвах нефтепродуктов (НП) определяли в соответствии с утвержденными методами исследования в химии [14, 55 с.; 15, 683 с.; 16, 160 с.].

Микробиологические исследования почв проводили в соответствии с методическими указаниями и рекомендациями общепринятыми в микробиологии [17, 28 с.; 18, 47 с.; 19, 75 с.].

Численность микроорганизмов выражали в колониеобразующих единицах на 1 грамм абсолютно-сухого веса почвы (КОЕ/г АСВ), учитывая, что КОЕ – это единица учета жизнеспособных микроорганизмов: одна КОЕ соответствует одному живому микробному объекту (одной клетке или клеточной группе/колонии), способному дать видимую колонию на твердой питательной среде при посеве и инкубации. При подсчёте числа КОЕ учитывают условия разведения, объем или массу посева и поправляют на сухую массу образца, поэтому результат приводят как КОЕ/г АСВ почвы.

Результаты и обсуждения. Для оценки эффективности нефтебиосорбента в криолитозоне его вносили в почвы в дозе 100 г/м² на участках изначально загрязненных различными видами НП. При разных типах загрязнений среднее снижение концентрации НП в почвах составило 52–56% за 50 суток, что считается положительным результатом для очистки мерзлых почв (рис. 1).

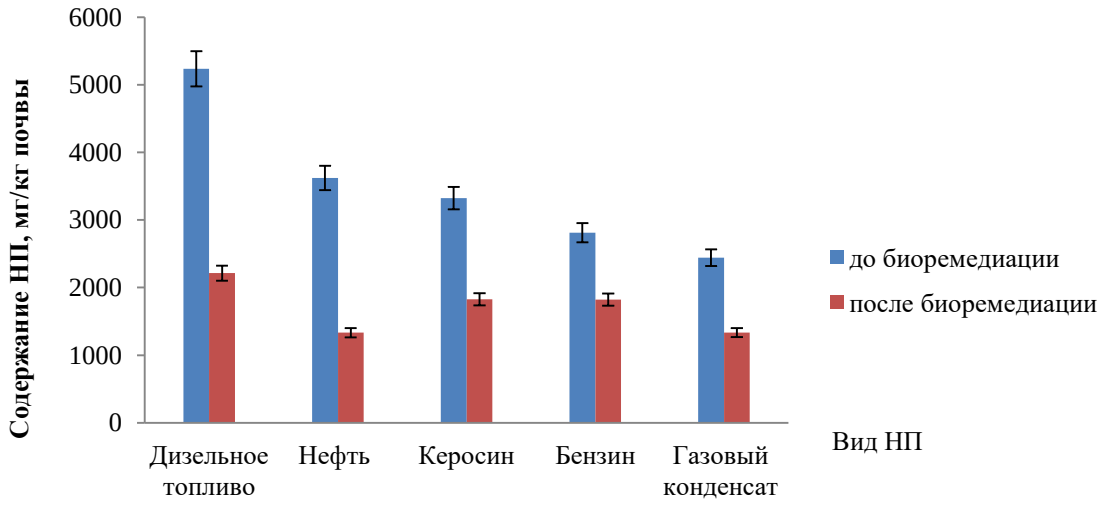


Рис. 1. Снижение концентрации загрязнения в почвах исходно содержащих разные виды НП через 50 суток после биоремедиации

Снижение концентрации нефтезагрязнения в почвах после применения нефтебиосорбента коррелировало с увеличением общей численности почвенных гетеротрофных микроорганизмов, включая углеводородокисляющую микрофлору (рис. 2–3). Это свидетельствует о том, что нефтебиосорбент не

только способствует абсорбции УВ, но и создает благоприятные условия для активности микроорганизмов, способствующих биодеградации нефти.

После того как содержание НП в опытных почвах снизилось до уровня 52–56 % от исходного загрязнения, на участках были посеяны семена местных растений.

Семена в нефтезагрязненные почвы вносили в трёх вариантах:

Вариант 1: Бодяк щетинистый (*Cirsium setosum*) + Кипрей узколистный (*Chamaenérion angustifolium*) + Кострец безостый (*Brōmus inērmis*);

Вариант 2: Ястребинка зонтичная (*Hieracium umbellatum*) + Желтушник левкойный (*Erysimum cheiranthoides*) + Щетинник зелёный (*Setaria viridis*);

Вариант 3: Скерда кровельная (*Crepis tectorum*) + Ястребинка зонтичная (*Hieracium umbellatum*) + Пырей ползучий (*Elytrigia repens*).

Через 12 месяцев после фиторемедиации на всех опытных участках сформировался устойчивый травостой. Наибольшую степень зарастания почвы и более длительное сохранение зелёной массы показал вариант 1 (смесь бодяка щетинистого, кипрея узколистного и костреца безостого).

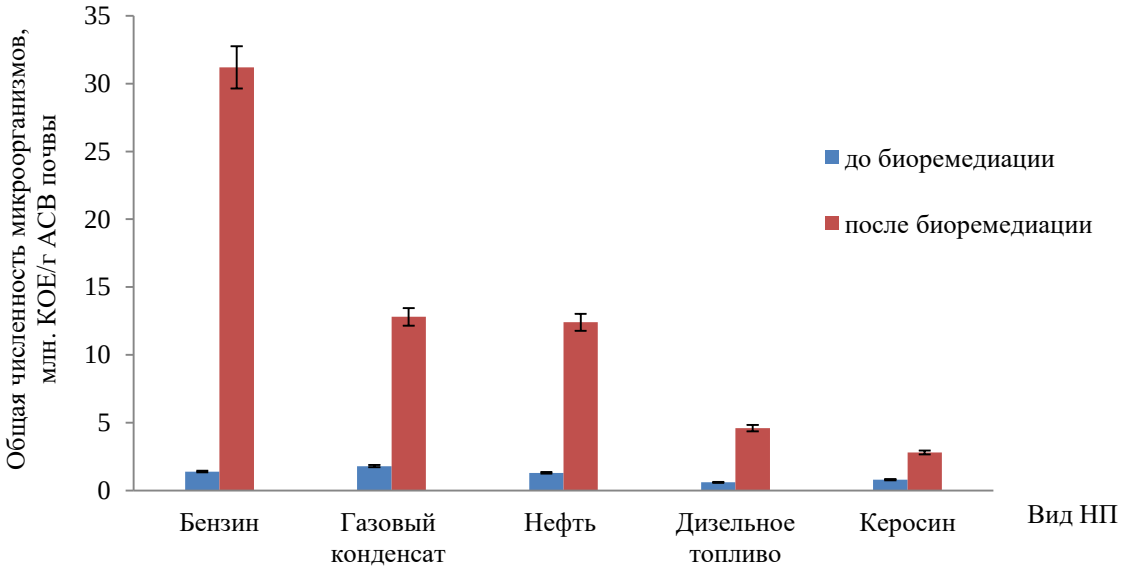


Рис. 2. Изменение общей численности гетеротрофных микроорганизмов в почвах загрязненных разными видами НП через 50 суток после биоремедиации

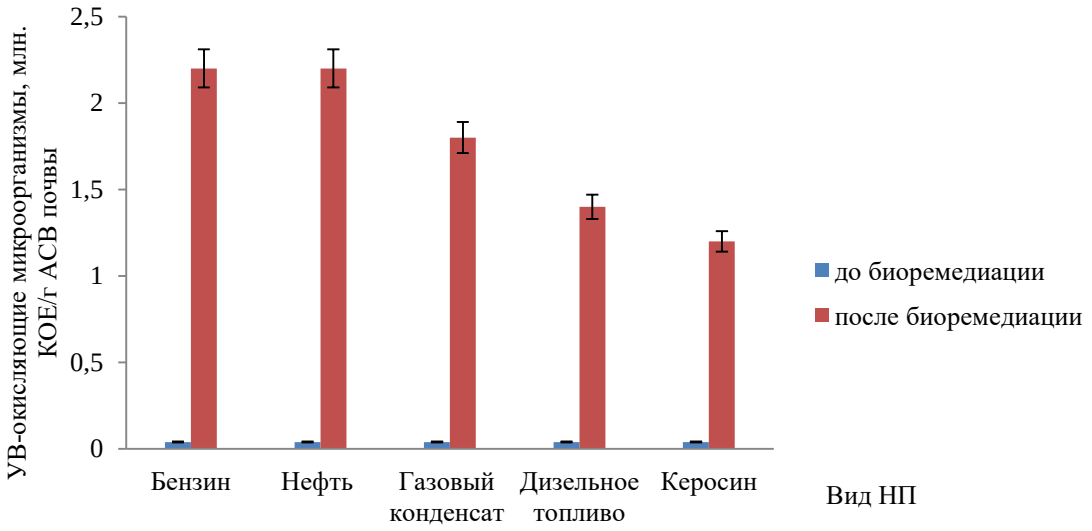


Рис. 3. Изменение общей численности УВ-окисляющих микроорганизмов в почвах загрязненных разными видами НП через 50 суток после биоремедиации

Таким образом, новый подход к биологической рекультивации нефтезагрязненных земель в условиях криолитозоны, основанный на введении в почвы инновационного нефтебиосорбента на основе побочных продуктов животноводства (перегноя) с последующей фиторемедиацией, показал эффективность в природно-климатических условиях Якутии.

Работа выполнена в рамках Проекта Научно-образовательного Центра НОЦ «Север», кластер «Рациональное природопользование в криолитозоне» с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в рамках гранта №13.ЦКП.21.0016.

Список литературы

1. Ruseva A., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Revina S.V., Trushkov A. Ecological state of haplic chernozem after pollution by oil at different levels and remidiation by Biochar // Sustainability. 2023. T.15. № 18. C.133-175.
2. Емельянова Е.К., Алексеев А.Ю., Мокеева А.В., Тарасова М.В., Шестопалов М.А., Карпова Е.В., Забелин В.А., Шестопалов А.М., Ильичева Т.Н. Биорекультивация загрязненных нефтью объектов в Тюменской области // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. 2010. Т.8. №4. С.155-161.
3. Бузырева Н.В., Ташлыкова А.Н. Очистка почвы и водных объектов от нефтепродуктов // В сборнике: Инструмента и механизмы современного инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции: в 5 частях. 2017. С.205-209.
4. Бузырева Н.В., Ташлыкова А.Н., Васина М.В. Сорбенты для очистки почвы и водных объектов от нефтепродуктов // В книге: Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 8-й международной научно-технической конференции, 2018. 210 с.
5. Блинов Р.А. Об очистке водных объектов и почв от нефтепродуктов с помощью природных сорбентов // В сборнике: Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. Юго-Западный государственный университет. 2019. С.32-34.
6. Скворцов А.П. Способы очистки почвы после аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Политехнический молодежный журнал. 2020. №2(43). С.8.
7. Трефилова М.В., Лазыкин А.Г. Отработка способа получения биопрепарата на основе растительно-микробной ассоциации для очистки почв от нефтепродуктов // Advanced Science. 2017. №4(8). С.5.
8. Сопрунова О.Б., Акжигитов А.Ш., Казиев А.А. Микробные биотехнологии ремедиации (очистка) почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами на территории Атырауской области // Молодой ученый. 2014. №20. С.41-43.
9. Рыкова А.В., Казаринова Т.Ф. Микробиологическая очистка почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами // В книге: Социально-экологические проблемы Байкальского региона и сопредельных территорий // Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию высшего биологического образования в Восточной Сибири. Печатается по решению ученого совета биолого-почвенного факультета ИГУ. 2019. С.143-145.
10. Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Трифонов А.А. Опыт очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов // В сборнике: Современные проблемы экологии. XXIV международная научно-практическая конференция. 2020. С.125-127.
11. Ерофеевская Л.А. Разработка способа очистки мерзлотных почв и грунтов от нефтезагрязнений в природно-климатических условиях Якутии: диссертация…кандидата биологических наук: 03.02.08 / Ерофеевская Лариса Анатольевна: [Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет], 2018. 248 с. Дата публикации в реестре: 2020-03-03T18:35:26Z.
12. ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы (ССОП). Почвы. Общие требования к отбору проб. – Введ. 2019-01-01. М.: Стандарт информ, 2018. 8 с.
13. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Введ. 2019-01-01. – М.: Стандарт информ, 2018. 16 с.
14. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений: справ. материалы. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 55 с.
15. Пентин Ю А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003. 683 с.
16. Белл Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 160 с.
17. Методические указания МУК 4.2.3695-21. 4.2. Методы контроля. Биологические и микробиологические факторы. Методы микробиологического контроля почвы (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 2 июня 2021 г.). М.: Издательство: Центрмаг, 2024. 28 с.
18. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почвы: методические рекомендации / Под ред. Ю.М. Возняковской. Л.: ВНИИСХМ, 1987. 47 с.
19. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Издательство МГУ, 1991. 75 с.

УДК 622.692.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-480-482

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Сильвестров С.А.
ООО «Астрапроект», г. Казань
E-mail: SilvestrovS@mail.ru

Аннотация. *Обеспечение условий длительной безопасной работы подземных газонефтепроводов, исключающих проведение дорогостоящих ремонтов с переукладкой участка или заменой участков является приоритетной задачей эксплуатирующей организации. В связи с этим, в настоящее время в дополнение к методам анализа на основе положений механики деформируемого твердого тела находит развитие подход, основанный на построении кинетической модели изменений пространственного положения трубопровода, что относится к кинематике твердого тела.*

В работе рассматривается совершенствование методов исследования перемещений магистральных газонефтепроводов при длительной эксплуатации на основе кинетической модели. Результатом предложенного совершенствования является возможность более точного прогнозирования геометрии трубопровода на определенный период времени, наличие величины доверительного интервала для каждой прогнозной реализации.

Ключевые слова: *магистральный трубопровод, газонефтепровод, кинетическая модель.*

APPLYING THE KINEMATIC MODEL FOR HIGH-PRECISION DISPLACEMENT DETECTION IN MAIN GAS AND OIL PIPELINES EXPOSED TO LONG-TERM OPERATION

Silvestrov S.A.
«Astraproject» Ltd

Abstract. *Long-term safe operation of underground gas and oil pipelines is major priority for operating organizations, allowing them to minimize high-cost repairs (rerouting or section replacement). For this reason, current advancements in pipeline deformity analysis are focused on combining kinematic models of pipeline spatial dynamics, based on rigid body kinematics, and the mechanics of deformable solids.*

Our paper investigates options to apply the kinematic model for improved displacement detection in main gas and oil pipelines exposed to long-term operation. The technical improvement proposed in the paper ensures more accurate simulation of pipeline geometry changes over a specified time, including the confidence interval value for each simulation run.

Keywords: *main pipeline, gas and oil pipeline, kinematic model.*

При расположении магистральных газонефтепроводов на слабонесущих, многолетнемерзлых и подвижных грунтах существует опасность нарушения защитной изоляции, образования гофр, что увеличивает риск разрушения трубопровода. Одной из общеизвестных причин нарушения изоляции является большие значения передвижения трубопровода в процессе эксплуатации, что характерно для случаев нестабилизированного пространственного положения. Особую актуальность представляет изучение перемещений трубопровода первые 3–4 года эксплуатации, когда происходят процессы первичного уравновешивания взаимодействий с грунтом, и при длительной, более 20 лет эксплуатации, когда накопленные деформации геометрии начинают приобретать большую значимость.

Как правило, анализ положения подземного газонефтепровода с целью предотвращения недопустимых деформаций производится на основе положений механики деформируемого твердого тела. В настоящее время находит развитие подход, основанный на построении кинетической модели изменений пространственного положения трубопровода, что относится к другому разделу – кинематике твердого тела.

Целью работы является совершенствование методов исследования перемещений магистральных газонефтепроводов при длительной эксплуатации на основе кинетической модели для приведения подземного трубопровода в стабилизированное состояние.

Методы анализа пространственного положения газонефтепроводов, основанные на сопротивлении материалов, имеют следующие подходы:

1. Линейная постановка задачи и решение уравнений продольно-поперечного изгиба стержней. ТП представляется как комбинация прямолинейных труб и кривых вставок [1].

2. Решение задачи НДС построением математической модели с нелинейными геометрическими соотношениями на основе теории механики сплошной среды [2]. В модели продольная осевая линия стержня с начальной кривизной жестко связывается с криволинейной подвижной лагранжевой системой координат и учитывает возможные изменения схемы нагружения в результате смещения ТП.

3. Модификация метода конечных элементов с введением понятий узловых и стержневых элементов [2]. Эта модель определяет перемещения ТП как движение узловых элементов, НДС определяется расчетом матриц жесткости и вектора краевых обобщенных усилий стержня.

Методы анализа пространственного положения газонефтепроводов, основанные на кинематике:

4. Метод решения дифференциальных уравнений равновесия К.М. Гумерова [3,4].

5. Построение математической модели и приближенное решение уравнений кинематики и динамики подземного трубопровода [5,6].

6. Способ прогнозирования изменений пространственного положения магистрального *трубопровода на основе кинетической модели [7].*

Основной парадигмой основанных на кинематике методов является обеспечение стабилизированного состояния пространственного положения магистральных газонефтепроводов.

Методы 1–3 на основе механики твердого тела (сопромат) в совокупности учитывать конструкцию ТП, пространственную локацию на пересеченной местности, собственный вес и эксплуатационные нагрузки, грунтовые условия, деформации растяжения-сжатия совместно с грунтом.

Метод 4 – решения дифференциальных уравнений равновесия К.М. Гумерова – позволяет исследовать перемещения трубопровода под действием внешних и внутренних воздействий.

Метод 5 – построение математической модели и приближенное решение уравнений кинематики и динамики – позволяет описывать медленное движение осевой линии подземного трубопровода с учетом конечности перемещения и оценить НДС оболочки.

Общей характеристикой методов 1–5 является отсутствие возможности оценки перемещения каждого отдельного участка по времени и сложность определения воздействий на границах рассматриваемого участка, эти задачи можно решить методом 6 – прогнозированием изменений пространственного положения трубопровода на основе кинетической модели.

Метод на основе кинетической модели позволяет исследовать эволюцию за период эксплуатации и прогноз изменений пространственной геометрии подземного трубопровода, получить величину упругой энергии каждого участка для оценки НДС методами 1–4. Такие возможности позволяют совершенствовать методы исследования перемещений магистральных газонефтепроводов для решения задачи ремонта магистральных газонефтепроводов методом математического моделирования пространственной кинетики [4].

Ниже рассмотрим порядок ремонта магистральных газонефтепроводов методом математического моделирования пространственной кинетики.

По термином: кинетическая модель изменения пространственного положения трубопровода, – принимается формальная структура, представленную в виде математических формул и диаграмм, раскрывающая перемещения трубопровода с течением времени вследствие процессов, обусловленных стремлением любых трубопроводов к переходу в состояние равновесия [7].

Под термином: сегмент, – принимается элемент трубопровода в виде трубы (или участок меньше длины трубы), трубной секции) или детали трубопровода [7], имеющей параметры стержня и объемной детали.

Для построения кинетической модели принимается стержневая модель трубопровода в виде объемной магистрали последовательно соединенных сегментов. Принимается, что система грунт-труба предоставлена самой себе и перемещения трубопровода, направленные на достижение состояния равновесия, идут постоянно.

Перемещения трубопровода рассматриваются как движение каждого пронумерованного сегмента в течение времени эксплуатации. Описание трассы в виде гладкой кривой позволяет вычислять положение сегментов по выборочным измерениям неполного количества сегментов.

На первом этапе производится измерение текущего пространственного положения трубопровода и формирование прогноза в следующем порядке:

- Сбор данных;
- Измерение координат сегментов;
- Построение цифровой топографической модели (далее ЦТМТ);
- Сглаживание сплайном каждого ЦТМТ;
- Вывод уравнений эволюции сегментов;
- Вычисление прогнозное положение сегментов;
- Оптимизация по алгоритму фильтра Кальмана;
- Построение прогнозного сплайна;
- Определение прогноза изменений положения;
- Формирование отчета.

Отчет содержит:

• Координаты трубопровода: текущие, прогнозные, изменение;

• Кривизна сегментов: текущая, прогнозная, изменение;

• Вероятность реализации прогноза;

• Показатель свободной энергии трубопровода на единицу длины на установленный момент времени.

На втором этапе производится исследование существующей кинетики пространственного положения методом последовательных нагружений.

• Выбираются характерные подвижные и неподвижные участки для измерений координат;

• Устанавливается минимальное рабочее давление в трубопроводе;

• Последовательно с заданным шагом увеличивая нагрузку давление увеличивается до рабочего, с одновременным измерением перемещений.

• Определяются значения перемещений и напряжений в любом сечении трубопровода в зависимости от изменения его геометрии.

На третьем этапе строится математическая модель кинетики для определения требуемых взаимодействий для обеспечения движения трубопровода к пространственному положению, соответствующему условиям безопасной эксплуатации. Для этого рассматриваются характерные подвижные и неподвижные участки, определяются участки, где требуется изменение величины или типа взаимодействий.

На четвертом этапе разрабатывается комплекс ремонтных мероприятий, такие, как: ***п***рименение утяжелителей, анкеров, конструкций и способов балластировки, заложение трубопровода ниже глубины деформаций грунта и т. п. Применяются требуемые взаимодействия для обеспечения движения трубопровода к пространственному положению, соответствующему условиям безопасной эксплуатации.

Таким образом, рассмотренный порядок ремонта магистральных газонефтепроводов основан на совершенствовании методов исследования перемещений трубопроводов на основе кинетической модели для приведения подземного трубопровода в стабилизированное состояние; метод имеет целесообразность применения как при длительной эксплуатации, так и для вновь построенных трубопроводов.

Выводы. Исследование геометрии трассы подземных газонефтепроводов, основанный на построении кинетической модели изменений пространственного положения, позволяет разработать мероприятия по обеспечению стабилизированного состояния в течение всего периода эксплуатации.

Преимуществом предложенного совершенствования является возможность более точного прогнозирования геометрии трубопровода на определенный период времени, наличие величины доверительного интервала для каждой прогнозной реализации.

Список литературы

1. Азметов Х.А, Матлашов И.А., Гумеров А.Г. Прочность и устойчивость подземных трубопроводов / Под ред. А.Г. Гумерова. СПб.: ООО «Недра», 2005. 248 с.
2. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. Том 1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов. / А.М.Шаммазов, Р.М.Зарипов, В.А.Чечелов и др. М. Интер, 2005. 706 с.: илл. 191 (с.8).
3. Определение и прогнозирование напряженно-деформированного состояния трубопровода с учетом грунтовых изменений в процессе эксплуатации /А.К. Гумеров [и др] //Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т.10. № 4. С.372-378.
4. Сильвестров С.А., Кантемиров И.Ф. Ремонт магистральных нефтегазопроводов методом математического моделирования пространственной кинетики в условиях холодного климата. Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур «EURASTRENCOLD-2023», посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова. Редакционная коллегия: чл.-корр. РАН Лебедев М.П., Лукин Е.С. к.т.н. (отв. редактор), Протодьяконова Н.А. к.ф.-м.н., Иванов А.Р. к.т.н., Ильин Г.Ю. Якутск, 2023. https://cloud.mail.ru/stock/3THGcwL7Z6WExFKAUnH9o8Jy .
5. О.П. Ткаченко. Кинематика и динамика подземного трубопровода при конечных перемещениях. Вычислительные технологии Том 8, № 4, 2003 (с.97-107).
6. О.П. Ткаченко. Внешняя и внутренняя задачи динамики изогнутого трубопровода – построение математических моделей и приближенное решение их уравнений: дис. доктор физико-математических наук: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Хабаровск. 2012. 332 с.
7. Сильвестров С.А., Чистяков Д.В., Сильвестров А.С., Кантемиров И.Ф. Описание изобретения «Способ прогнозирования изменений пространственного положения магистрального трубопровода на основе кинетической модели». Уведомление о приеме и регистрации заявки от 09.07.2025г вх. № W25044715, рег.№ 2025118958. ФИПС, www.fips.ru/registers-web.
8. А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, К.М. Гумеров. Безопасность длительно эксплуатируемых магистральных нефтепроводов.. М.: ООО «Недра-бизнесцентр», 2000. 310- с.

УДК 621.316.99
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-483-485

ЗАЗЕМЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: a.m.khoiutanov@mail.ru

Аннотация. *В данной статье приведен анализ условий арктической части Республики Саха (Якутия), дана краткая характеристика проектов промышленного освоения. Одним из главных вопросов в сложных климатических условиях для промышленной отрасли встает эффективное и надежное электро- и теплоснабжение. Надежная эксплуатация системы электроснабжения невозможна без рабочей системы защиты ее элементов, к которым относится и заземление. В статье приведен анализ возможных методов заземления в условиях многолетней мерзлоты*
Ключевые слова: *заземление, арктическая зона, криолитозона, вечная мерзлота*

GROUNDING OF ELECTRICAL INSTALLATIONS IN THE CRYOLITHOZONE

Khoiutanov A.M., Davydov G.I.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *This article provides an analysis of the conditions in the Arctic part of the Republic of Sakha (Yakutia) and a brief description of industrial development projects. One of the main challenges in challenging climatic conditions for the industrial sector is ensuring efficient and reliable electricity and heat supply. Reliable operation of the power supply system is impossible without a working system of protection of its elements, which includes grounding. The article provides an analysis of possible methods of grounding in the conditions of permafrost***.**
Keywords: *grounding, Arctic zone, cryolithozone, permafrost*

В Республике Саха (Якутия) к Арктической зоне отнесены 13 районов: Абыйский, Анабарский, Аллаиховский, Булунский, Верхнеколымский, Верхоянский, Жиганский, Момский, Нижнеколымский, Оленекский, Среднеколымский, Усть-Янский, Эвено-Бытантайский. Из них 7 полностью находятся за линией Северного полярного круга, а территория других 6 районов пересекает Северный полярный круг. Одной из главных целей государственной политики Российской Федерации в Арктике в сфере социально-экономического развития является расширение ресурсной базы способной в значительной степени обеспечить потребности в углеводородных ресурсах, водных биологических ресурсах и других видах стратегического сырья. Более 200 месторождений различных видов минерального сырья, в том числе 16 алмазных, более 120 золотоносных, более 30 оловянных, около 10 угольных, редкоземельных и других месторождений. На территории Республики Саха (Якутия) к проектам промышленного освоения отнесены лицензионные участки ОАО НК «Роснефть» («Анисинско-Новосибирский», «Усть-Оленекский», «Усть-Ленский»), геологическое изучение и освоение Западно-Анабарского участка, освоение месторождений россыпного олова на ручье Тирехтях, Томторского месторождения редкоземельных металлов, золоторудного месторождения «Кючус», увеличение мощности Зырянского угольного разреза на участке «Надеждинский». А также предусмотрены реконструкция, модернизация и строительство до 2020–2030 гг. различных проектов инфраструктуры Северо-Якутской опорной зоны. Для развития промышленного освоения в арктической территории встает вопрос надежного электроснабжения предприятий. Понятие надежности основано на сохранении во времени в установленных пределах значений всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения, транспортирования. В условиях распространения многолетней мерзлоты и холодного климата в зимний период времени встает вопрос обеспечения надежного заземления. Под мнимой простотой понятия заземления скрывается клубок сложнейших и нерешенных проблем. Сотрудникам эксплуатационных служб, а также организаций, осуществляющих проектирование, монтаж системы заземления в районах со сложными грунтами, важно понимать, с какими проблемами можно столкнуться при устройстве контура заземления. Наличие параметров, которые подвергаются значительным изменениям в течение календарного года, значительно усложняют достижение требуемого стабильного сопротивления растеканию тока в грунте. Так как все технологическое оборудование на промышленных предприятиях должно быть заземлено, слабые места, недосмотры и экономия в данной области в боль-

шинстве случаях приводят к отказу дорогостоящей техники и простоям рабочих процессов, что, особенно в условиях низких северных температур, крайне нежелательно. Важнейшими техническими задачами энергетики отрасли в целом являются: обеспечение безопасности обслуживающего персонала; безаварийная работа электрических систем и установок; молниезащита зданий, различных сооружений и линий связи, в том числе с помощью устройства надежных заземляющих устройств (ЗУ), удовлетворяющих требованиям Правил устройств электроустановок (ПУЭ) [1] в течение всего года. В северных регионах России, особенно в северо-восточной ее части и на Дальнем Востоке, устройство заземлений сопряжено с рядом дополнительных трудностей, связанных с наличием многолетнемерзлых грунтов, а также галечниковых и скальных пород. В таких условиях надежность заземления зависит в первую очередь от правильного учета геоэлектрической структуры грунтов, величины удельного электрического сопротивления земли, правильного выбора оптимального метода расчета заземляющих устройств и их рациональных конструкций. Проблема снижения сопротивления растеканию тока заземляющих устройств в грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением выходит на первый план. Так, в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов выполнение ЗУ в соответствии с требованиями ПУЭ сопряжено с дополнительными трудностями, обусловленными высокими затратами, составляющими 30–35% сметной стоимости объекта [2]. С учетом данного факта, что до 50% территории РФ находится в зоне вечной мерзлоты, снижение капиталовложений за счет рациональных конструкций заземлителей и методов их выполнения, а также повышение надежной работы энергосистем и обеспечение безопасности персонала является актуальной задачей.

На сегодняшний день известны множество способов решения проблем заземления в высокоомных грунтах, основными из которых являются:

1. Понижение естественного сопротивления грунта путем добавления в него минеральных солей рядом с электродом заземления. Соль, смешиваясь с грунтовой влагой, превращается в электролит, тем самым улучшается электропроводность грунта и понижается температура замерзания.
2. Замена части грунта вокруг электрода засыпкой с высокой электропроводностью (угольная обработка, засыпка коксовой мелочью и т. п.).
3. Применение глубинных заземлителей.
4. Помещение заземлителей в непромерзающие водоемы и талые зоны.
5. Создание искусственных таликовых зон.

Перечисленные способы заземления имеют ряд существенных недостатков. По первому способу, то есть добавление раствора поваренной соли рядом с электродом, в большинстве случаев выполнение контура заземления производится из черной углеродистой стали, соль вызывает очень сильную коррозию материала электрода, при этом такие электроды служат не более 6-8 лет. Со временем концентрация электролита в грунте понижается за счет миграции солей из грунта весенним таянием и после дождей в летний период, в результате чего снижается срок эффективной работоспособности электрода до 40% за 3–4 года. По второму способу, замене высокоомного слоя грунта вокруг электрода грунтом с более высокой электропроводностью является сложным и дорогостоящий мероприятием и используется довольно редко – чаще всего из-за удаленности объектов и, как правило, отсутствия в наличии требуемого объема замещающего грунта, а также вследствие дороговизны и проблем своевременной доставки грунта на объект. Применение глубинных заземлителей предусматривает бурение глубоких (от десятков до сотен метров) скважин с последующей установкой стальной шины и засыпкой ее глинисто-песчаной смесью с хлоридом натрия. Таким образом, обязательно наличие на площадке специальной бурильной техники. Данный вид работ является очень дорогим за счет значительного увеличения трудозатрат, связанных с бурением, установкой обсадных труб и прочих работ. Стоимость устройства подобного заземления еще больше возрастает при производстве работ в скальных и галечниковых грунтах. Также существует проблема наличия значительной погрешности при замере сопротивления глубинных электродов. Это происходит в основном из-за разнородности грунта по составу и структуре. Таким образом, потребитель, уверенный в достижении требуемого сопротивления грунта, в результате оказывается далек от истины. Кроме того, при воздействии токов большой величины (10–20 кА) – например при грозовом разряде – более значимой является такая характеристика заземляющего электрода, как скорость нейтрализации разряда, чем, собственно его удельная электропроводность. В этом случае контур из нескольких коротких электродов большого диаметра более эффективен, чем контур из глубинных заземлителей. Вынос заземлителя на непромерзающее дно озера, реки или моря в зоне многолетней мерзлоты – это вынос заземлителя в подозерный или подрусловый талики. Соединение заземлителя с заземляемым устройством осуществляется воздушной или кабельной линией, линией из полосовой стали, проложенной в траншее. В качестве заземлителя используют уложенную на дно водоема сетку из проводников, либо плоскую конструкцию в виде гребенки, электродами которой являются как зубья «гребенки», так и коллектор этих зубьев в виде лучевой звезды. Исходя из условий не промерзания водоема, выносные заземлители рекомендуют устраивать в водоемах, имеющих поверхность площадью не менее 0,28 км^2 и глубину не менее 2 м [3]. Недостаток выносных заземлителей – в

ограниченных возможностях их выполнения, обусловленных тем, что непромерзающие полностью в зимний период водоемы, а также наличие под ними таликов имеют в северных территориях ограниченное распространение. Выполнение выносных заземлителей экономически целесообразно лишь при наличии непромерзающих полностью водоемов или таликов под ними на небольшом расстоянии от заземляемого объекта. Общеизвестно, что с уменьшением температуры – удельное сопротивление грунта резко возрастает. Так для суглинка при +10°С оно не превышает 100 Ом*м, однако при температуре в –10 °С может достигать 500–1000 Ом*м. Так, при температуре ниже нуля грунт резко повышает свое удельное сопротивление, это связано с переходом воды в другое агрегатное состояние (из жидкого в твердое), при этом 196 почти прекращаются процессы переноса заряда ионами солей и кислотными (щелочными) остатками. Для вечномерзлого слоя, температура которого составляет –3 – –5 °С, характерно удельное сопротивление в 10–50 тысяч Ом*м. Кроме крайне высокого удельного сопротивления, для многолетнемерзлого грунта характерно такое свойство, как «пучение» любых посторонних объектов. То есть заземлитель, смонтированный в область вечной мерзлоты, будет через некоторое время вытеснен из этой зоны, нарушая при этом целостность контура заземления.

Одним из наиболее эффективных путей уменьшения сезонного изменения сопротивления заземления в условиях холодного климата и многолетнемерзлых грунтов является сохранение части среды, вмещающей заземлители, в талом состоянии в зимний период времени, при котором негативное влияние сил вертикальной деформации, то есть «пучение» грунта будут отсутствовать. В этом случае сезонные изменения сопротивления заземления будут определяться сезонным изменением объема таликовой зоны, которая сохранится к началу сезонного протаивания. Сохранение или искусственное создание таликовых зон в мерзлых породах и их электропроводность эффективно управляются с помощью электроподогрева. Методами снижения сезонных вариаций сопротивления заземления электроподогревом путем использования греющего кабеля или пропусканием тока между заземлителями занимались В.С. Якупов, В.Н. Грачев, Ю.Г. Шасткевич [4] и др. Главным недостатком данных методов является непрерывная работа греющих элементов, которые обусловливают высокие эксплуатационные затраты потребления электроэнергии. Таким образом, на основе выполненного анализа методов и средств снижения сопротивления растеканию тока авторами предлагается метод электроподогрева грунта на основе электродов-нагревателей коаксиальной конструкции, как наиболее эффективный, но при этом с минимальными эксплуатационными затратами. Электроды-нагреватели представляют собой разновидность стальных нагревателей для низкотемпературного нагрева. В простейшем случае коаксиальный электрод-нагреватель – это две соосно (коаксиально) расположенные трубы (одна в другой) или стержень в трубе с электрической изоляцией между ними, с одной стороны, концы проводников сваривают, а к другим (противоположным) подводят напряжение. Таким образом, электрический ток во внутреннем и наружном проводниках протекают в противоположных направлениях. Поэтому при взаимодействии электромагнитных полей близко расположенных проводников в них возникает эффект вытеснения электрического тока к обращенным друг к другу поверхностям проводников. При этом на наружной поверхности внешнего проводника электромагнитное поле отсутствует, и нагреватель при безопасных напряжениях не требует электрической изоляции. Эта особенность коаксиального электрода-нагревателя позволяет его помещать непосредственно в нагреваемую среду.

К достоинствам коаксиальных электродов-нагревателей относятся их надежность и долговечность, а эти качества особенно важны при использовании их в заземляющих устройствах электроустановок. Размещение контура заземления в деятельном слое в комплексе с электродами-нагревателями коаксиальной конструкции решает проблему обеспечения круглогодично низкого сопротивления растеканию тока в земле. Основную функцию заземляющего устройства принимают на себя коаксиальные электроды-нагреватели, связанные с главным контуром.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. Подготовлено ОАО «ВНИИЭ» Утверждено Министерством энергетики Российской Федерации, приказ от 8 июля 2002 г. № 204.
2. Васильев П.Ф., Кобылин В.П., Седалищев В.А., Ли-Фир-Су Р.П. Методы снижения сопротивления растеканию тока в многолетнемерзлых грунтах // Изв. РАН. Энергетика. 2008. №1. С.117-121.
3. Якушев М.В., Дудинов В.А., Ершов Н.Л., Яныгин В.Н. Рекомендации по проектированию и сооружению заземляющих устройств электроустановок напряжением 0,4-35 кВ для районов Якутской АССР. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1988. 124 с.
4. Якупов В.С., Грачев В.Н., Шасткевич Ю.Г. Управление сезонными вариациями сопротивления заземлений. Якутск: Якутское кн. изд-во, 1983. 68 с.

УДК 621.311
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-486-487

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ

Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: a.m.khoiutanov@mail.ru

Аннотация. *Оптимизация режимов энергопотребления представляет собой одну из важнейших задач, стоящих перед энергетическими системами регионов Крайнего Севера и Арктики. Сложные климатические условия, удаленность территорий от центральных энергосистем и высокая стоимость доставки топлива создают дополнительные трудности в обеспечении стабильного энергоснабжения населения и промышленности. Настоящая статья посвящена поиску возможностей повышения энергоэффективности и надежности энергообеспечения северных регионов путем оптимизации режимов потребления энергии.*

Ключевые слова: *Север, Арктика, энергоснабжение, оптимизация, энергоэффективность, возобновляемая энергетика.*

OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION REGIMES IN THE NORTH AND ARCTIC REGIONS

Khoiutanov A.M., Davydov G.I.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *Optimization of energy consumption regimes is one of the most important tasks facing the energy systems of the Far North and Arctic regions. Difficult climatic conditions, remoteness of territories from central energy systems, and high cost of fuel delivery create additional difficulties in ensuring stable energy supply for the population and industry. This article focuses on exploring opportunities to improve energy efficiency and reliability in the northern regions by optimizing energy consumption patterns.*

Keywords: *North, Arctic, energy supply, optimization, energy efficiency, renewable energy.*

Энергоснабжение районов Крайнего Севера и Арктической зоны отличается рядом особенностей, обусловленных суровыми природно-климатическими условиями и специфическим характером эксплуатации оборудования. Основные проблемы включают низкую температуру окружающей среды, короткий световой день зимой, высокие ветровые нагрузки и снеговые заносы. Все это значительно увеличивает нагрузку на системы теплоснабжения и электропитания, сокращает срок службы оборудования и повышает расходы на эксплуатацию инфраструктуры. Повышение эффективности энергоснабжения северян является приоритетной задачей, поскольку энергетика играет ключевую роль в социально-экономическом развитии региона. Важно учитывать влияние изменений климата, необходимость внедрения возобновляемых источников энергии и современные технологии управления потреблением электроэнергии.

Климатические особенности оказывают значительное воздействие на функционирование энергетической инфраструктуры:

– экстремально низкие температуры: средняя температура воздуха зимой достигает −40∘C−40∘C и ниже, что требует дополнительного расхода тепловой энергии на обогрев зданий и поддержание технологических процессов.

– продолжительная полярная ночь: в зимний период продолжительность светового дня минимальна, что создает повышенную потребность в искусственном освещении и дополнительном электрическом отоплении.

– высокие ветровые нагрузки: ветры усиливают теплопотери зданий и увеличивают износ линий электропередач.

– интенсивные снегопады и ледяные образования: эти явления приводят к повреждениям коммуникаций и затрудняют ремонтные работы.

Традиционно энергоснабжение населенных пунктов и промышленных объектов в регионах Крайнего Севера осуществляется за счет котельных и дизельных электрических станций (ДЭС), работающих преимущественно на привозном топливе. Энергосистемы характеризуются слабым уровнем

интеграции друг с другом и централизацией производства тепла и электричества. Такие обстоятельства делают систему уязвимой к перебоям поставок топлива и требуют значительных расходов на транспортировку ресурсов. При этом использование местных видов топлива остается ограниченным ввиду недостаточной развитости технологий переработки и отсутствия соответствующей инфраструктуры.

Для снижения затрат на производство и потребление энергии предлагается ряд методов и подходов, направленных на повышение энергоэффективности и устойчивости функционирования энергосистем:

– оптимизация структуры генерирующих мощностей. Использование гибридных электростанций и комбинированных теплоэлектростанций (когенерация) позволяет одновременно производить электроэнергию и тепловую энергию, снижая общий расход топлива примерно на 30%. Это особенно актуально для малых поселений, где локальные котельные неэффективны экономически и экологически. Применение современных решений газовых турбин и парогазовых установок обеспечивает высокий КПД преобразования энергии топлива в электричество и тепло, повышая надежность энергоснабжения и экономичность эксплуатации.

– использование альтернативных источников энергии (ВИЭ). Северные регионы обладают значительным потенциалом развития возобновляемой энергетики благодаря высоким показателям инсоляции летом и устойчивым ветровым потокам. Развитие солнечной и ветровой энергетики позволит снизить зависимость от традиционных углеводородных ресурсов и повысить устойчивость энергоснабжения. Однако внедрение возобновляемых источников связано с техническими трудностями, такими как низкая эффективность солнечных панелей в зимнее время и сложность обслуживания ветроустановок в сложных климатических условиях.

– повышение энергоэффективности потребителей. Одним из наиболее эффективных способов экономии энергии является модернизация жилищного фонда и общественных учреждений с целью уменьшения потерь тепла. Применение теплоизоляционных материалов, установка пластиковых окон и дверей, утепление фасадов позволяют существенно сократить затраты на отопление жилых помещений. Также важно внедрять автоматизированные системы учета и контроля энергопотребления, позволяющие своевременно выявлять потери и регулировать режимы подачи теплоносителей.

– совершенствование сетей передачи и распределения энергии. Современные интеллектуальные сети (smartgrid, microgrid) способны оптимизировать распределение электрической энергии, минимизировать технологические потери и обеспечивать стабильность напряжения даже при резких изменениях погодных условий. Установка автоматических регуляторов мощности, мониторинг состояния электросетей с использованием дистанционной диагностики и контроль качества электроэнергии повышают общую надежность энергосистемы.

Проблема эффективного энергопотребления в условиях севера и Арктики имеет комплексный характер и требует интегрированного подхода к решению вопросов организации и модернизации энергетического хозяйства. Для устойчивого развития регионов необходима разработка новых технических решений, адаптация существующих технологий к местным условиям и реализация мер по повышению энергоэффективности предприятий и организаций. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на разработке специализированных моделей и алгоритмов оптимизации режимов энергопотребления, учитывающих региональные особенности и изменения глобального климата. Только комплексное применение инновационных технологий позволит обеспечить надежный доступ к энергоресурсам и создать комфортные условия проживания и труда в экстремальных природных зонах нашей страны.

Список литературы

1. Zhou X., Guo T., Ma Y. An overview on Microgrid technology // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2015, pp. 76-81. doi: 10.1109/ICMA.2015.7237460
2. Real-World MicroGrids-An Overview / M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, N. Hatziargyriou, T. Green // IEEE International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2007, pp. 1-8. doi: 10.1109/SYSOSE.2007.4304255
3. Zaidi A.A., Kupzog F. Microgrid automation – a selfconfiguring approach // IEEE International Multitopic Conference. IEEE, 2008, pp.565-570. doi: 10.1109/INMIC.2008.4777802

УДК 621.382
DOI 10.24412/CL-37460-2025-1-488-491

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ УСТАНОВОК С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Хоютанов А.М., Давыдов Г.И.
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: a.m.khoiutanov@mail.ru

Аннотация: *Опыт эксплуатации электродных водогрейных котлов в системах отопления и горячего водоснабжения жилых зданий показал, что отсутствие регулирования развиваемой котлами мощности ведет к резкому увеличению количества оперативных отключений; снижает надежность работы звеньев систем электро-теплоснабжения, способствует значительному перерасходу энергии. Задача регулирования мощности усложняется сезонными колебаниями удельного сопротивления воды и зависимостью его от температуры.* ***С*** *целью упрощения схемы управления в системах горячего водоснабжения с низковольтными водогрейными электродными котлами целесообразно применять двух- или трехпозиционные способы регулирования.*

Ключевые слова: *теплоснабжение, надежность, электродный водогрейный котел, тиристорный регулятор мощности.*

AUTOMATIC REGULATION OF THE POWER OF ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS USING THYRISTOR SWITCHES

Khoiutanov A.M., Davydov G.I.
Federal Research Center «Yakut Scientific Center» of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. The experience of operating electrode water heating boilers in heating and hot water supply systems of residential buildings has shown that the lack of regulation of the power developed by the boilers leads to a sharp increase in the number of operational shutdowns; it reduces the reliability of the links in the electrical and thermal supply systems, and contributes to significant energy overconsumption. The task of power regulation is complicated by seasonal fluctuations in the specific resistance of water and its dependence on temperature. In order to simplify the control scheme in hot water supply systems with low-voltage water heating electrode boilers, it is advisable to use two- or three-position control methods.

Keywords: heat supply, reliability, electrode water heating boiler, thyristor power regulator.

Опыт эксплуатации электродных водогрейных котлов в системах отопления и горячего водоснабжения жилых зданий показал, что отсутствие регулирования развиваемой котлами мощности ведет к резкому увеличению количества оперативных отключений; снижает надежность работы звеньев систем электро-теплоснабжения, способствует значительному перерасходу энергии. Задача регулирования мощности усложняется сезонными колебаниями удельного сопротивления воды и зависимостью его от температуры. В энергоцехе производственного объединения Якуталмаз в г. Мирном лабораторией теплоэнергетики Отдела энергетики ИФТПС было проведено экспериментальное исследование возможности регулирования мощности низковольтных электродных водогрейных котлов в системе отопления и горячего водоснабжения жилого здания е помощью трехфазных тиристорных регуляторов мощности (ТРМ). ТРМ рассчитан на активную или активно-индуктивную нагрузку до 300 А; состоит из блока силовых тиристоров и трех блоков импульсно-фазового управления (БФИ-1, БФИ-2, БФИ-3) (рис. 1).

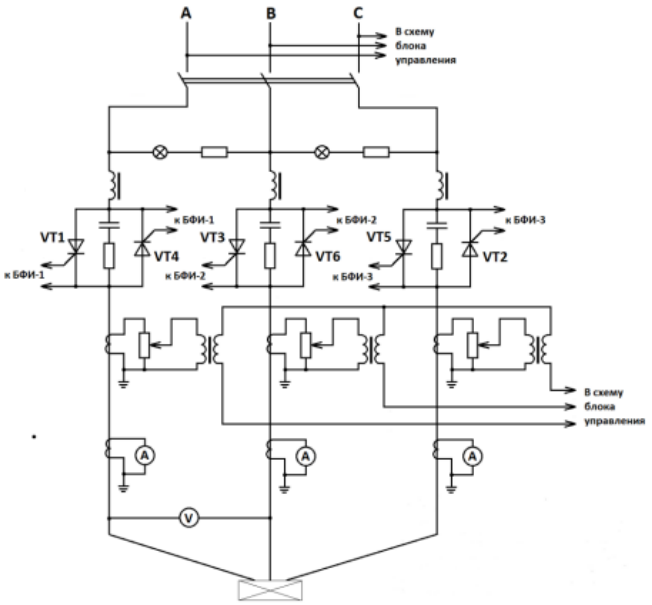


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части трехфазного тиристорного регулятора мощности

Силовые тиристоры каждой фазы включаются последовательно с нагрузкой по встречно-параллельной схеме. Блоки импульсно-фазового управления имеют по два канала, каждый из которых управляет одним тиристором. Схема импульсно-фазового управления включает в себя шесть генераторов пилообразного напряжения, шесть формирователей импульсов и узел электродной защиты.

Плавное регулирование напряжений на выходе ТРМ достигается смещением фазы подачи управляющего импульса по отношению к фазе напряжения сети. В схеме управления ТРМ предусмотрена защита от коротких замыканий, перегрузок и перенапряжения на тиристорах. Первая (от коротких замыканий и перегрузок) осуществляется узлом электронной защиты путем аварийного снятия импульсов и автоматическими выключателями. Защита от перенапряжений производится схемой, выполненной на конденсаторах и сопротивлениях. ТРМ может работать в двух режимах: а) в режиме ручного управления от потенциометра; б) в автоматическом режиме от регулятора температуры с датчиками – термосопротивлениями, устанавливаемыми в контролируемых точках объекта регулирования.

Для автоматического управления работой регулятора в зависимости от температуры вода в системе, применена приставка, разработанная в лаборатории на основе серийного полупроводникового терморегулятора ПТР-2. Приставка вырабатывает непрерывный управляющий сигнал, изменяющийся обратно пропорционально величине отклонения температуры от заданной, но взятой с обратным знаком. Отклонение температуре от заданной на 0…5 °С и обусловленное им изменение тока управления на 0…5 мА вызывает соответствующее плавное изменение мощности котла в пределах 0…100% от номинальной. На рисунке 2 приводится выдержка из длительной записи колебаний температуры воды в подающем и обратном трубопроводах системы отопления и соответствующей им электрической нагрузки ТРМ. Как показала статистическая обработка представительной совокупности результатов записи, относительное изменение нагрузки ТРМ точно соответствует относительному изменению перепада между температурами внутреннего и наружного воздуха. Расход води и соответствующая ему тепловая нагрузка в системе горячего водоснабжения являются резкопеременными во времени. Поэтому суммарная нагрузка ТРМ для одного здания колеблется от 0 до 100% номинальной (рис. 3). Разумеется, с увеличением числа квартир (например, свыше 100) имеет место существенное выравнивание графика электрических нагрузок. Однако этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи и здесь не рассматривается.

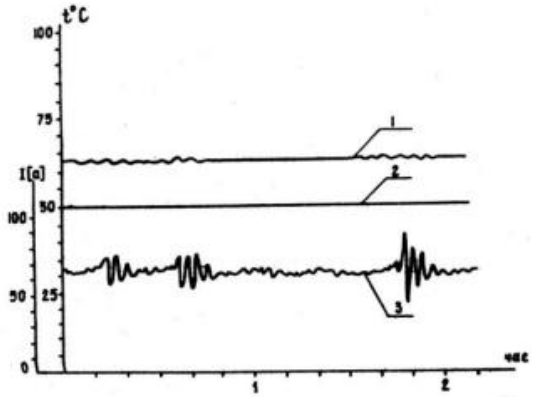


Рис. 2. Температура воды и ток нагрузки в системе отопления при применении ТРМ;
1, 2 – температура воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах; 3 – ток нагрузки

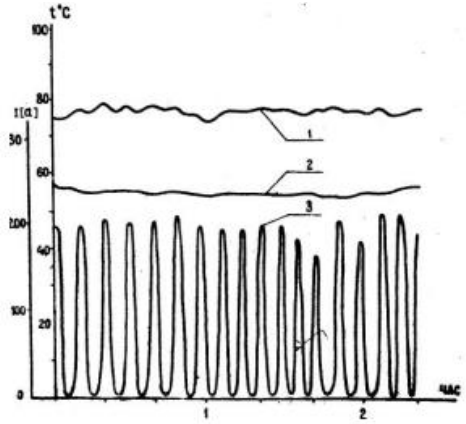


Рис. 3. Температура воды в первичном контуре системы горячего водоснабжения и ток нагрузки при применении ТРМ; 1, 2 – температура воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах; 3 – ток нагрузки

В ходе экспериментальной проверки возможности применения ТРМ в режиме импульсно-фазового управления было замечено явление обессоливания воды в системе, интенсивность которого зависела от количества воды и величины фазового смещения управляющего импульса.

В зависимости от химического состава менялось удельное сопротивление воды в системе отопления (табл. 1).

Таблица 1. Изменение химического состава и удельного сопротивления воды в системе отопления при импульсно-фазовом регулировании напряжения

№	Содержание Ca, мг х экв/л	Содержание Mg, мг х экв/л	Жесткость общая, мг х экв/л	Уд. сопр, Ом
1	0,47	0,28	0,75	17200
2	0,38	0,22	0,6	24574
3	0,3	0,16	0,46	26875
4	0,26	0,08	0,34	31385

Пропорционально увеличению сопротивления воды в ходе эксплуатации уменьшалась мощность, развиваемая котлами. Проверка работы тиристорного регулятора мощности в двухпозиционном режиме регулирования с полностью открытыми тиристорами показала, что скорость обессоливания воды при этом не ниже, чем в режиме импульсного регулирования.

Выводы:

1. Тиристорные регуляторы мощности с импульсно-фазовым управлением, комплектуемые терморегулирующей приставкой, могут быть рекомендованы для управления электротепловыми установками, в которых сопротивление нагревательных элементов в зависимости от температуры и срока эксплуатации изменяется в незначительных пределах (например, установки с трубчатыми нагревательными элементами).

2. В безаккумуляционных системах горячего водоснабжения с низковольтными электродными котлами импульсно-фазовое управление тиристорами по сравнению с позиционными способами регулирования не дает ощутимого улучшения качества регулирования температуры и показателей графика электрических нагрузок. Поэтому с целью упрощения схемы управления в системах горячего водоснабжения с низковольтными водогрейными электродными котлами целесообразно применять двух- или трехпозиционные способы регулирования.

Список литературы

1. Афанасьев Д.Е., Капитонов В.Н., Спиридонов К.Е. Тиристорные регуляторы мощности электродных водогрейных котлов в системе отопления и горячего водоснабжения жилых зданий. Энергетика Якутской АССР. Физикотехнические и технико-экономические аспекты. Якутск: Изд-во Якутского филиала СО АН СССР, 1975. – С. 79-83.
2. Афанасьев Д.Е., Капитонов В.Н., Курбатова Г.В., Львов И.М., Спиридонов К.Е. Электродный нагреватель жидкости, 1979. Авторское свидетельство № 663133 с приоритетом от 26.04.1976 г.

УДК 669.017:622.24.05:669.715:539.422.24:620.17-18
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-492-496

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Швецов О.В., Ермаков Б.С., Кондратьев С.Ю.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: shvec_off@mail.ru

Аннотация. *Бурение скважин новых месторождений связано с определенными трудностями это преимущественно суровые климатические условия Арктики и сверхдлинные скважины. Данные условия негативно сказываются на традиционных стальных бурильных трубах поскольку сталь имеет порог хладноломкости и низкую удельную прочность. Экспериментально исследовано влияние масштабного фактора на усталостные свойства и механизмы разрушения бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 и стали группы прочности G-105. Определены значения предела выносливости при многоцикловых испытаниях образцов и усталостной долговечности бурильных труб при натурных полномасштабных испытаниях для материалов. Установлено значительное снижение усталостных характеристик материалов при натурных испытаниях. Показано, что бурильные трубы из алюминиевых сплавов удовлетворяют требованиям, предъявляемым к трубам из стали группы прочности G-105 по API RP 7G и имеют существенное преимущество по удельным характеристикам по сравнению со стальными трубами, что особенно важно при разработке и бурении в Арктических регионах.*

Ключевые слова: *бурильная труба, масштабный фактор, алюминиевые сплавы Д16Т и 1953Т1, сталь G-105, микроструктура, усталость, предел выносливости, удельная прочность, изгиб с вращением, усталостное разрушение.*

PROSPECTS FOR THE USE OF ALUMINUM ALLOY DRILL PIPES IN ARCTIC CONDITIONS

Shvetsov O.V., Ermakov B.S., Kondrat'ev S.Yu.
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. *Drilling of new fields is associated with certain difficulties, mainly the harsh climatic conditions of the Arctic and ultra-long wells. These conditions have a negative impact on traditional steel drill pipes because steel has a cold-fracture threshold and low specific strength. The effect of the scale factor on the fatigue properties and fracture mechanisms of drill pipes made of aluminum alloys D16T and 1953T1 and steel of strength group G-105 has been experimentally investigated. The values of the endurance limit during multi-cycle testing of samples and the fatigue life of drill pipes during full-scale field tests for materials have been determined. A significant reduction in the fatigue characteristics of materials during field tests has been established. It is shown that drill pipes made of aluminum alloys meet the requirements for pipes made of steel of strength group G-105 according to API RP 7G and have a significant advantage in specific characteristics compared with steel pipes, which is especially important during development and drilling in the Arctic regions.*

Keywords: *drill pipe, scale factor, aluminum alloys D16T and 1953T1, steel G-105, microstructure, fatigue, endurance limit, specific strength, bending with rotation, fatigue failure.*

Первоначально для бурения скважин в качестве безальтернативного материала для изготовления бурильных труб являлась сталь. При разработке месторождений вертикальными скважинами средней глубины это было оправданно, поскольку процесс бурения осуществлялся за счет вращения породоразрушающего инструмента в результате передачи крутящего момента от ротора в условиях растягивающей нагрузки за счет веса буровой колонны [1, 2]. Однако в дальнейшем вертикальные скважины исчерпали возможности эффективной разработки нефтяных месторождений и возникло наклонно-направленное, а затем и горизонтальное бурение. Постепенное смещение новых месторождений от центральных до южных областей РФ в сторону северных регионов в зону с арктическим климатом. В данных случаях, в процессе эксплуатации трубы к вращению и растяжению добавляется ее изгиб и, кроме того, значительно увеличилась протяженность скважины и экстремально-низкие температуры. Это вызывает необходимость поиска для изготовления бурильных труб альтернативных сплавов на замену стальным, одними из наиболее перспективных среди которых являются алюминиевые сплавы [3–5].

Усталость металла в процессе эксплуатации является наиболее сложно прогнозируемым процессом и, в то же время, основной причиной выхода из строя бурового инструмента [6-13]. Согласно API RP 7G [14], минимальный предел выносливости при наработке 10^6 циклов для стальных труб группы прочности G-105, полученный на конкретной скважине и на полноразмерных бурильных трубах составляет 32 ksi (220,6 МПа). Однако пользоваться этими данными можно лишь с большой долей погрешности, поскольку современные скважины существенно отличаются друг от друга по многим характеристикам, а бурильные трубы различаются по размерам. Для бурильных труб из алюминиевых сплавов, согласно ISO 15546 [15], минимальный предел выносливости при наработке $2*10^7$ циклов должен достигать 50 МПа, причем испытания необходимо проводить на полноразмерных секциях бурильный труб. При использовании обоих методик получаемые экспериментальные данные являются результатом комплексных многофакторных испытаний, что значительно снижает вероятность корректной их воспроизводимости на практике при изменении, хотя бы, одного из факторов, в частности размера бурильной трубы.

Целью настоящей работы является оценка влияния масштабного фактора на усталостные свойства бурильных труб из стали группы прочности G-105 и алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1.

Для исследования использовали новые (без эксплуатации) бурильные трубы Ø 147 мм с толщиной стенки 13 мм, Ø 90 мм с толщиной стенки 9 мм из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 и Ø 127 мм с толщиной стенки 9,19 мм из стали группы прочности G-105. Статические механические свойства сплавов определяли при испытаниях на статическое растяжение согласно требованиям стандарта ASTM A370, используя испытательную машину Instron 8801. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Фактические и стандартные механические свойства сплава Д16Т и 1953Т1 и стали G-105 при испытаниях на растяжение

Материал		Образец №	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Временное сопротивление σ_B, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %
Д16Т	Фактический	1–1	445	540	16	15
		1–2	450	550	17	15
		1–3	448	549	17	15
	ISO 15546	-	≥325	≥460	≥12	-
1953Т1	Фактический	2–1	590	600	8	19,5
		2–2	600	620	10	21
		2–3	596	613	10	20
	ISO 15546		≥480	≥530	≥7	
G-105	Фактический	3–1	775	859	21	73
		3–2	773	855	21	72
		3–3	771	854	22	73
	API 5DP	-	724-931	≥793	≥16	-

Усталостные характеристики исследуемых алюминиевого сплава и стали определяли двумя методами – на образцах и при использовании полноразмерных бурильных труб. Испытания образцов на многоцикловую усталость проводили согласно стандарту ГОСТ 25.502–79, используя стендовую установку, позволяющую реализовывать знакопеременные нагрузки со схемой нагружения: изгиб с вращением, коэффициент асимметрии цикла нагружения $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$, частота нагружения 50 Гц. Натурные испытания полноразмерных труб проводились на роторном стенде лаборатории вибрации ОАО «НПО ЦКТИ». В состав экспериментального стенда входят: приводной электродвигатель постоянного тока типа МП-1000-3000 с предельной мощностью до 1000 кВт и номинальной скоростью вращения 3000 об/мин; станина, три подшипниковые опоры с капролоновыми вкладышами (рис. 1); собственная масляная система, состоящая из маслобака ёмкостью 0,5 $м^3$, маслонасоса, фильтра, напорной и сливной магистралей. Электропитание двигателя стенда осуществляется системой «Леонардо», которая обеспечивает плавную регулировку скорости вращения испытуемой трубы в пределах 100–3000 об/мин.

Рис. 1. Общий вид роторного натурного полномасштабного испытательного стенда ОАО «НПО ЦКТИ»

Для регистрации количества циклов нагружения использовался счетчик импульсов СИМ-04/6П-10–04 с рефлекторным датчиком ВИКО-Р-11-М18.

Анализ изломов образцов после разрушения и микроструктуры алюминиевых сплавов, проводили с помощью стереомикроскопа Meiji EMZ-5TR.

Экспериментально полученные кривые усталостной прочности S-N для алюминиевых сплавов Д16Т, 1953Т1, стали G-105 и испытания бурильных труб приведены на рисунке 2.

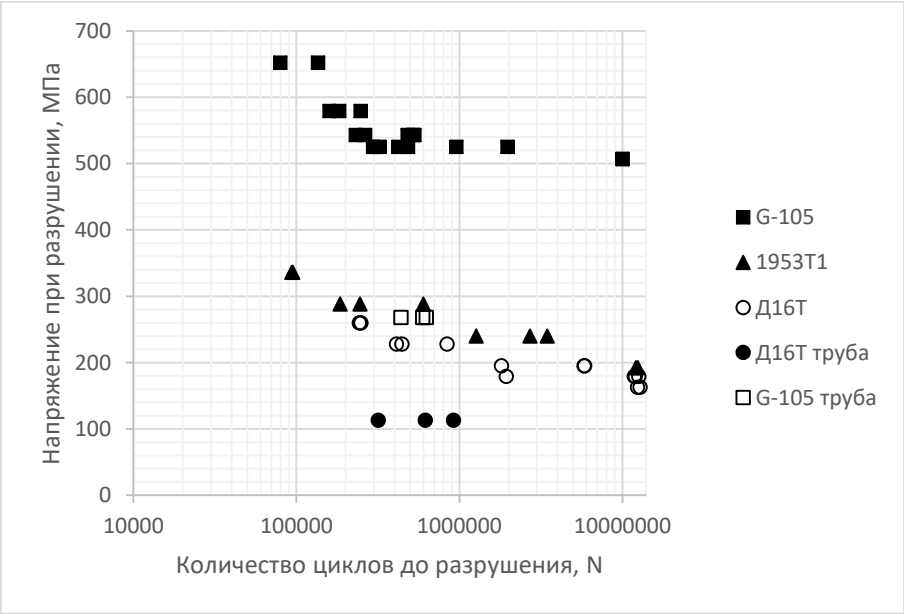


Рис. 2. S-N зависимости усталости образцов бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т, 1953Т1 и стали G-105

Результаты испытаний показали, что предел выносливости стали G-105 значительно выше, чем у алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1, абсолютные значения которых составляют соответственно 507 МПа, 179 МПа и 192 МПа. Однако необходимо учитывать, что более показательными при оценке работоспособности материалов, применяемых для изготовления бурового оборудования, являются удельные характеристики.

При этом в условиях бурении наклонно-направленных протяженных скважин важным фактором является общий вес буровой колонны. Соответственно удельная прочность материала характеризует максимальную длину колонны, при которой подвешенная вертикально колонна разорвется под собственным весом. Если же рассматривать удельную выносливость материала, т. е. отношение предела выносливости к плотности, то ее величина характеризует уровень напряжений, возникающих при изгибе трубы. При более высоком значении удельной выносливости стрела прогиба трубы при одинаковом плече изгиба будет меньше и, соответственно, ее ресурс выше. Рассчитанные таким образом значения удельного предела выносливости сопоставимы как для стали G-105 66 кН*м/кг, так и для сплавов Д16Т 66 кН*м/кг и 1953Т1 69 кН*м/кг.

Из данных таблицы 1 следует, что среднее абсолютное значение предела текучести исследуемых сплавов Д16Т, 1953Т1 и стали G-105 составляет соответственно 448, 595 и 773 МПа. Рассчитывая удельный предел текучести этих материалов, получаем для сплавов Д16Т, 1953Т1 и стали G-105 значений 165, 212 и 101 кН*м/кг соответственно. Таким образом, величина удельного предела текучести алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 значительно выше, чем стали G-105. Это свидетельствует о преимуществе алюминиевых сплавов по сравнению со сталью при эксплуатации бурильных труб, учитывая сопоставимые значение удельного предела выносливости этих материалов.

Результаты натурных полномасштабных испытаний бурильных труб представлены в таблице 2. Видно, что масштабный фактор при переходе от образцов металла к реальной трубе оказывает значимое влияние на результаты определения усталостных свойств алюминиевого сплава Д16Т и G-105. Значения усталостной прочности исследованных материалов значительно ниже в случае натурных испытаний труб (рис. 2). Из этого следует, что повышение качества поверхности бурильных труб и уменьшение дефектов в теле трубы должно существенно повышать ее усталостные характеристики.

Важным результатом полномасштабных испытаний является также выявленное преимущество по удельным усталостным характеристикам труб из алюминиевого сплава Д16Т по сравнению с трубами из стали G-105. При этом усталостные характеристики алюминиевых бурильных труб выше, чем это требует стандарт API RP 7G.

Таблица 2. Результаты натурных усталостных испытаний алюминиевых и стальных труб

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Д16Т, ЛБТПН 147×13	G-105, 5” 19.5 IEU
Количество циклов обр. № 1	N_1	-	923000	625824
Количество циклов обр. № 2	N_2	-	317374	595975
Количество циклов обр. № 3	N_3	-	617158	438000
Напряжения	$\sigma_{pipe,}$	МПа	113	268
Кривизна трубы в номинальном сечении	γ	1/м	0,0216	0,0201
Кривизна бурильной колонны	γ_{aver}	1/м	0,0171	0,0165

Результаты экспериментального исследования усталостных характеристик бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т, 1953Т1 и стали группы прочности G-105 при испытаниях образцов на многоцикловую усталость и натурных испытаниях полноразмерных труб позволяют сделать следующее заключение:

Предел выносливости алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 и стали G-105 при многоцикловых испытаниях образцов составляет 179, 192 и 507 МПа соответственно. Однако величина удельного предела выносливости (отношение предела выносливости к плотности) у обоих материалов сопоставимая и равна 66 и 69 кН*м/кг. Таким образом, принимая во внимание удельный вес материала бурильной трубы, алюминиевые сплавы имеют преимущество по сравнению со сталью группы прочности G-105. Усталостная долговечность алюминиевых труб ЛБТПН 147×13 при натурных полномасштабных испытаниях выше по сравнению со стальными трубами G-105 5” 19.5 IEU. При этом долговечность испытанных труб из обоих материалов выше стандартной усталостной кривой API RP 7G для труб из стали группы прочности G-105. Усталостные характеристики сплава Д16Т и стали G-105, определяемые при натурных полномасштабных испытаниях значительно ниже, чем при многоцикловых испытаниях образцов, что объясняется влиянием поверхностных и внутренних дефектов трубных заготовок. Бурильные трубы из алюминиевого сплава Д16Т удовлетворяют требованиям по усталостным характеристикам, предъявляемым к трубам из стали группы прочности G-105 по API RP 7G и имеют преимущество по сравнению с ними по удельным значениям предела выносливости и усталостной долговечности. Масштабный фактор одинаково значительно влияет на усталостные характеристики алюминиевых и стальных бурильных труб, что требует повышенного внимания к шероховатости их поверхности и качеству металла.

Список литературы

1. Фомин О.И. Усталостное разрушение бурильных труб, его прогнозирование и профилактика // Российские нефтегазовые технологии. Бурение. 2018. №1. С.16–29.
2. J. Argirov, R. Yankova, G. Antonov, Study Fatigue in Materials of Drill Pipes, TEM J. 5 (1) (2016) 50.
3. D. Spasova, Y Argirov, N. Atanasov, R. Yankov. Analysis of failure causes of S135 drill pipe // Materials Today: Proceedings, 2022, vol. 59, part 3, pp. 1719-1725.
4. S. M. Zamani , S.A. Hassanzadeh-Tabrizi , H. Sharifi. Failure analysis of drill pipe: A review// Engineering Failure Analysis 2016, no.59, pp. 605–623.
5. Fang Po Li. Research on drill pipe's fatigue life prediction based on reliability. In: *Materials science forum*. Vol. 944. Switzerland: Trans Tech Publications, 2019, pp.975–980.
6. Moradi S, Ranjbar K. Experimental and computational failure analysis of drillstrings // Engineering Failure Analysis 2009, no.16, pp.923-933.
7. D. Bert, A. Storaune, and N. Zheng, "Case Study: Drillstring Failure Analysis and New Deep-Well Guidelines Lead to Success," SPE Drilling and Completion. Dec. 2009, vol. 24, no. 4,
8. M. Liu, L. Sheji, S.h. Yi, Corrosion fatigue crack propagation behavior of S135 high–strength drill pipe steel in H2S environment, Eng. Fail. Anal. 97 (2019) 493–505.
9. Han L, Liu M, Luo S, et al. Fatigue and corrosion fatigue behaviors of G105 and S135 high− strength drill pipe steels in air and H2S environment. *Process Saf Environ Protect* 2019; 124: 63–74.
10. Luo S, Liu M, Lin X. Corrosion fatigue behavior of S135 high−strength drill pipe steel in a simulated marine environment. *Mater Corros* 2018; 1–10.
11. Cheng A, Chen N. An extended engineering critical assessment for corrosion fatigue of subsea pipeline steels. *Eng Fail Anal* 2018; 84: 262–275.
12. Technological and Operational Features of Drill Pipes from Aluminum Alloys 2024 and 1953, June 2018 Metal Science and Heat Treatment 60(1-2):1-7 DOI: 10.1007/s11041-018-0236-z Sergey Yu. Kondrat'ev, Oleg Shvetsov
13. Kondrat'ev S.Yu., Shvetsov O.V. Real and imaginary obstacles of aluminum alloys application in petrochemical industry // Proceedings 26TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS (METAL 2017), May 24th – 26th 2017, Brno, Czech Republic, EU, P. 1481-1489.
14. API 5DP Specification for Drill Pipe.
15. ISO 15546–2011 «Нефтяная и газовая промышленность. Трубы бурильные из алюминиевых сплавов».

УДК 620.16.620.17
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-497-501

БУРООПУСКНЫЕ СВАИ ДЛЯ ФУНДАМЕНТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ММГ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Ялыгин С.А.[1], Голиков Н.И. [2], Ермаков Б.С.[3], Слепцов О.И.[2], Швецов О.В.[3]
[1] ПАО «ГАЗПРПОМНЕФТЬ»
[2] ИФТПС СО РАН
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
E-mail: Ermakov55@bk.ru

Аннотация. *Развитие нефтегазовой отрасли связано исключительно с освоением новых северных территорий РФ. Обустройство месторождений в условиях многолетнемерзлых грунтов резко увеличивает себестоимость строительных, в первую очередь фундаментных работ. Одним из путей снижения себестоимости обустройства является отказ от послесварочной термической обработки сварных соединений прямошовных сварных СВЧ труб. В работе приведены результаты исследований механических свойств, коррозионной стойкости, трещиностойкости, усталостных испытаний подтверждающие возможность отказа от избыточного режима термической обработки.*

Ключевые слова: *многолетенемерзлые грунты, бурооупскные сваи, послесварочная термическая обработка*

BOREHOLE PILES FOR FOUNDATIONS OF OIL AND GAS FIELDS IN THE PFS AREA, PROBLEMS AND SOLUTIONS

Yalygin S.A.[1], Golikov N.I. [2], Ermakov B.S.[3], Sleptsov O.I.[2], Shvetsov O.V.[3]
[1] PJSC GAZPRPOMNEFT
[2] IFTPS SB RAS
[3] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Abstract. *The development of the oil and gas industry is solely related to the development of new northern territories of the Russian Federation. The development of deposits in permafrost conditions dramatically increases the cost of construction, primarily foundation work. One of the ways to reduce the cost of construction is to abandon the post-welding heat treatment of welded joints of straight seam welded microwave pipes. The paper presents the results of studies of mechanical properties, corrosion resistance, crack resistance, and fatigue tests confirming the possibility of eliminating excessive heat treatment.*

Keywords: *permafrost soils, borehole piles, post-welding heat treatment*

Основное развитие нефте- и газодобывающих отраслей в нашей стране приходится на до- послевоенный период с середины 30-х до конца 50-х годов прошлого века, когда началось освоение наиболее крупных месторождений, расположенных в центральных регионах России – в Приволжье, в районе Ухты, Печорском и Ставропольском регионах. Интенсивное использование этих месторождений сделало нашу страну практически независимой от иностранных поставок ресурсов, привело к созданию новой отрасли машиностроения, нацеленной на разработку и изготовление мощных аппаратов для добычи, перекачки и переработки нефти. Начиная с 80-х годов XX века центр тяжести добычи энергоресурсов постепенно начал смещаться в северные и северо-восточные регионы страны. На первом этапе освоения были задействованы наиболее крупные и легкодоступные ресурсы, однако их постепенное исчерпание в настоящее время потребовало изменить подход к оценке разведанных объемов. Уже в начале XXI века встал вопрос о необходимости вовлечения в добычу средних и малых месторождений нефти и газа.

Такое изменение политики добычи привело к изменению подхода к процессу сборки и обработки продукта. На крупных месторождениях была разработана и использована система централизованного сбора, когда добываемый флюид из кустов скважин подается на установки комплексной подготовки и там, до направления в магистральный трубопровод проходит промысловую очистку и обработку на установках комплексной подготовки продукта. После предварительной обработки очищенный продукт

с крупных месторождений поступает в магистральный газо- или нефтепровод и направляется на перерабатывающие предприятия.

В условиях малых месторождений, в основном, используется система индивидуальной сборки флюида, при которой на месте добычи происходит его первичная обработка. Затем флюид поступает в сборный коллектор и через него, подается на сборный пункт для его окончательной очистки и обработки, после чего обработанный продукт подается в магистральный трубопровод или через сепарационные установки, промысловые насосные станции и термохимические установки подается для последующего сбора в резервуарные парки, а затем в нефтепровод наземной или подземной прокладки. Вариант прокладки, в первую очередь, зависит от геолого-климатических условий региона добычи [1].

К настоящему времени основными регионами добычи полезных ископаемых стали области, расположенные в Западной и Восточной Сибири. В настоящее время более 90% добычи природного газа и большую часть нефти в нашей стране добываются на территории Ямало-Ненецкого автономного округа [2]. Подобное смещение центров добычи из центральных регионов страны в слабо освоенные северные окраинные территории привело к созданию ряда проблем, которые необходимо решить при строительстве и обустройстве новых промысловых площадок. По мнению специалистов [3] к таким особенностям относятся:

1.Удаленность от промышленно развитых регионов, отсутствие развитой инфраструктуры, сложности с транспортировкой и значительные стоимости доставки на строительную площадку материалов, оборудования, рабочей силы;

2. Неблагоприятные гео-климатические условия территории, выражающиеся в суровом климате, большом количестве рек и озер, высокой заболоченности, что затрудняет проходимость техники и ведение строительно-монтажных работ;

3. Сложные инженерно-геологические условия территории освоения и обустройства северных месторождений требуют более детального изучения и анализа данных инженерно-геокриологических изысканий при проектировании и строительстве объектов обустройства месторождений.

Согласно ВСН 39.1.06-84 оборудование обустройства нефтяных месторождений, размещаемое на открытых площадках добычи и первичной переработки и требующее установки на различного типа фундаменты представляет собой сложный производственный комплекс, в котором можно выделить несколько основных технологических групп. Это каркасные здания и здания с несущими стенами; блочно-комплектные сооружения; компрессорные цеха, прессы и другие агрегаты; надземные, заглублённые и подземные резервуары и сооружения; открытые площадки с расположенным на них технологическим оборудованием, емкостями для хранения различных продуктов и т. п. [4]. Кроме основных технологических сооружений на площадках располагаются вспомогательные объекты – складские помещения, гаражи, пожарные депо, вахтовые жилые комплексы, объекты медицинского и социально-культурного назначения. Практически все эти сооружения и объекты устанавливаются на свайные фундаментные основания, изготавливаемые в соответствии с требованиями СП 25.13330.2020 [5], причем каждая вторая свая, выполненная в северных регионах, – буроопускная. Учитывая, что количество таких, свай, используемых ежегодно нефте- или газодобывающей компанией составляет несколько десятков тысяч штук, суммарная стоимость поставок свай в северные регионы страны превышает несколько миллиардов рублей, а масса поставки – тысячи тонн [6].

Применяемые при строительстве объектов ТЭК технические решения обеспечивают необходимую прочность сооружений и обладают надежностью при строительстве и эксплуатации объектов. Однако свайное основание имеет недостатки – неиспользованные в полной мере прочностные характеристики металла (несущая способность свай по грунту намного меньше несущей способности по материалу), высокая стоимость строительно-монтажных работ и низкая экономическая эффективность фундамента в целом; невозможность надежной защиты сваи от грунтовой коррозии, что особенно актуально для засоленных грунтов северных регионов [3].

Анализ условий эксплуатации свайных фундаментов в условиях ММГ показал, что ни в одном из случаев аварийных разрушений или повреждений свайных фундаментов не было отмечено разрушения металла свайных опор, связанных с недостаточной хладостойкостью материала сваи, с возникновением в зоне сварного шва прямошовной сварной трубы каких-либо дефектов, например, хрупких трещин, потери несущей способности или нарушений геометрической формы трубы. Единственным фактором риска, приводящим к аварийным ситуациям, являлась проблема коррозионных повреждений, что следует связывать с некачественной антикоррозионной обработкой сваи и развитие хрупких трещин замедленного разрушения при потере геометрической целостности свайного поля и перераспределения вида нагрузок на сваю со сжимающих на изгибающие.

Обычно стальные сваи, не предназначенные для магистральных трубопроводов и используемые при обустройстве площадок добычи и первичной переработки проектируют из стальных прямошовных труб изготовленных, в основном, методом сварки токами высокой частоты – СВЧ. Следует отметить, что в соответствии с требованиями СП16.13330.2017 [8] все трубы, изготовленные методом высокочастотной сварки (СВЧ) и идущие на производство свай должны быть подвергнуты послесварочной термической обработке. Однако, как показали ранее проведенные исследования, в частности [9,10], объемная термическая обработка не может полностью устранить дефекты сварного соединения, полученного СВЧ методом, а работоспособность данного типа сварного шва должна быть обеспечена за счет формирования структур повышенной прочности или образования при сварке усиления сварного шва. Обоснованием необходимости термической обработки свай после сварки давлением с нагревом зоны стыка токами высокой частоты является необходимость выравнивания свойств между металлом сварного соединения и основного металла. Однако, как было показано в работах [6-11] такое выравнивание не достигается из-за малого времени выдержки при термической обработке, а в ходе эксплуатации ни разу не было отмечено, что аварийное разрушение фундаментов оказывалось связанным с какими-либо свойствами сварного шва. Следует особо подчеркнуть, что СП 25.13330.2020, декларируя необходимость термической обработки труб, не прописывает режим этой термической обработки и не дает ссылок на другие нормативно-технические документы, где эти режимы могут быть указаны.

В работе были проведены исследования влияния послесварочной термической обработки на механические, усталостные и коррозионные свойства металла сварных соединений прямошовных сварных, методом СВЧ, труб из стали 09Г2С (ГОСТ 20295–85), использованных при изготовлении буроопускных свай, которые были установлены на опытном полигоне ЯНЦ СО РАН. Срок полигонных испытаний составил два с половиной года, а выбор места проведения испытаний был обоснован тем, что гео-климатические условия полигона практически полностью соответствуют гео-климатическим условиям основного добывающего региона – ЯНАО. Для проведения испытаний были использованы трубы с объемной и локальной послесварочной обработкой и без послесварочной термической обработки.

Оценка влияния послесварочной обработки на работоспособность буроопускных свай, изготовленных из прямошовных труб, проведена путем испытаний основного металла и металла сварного соединения на растяжение на универсальной испытательной машине Instron 8850 и ударный изгиб на маятниковом копре Instron мод. 600MPX (ГОСТ 1497–84, ГОСТ 6996–66, ГОСТ 9454–78). Металлографический анализ на поперечных шлифах выполнен на оптическом микроскопе «Reichert-Jung MeF3A» при увеличениях в 50–500 раз. Микротвердость определяли по методу Виккерса на приборе «Reichert-Jung Micro-Duromat 4000E» в соответствии с процедурой ГОСТ 9450–76. Коррозионная стойкость металла сварного соединения была испытана в соответствии с ГОСТ 9.908–85. Испытания на усталость выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502–79. Ультразвуковой контроль металла сварного соединения свай выполнен с помощью импульсного дефектоскопа УД2В-46П в соответствии с требованиями ГОСТ 55724–2013. Магнитопорошковая дефектоскопия выполнена в соответствии с ГОСТ 565123–2015.

Первоначально был проведен анализ фактического состояния сварных соединений трубных элементов свай неразрушающими методами. Результатами визуально измерительного, ультразвукового и магнитопорошкового контроля показано, что в сварных соединениях труб отсутствуют недопустимые дефекты. Исследование химического состава и механических свойств основного металла и сварных соединений труб подтвердил их соответствие требованиям ГОСТ 20295–85. Изготовленные сваи были погружены в соответствии с требованиями нормативной документации в декабре 2022 г и извлечены в 2025 г. Температура окружающего воздуха при установке свай составляла минус 30 – минус 35 ^{0}С. После извлечения свай в 2025 г. был выполнен повторный неразрушающий контроль сварных соединении, по результатам которого не было выявлено каких-либо дефектов, связанных с их длительным пребыванием в условиях полигона или развития ранее обнаруженных дефектов сварных швов.

Извлеченные сваи (трубные элементы свай) были разрезаны на образцы для проведения испытаний. Было показано, что механические свойства основного металла труб (вне зависимости от вида и наличия послесварочной термической обработки) находятся в пределах: предел текучести 450–470 МПа, временное сопротивление 560–610 МПа, относительное удлинение 25-30%. В ходе испытания механических свойств сварных соединений труб по ГОСТ 6996–66 – определено, что все испытанные образцы были разрушены по основному металлу – то есть прочность сварных швов превышает прочность основного металла труб.

По результатам испытаний было показано, что механические свойств металла труб с различными видами послесварочной термической обработкой и без нее практически не отличаются друг от друга

как в состоянии поставки, так и после полигонных испытаний. Особое внимание было уделено испытаниям ударной вязкости сварных соединений. В соответствии с требованиями СП 16.13330.2016 разрешается эксплуатация свай, продольные сварные соединения которых, при динамических испытаниях при температуре минус 60^0С обладают ударной вязкостью не менее 34 Дж/см^2. Данные по результатам испытаний ударной вязкости трубы с объемной (1) и локальной (2) послесварочной термической обработкой и без термической обработки (3) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Ударная вязкость сварных соединений труб

Труба	KCV Дж/см^2 , при температуре ^{0}С				
	20	0	-20	-40	-60
1	64	55	51	29	14
2	53	51	47	25	12
3	52	49	46	26	14

Как следует из приведенных данных ни одна из трех труб с различным видом послесварочной термической обработки не соответствует требованиям СП 16.13330.2016. Одной из причин недостаточной ударной вязкости сварных соединений труб может являться недостаточность интенсивности (времени нахождения при температуре нагрева) термической обработки. Для подтверждения этого предположения в работе были проведены сравнительные исследования ударной вязкости сварных соединений труб без послесварочной термической обработки, после объемной и локальной термической обработки, выполненной по режимам, принятым на металлургических заводах, а также после проведения различных модельных режимов термической обработки сварных соединений в лабораторных условиях. Были выполнены следующие виды термической обработки: нагревы до температур 930 ºС – температура нормализация стали 09Г2С, 680 ºС и 450 ºС – температуры высокого и среднего отпуска, выдержки при этих температурах в течение 2 часов с последующим охлаждением на воздухе. Было показано, что в результате проведенных испытаний при температуре минус 60 ºС требование СП16.13330.2016 выполняются только на металле после нормализации в лабораторных условиях (930 ºС 2 часа выдержки охлаждение на воздухе) – то есть ни один из исследованных трубных элементов свай, вне зависимости от наличия или отсутствия послесварочной термической обработки, не соответствует требованиям 16.13330.2016.

Анализ коррозионной стойкости сварных соединений трубных элементов свай показал, что коррозионная стойкость сварных соединений в кислых – 1–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с доведением уксусной кислотой до pH = 3; и щелочных – 2–5 масс. % водный раствор хлорида натрия с концентрацией 0,1 масс. % доведением гидроксидом натрия до pH = 11 средах находится в пределах 0,3 мм/год в кислых и около 0,1 мм/год в щелочных средах. Имитация режима эксплуатации свай (понижение температуры испытательных сред) привели к значительному снижению скорости коррозии. Влияния послесварочной термической обработки на коррозионную стойкость зон сварного соединения труб обнаружено не было.

Анализ усталостной прочности сварных соединений труб проведен согласно ГОСТ 25.502–79 на базе 2 000 000 циклов, при напряжении 353 МПа (60 % $\sigma_в$ стали 09Г2С). Все образцы швов без видимых дефектов сварных соединений, связанных с особенностями СВЧ сварки, выдержали испытания без разрушения. Наличие таких дефектов приводит к ускоренному усталостному разрушению сварных соединений. Основными дефектами сварных швов, выявленными при анализе сварных соединений, явились – сосредоточенная и рассеянная пористость, блистеры, трещины и оксидные включения в зоне «белой линии».

Оценкой трещиностойкости (CTOD) – δ_c сварных соединений по ГОСТ 25.506–85 показано, что вне зависимости от термической обработки сварных швов их трещиностойкость находится в пределах – 0,35–0,40 мм. Как следует из приведенных данных трещиностойкость основного металла и зон сварного соединения трубы без термической обработки и после объемной послесварочной термической обработки близки между собой как в исходном состоянии, так и после полигонных испытаний.

В представленном исследовании приведены результаты анализа влияния послесварочной термической обработки на механические свойства, коррозионную стойкость, усталостную прочность и трещиностойкость сварных соединений прямошовных труб, изготовленных методом СВЧ и использованных при изготовлении буроопускных свай для фундаментов в зоне Арктики. По результатам лабораторных и полигонных испытаний было показано:

– послесварочная термическая обработка не оказывает существенного влияния на структуру и свойства сварных соединений, так как приводимые в условиях трубных предприятий режимы недостаточно интенсивны для устранения последствий сварки токами высокой частоты;

– проведенными исследованиями показано, что послесварочная термическая обработка не оказывает существенного влияния на свойства и микроструктуру свай из стали 09Г2С как в состоянии поставки, так и после эксплуатационной выдержки в грунтах различного типа.

Благодарность: *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSEG-2024-0009 Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтах).*

Список литературы

1. Элияшевский И.В. Технология добычи нефти и газа. /Недра, Москва, 1976. 256 с.
2. Добыча газа и нефти. / https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/ электронный ресурс.
3. Минкин М. А., Потапова О. А. Особенности обустройства северных нефтяных и газовых месторождений России и основания и фундаменты зданий и сооружений объектов обустройства. / https://www.fundamentproekt.ru/publications/pub016.html/ электронный ресурс.
4. ВСН 39.1.06-84. Ведомственные нормы строительного проектирования. Нормы и правила проектирования объектов нефтяной промышленности. / https://files.stroyinf.ru/Data1/9/9712/.
5. Свод Правил СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88/М., 2020. 136 с.
6. Ялыгин С.А., Ермаков Б. С., Столяров А.В., Койнов Е.Г., Швецов О.В., Ша-пошников Н.О., Токарев В. О., Голиков Н. И. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай. / PRO Нефть. 2024. Т.9. №1. С.173-182.
7. Драчков Д.С. Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Сб. ст. V. науч.-практ. конф. Пенза, 2017. С.133–135.
8. Свод Правил СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81. /М.,2020. 151 с.
9. Ткачук М. А., Багмет О.А., Степанов П. П. Разработка режимов локальной термической обработки сварного шва труб среднего диаметра, сваренных токами высокой частоты // Сталь. 2016. №3. С.54–59.
10. Гончаров Н. Г., Юшин А. А., Колесников О. И., Нестеров Г. В., Азарин А.И. Исследование влияния термической обработки на металлофизические свойства металла сварных швов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. №11. С.412–419.
11. Швецов О.В., Ермаков Б. С. Влияние объемной термической обработки на эксплуатационные свойства буроопускных свай, установленных в условиях многолетнемерзлого грунта. / В книге: Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. Сборник тезисов VII научно-технической конференции. Томск, 2024. С.172–177.

СЕКЦИЯ 8. ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА: МОНИТОРИНГ, ДЗЗ, ГИС

УДК 551.510.42
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-502-503

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ НАД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИЕЙ

Алексеева А.В.[1], Мордовской П.Г.[1], Максимов Т.Х.[2]
[1]ФИЦ Якутский научный центр СО РАН,
[2]Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН,
Якутск, Россия
Email: aav1312@mail.ru

Аннотация. *По данным самолетного мониторинга за период 2017-2021 гг. проведен анализ концентрации метана в свободной атмосфере над Центральной Якутией на высотах от 34 м до 3 000 м. Выявлены сезонные колебания: минимальные значения концентрации метана характерны для теплого периода, а максимальные – для холодного. В вертикальном профиле концентрации метана наблюдается стабильная стратификация. Максимумы регистрируются на уровнях 34 – 100 м, а минимумы на высотах 2000-3000 м, не зависимо от времени года. Показано, что интенсивные пожары в 2021г. нарушили эту вертикальную структуру.*

Ключевые слова: *метан, Якутия, многолетняя мерзлота, самолетный мониторинг.*

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF METHANE CONCENTRATION OVER CENTRAL YAKUTIA

Alekseeva A.V.[1], Mordovskoy P.G.[1], Maximov T.C.[2]
Federal Research Center
Yakut Scientific Center SB RAS,
Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract. *Based on aircraft monitoring data for the period 2017-2021, an analysis of methane concentration in the atmosphere over Central Yakutia at altitudes from 34 m to 3,000 m was carried out. Seasonal variations were identified that minimum methane concentration values are characteristic of the warm period, while maximum values are characteristic of the cold period. The vertical profile of methane concentration shows stable stratification. Maximum concentrations are recorded at levels of 34–100 m, and minimum concentrations are recorded at altitudes of 2000–3000 m, regardless of the time of year. It is shown that intense wildfires in 2021 disrupted this vertical structure.*

Keywords: *methane, Yakutia, permafrost, aircraft monitoring.*

Метан является вторым по значимости парниковым газом в атмосфере, который влияет на изменение климата, поскольку удерживает тепло в десятки раз эффективнее, чем углекислый газ. Среднее глобальное значение метана в атмосфере увеличивается с 2007 года, а темпы роста ускоряются. Концентрация метана в атмосфере с доиндустриального периода вырос более, чем в 2,5 раза, достигнув 1925,7 ppb в мае 2024 года согласно измерениям Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA).

В Центральной Якутии среднее значение концентрации метана в это же время достигло 2077,9 ppb. Как территория с высокой климатической уязвимостью, Якутия, представляет актуальность для изучения из-за риска активации положительной обратной связи: повышение температуры ведёт к таянию многолетней мерзлоты с последующим образованием термокарстовых озёр – потенциальных источников метана.

Целью данной работы является анализ трендов и изменчивость концентрации метана над Центральной Якутией. Исследование основано на данных продолжающейся программы самолётного мониторинга. Проанализированы измерения за период 2017–2021 гг., полученные путем отбора проб на шести высотных профилях от 34 до 3000 метров (рис. 1).

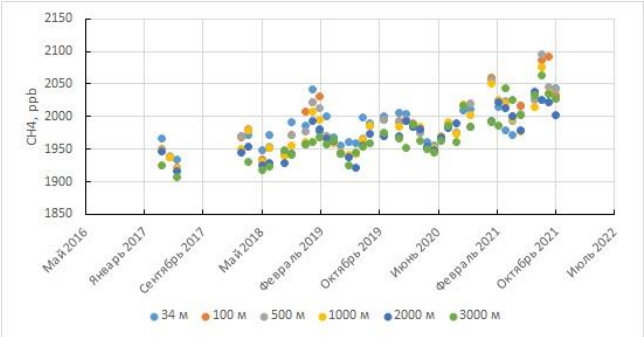


Рис. 1. Концентрация метана на разных высотах над Центральной Якутией

Средние месячные максимумы концентрации метана в холодный период повышаются до 2069 ppb, в тёплый сезон снижаются до 1998 ppb. Это летнее снижение может объясняться деятельностью метанотрофных организмов в лиственничных лесах Центральной Якутии. (Van Huissteden, Ko., et al., 2008).

До апреля 2021 года вертикальное распределение концентрации метана имело устойчивый характер: в приземном слое наблюдались максимальные значения, а минимумы фиксировались на высотах 2000–3000 м независимо от сезона. С апреля по ноябрь 2021 года картина нарушилась: минимумы сместились, а максимумы стали появляться в виде кратковременных вспышек на разных высотах, что свидетельствует о разрушении стабильной вертикальной структуры в период пожарной активности. Интенсивные пожары создают мощные восходящие потоки, способные переносить парниковые газы в атмосферу, разрушая локальную вертикальную структуру (Fromm, M., et al., 2010).

В 2021 году, когда в Якутии наблюдались наиболее масштабные пожары за последнее десятилетие, было зафиксировано резкое повышение концентрации метана, позволив выделить фоновый и аномальный режимы в диапазоне высот от 100 до 3000 м. Оба сценария демонстрируют увеличение темпов роста концентрации на всех высотных профилях. Наибольшая скорость роста концентрации отмечается на высоте 3000 м, наименьшая – на высоте 100 м. В фоновом режиме, без учёта данных 2021 года, скорость роста увеличивается с 0,8 ppb/мес до 1,9 ppb/мес. В аномальном сценарии с включением данных 2021 года темп роста возрастает с 2,3 ppb до 2,9 ppb/мес.

Проведенный анализ позволил выявить, что аномальные пожары в Якутии оказывают двойное воздействие на атмосферу: вызывают быстрый рост концентрации метана и разрушают его вертикальное распределение.

Список литературы

1. Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Дудорова, Н.В., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Краснов, О.А, Максютов, Ш.Ш., Мачида, Т., Панченко, М.В., Пестунов, Д.А., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, М., Симоненков, Д.В., Скляднева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А.В. Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Томск, 2019. №9. С.777–785. DOI: 10.15372/AOO20190910
2. Панов А. В., Прокушкин А. С., Кюблер К. [и др.]. Прецизионный мониторинг концентрации диоксида углерода и метана в приземной атмосфере полярного пояса Приенисейской Сибири // Метеорология и гидрология. Москва, 2022. №11. С.19-31. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-11-19-31
3. Карсанаев С. В., Петров Р. Е., Максимов Т. Х. Эмиссия метана в растительных сообществах тундровых экосистем севера Якутии // Экология урбанизированных территорий. Москва, 2022. №1. С.59-64. DOI: 10.24412/1816-1863-2022-1-59-64
4. Van Huissteden J, Maximov T.C., Kononov A.V., Dolman A.J. (2008) Summer soil CH4 emission and uptake in taiga forest near Yakutsk, Eastern Siberia // *Agricultural and meteorology*, vol. 148, issue 12, pp. 2006-2012. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.08.003
5. Fromm M., Lindsey D. T., Servranckx R., et al. (2010) The untold story of pyrocumulonimbus // *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 91, № 9, pp. 1193–1210. DOI: 10.1175/2010BAMS3004.1

УДК 551.345_550.837
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-504-509

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ПО СЕЗОННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА

Ефремов В.Н.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
E-mail: vne@mpi.ysn.ru

Аннотация. *Относительно зондирования методом поверхностного импеданса, предложена модель геоэлектрического строения мерзлых грунтов. Модель включает слой переходной промороженности. Предлагается по изменению параметров этого слоя оценивать состояние мерзлых грунтов, его промороженность. По сезонным изменениям модуля и аргумента поверхностного импеданса на открытой площадке и в лесу, показаны их зависимости от изменяющегося состояния грунтов. Приведена интерпретация сезонных изменений поверхностного импеданса на открытой площадке и в лесу. Показано, как изменяется геоэлектрический разрез мерзлых грунтов, рассчитанный по поверхностному импеданс, в теплое время в течение трех лет, во временном ряду. По его изменению интерпретируется сезонное влияние климатических факторов на состояние мерзлых грунтов.*

Ключевые слова: *поверхностный импеданс,мерзлые грунты, геоэлектрическое строение, временной ряд, состояние мерзлых грунтов, сезонные изменения*

ASSESSMENT OF THE STATE OF FROZEN SOILS BY SEASONAL CHANGES OF SURFACE IMPEDANCE

Efremov V.N..
Melnikovs Permafrost Institute SB RAS

Abstract. *Regarding surface impedance sensing, a model of the geoelectric structure of frozen soils is proposed. The model includes a layer of transitional frost resistance. It is proposed to assess the condition of frozen soils and its frost resistance by changing the parameters of this layer. Based on seasonal changes in the module and the surface impedance argument in the open area and in the forest, their dependences on the changing soil condition are shown. The interpretation of seasonal changes in surface impedance in the open area and in the forest is given. It is shown how the geoelectric section of frozen soils, calculated from the surface impedance, changes in the warm season over three years, in a time series. According to its change, the seasonal influence of climatic factors on the state of frozen soils is interpreted.*

Keyword: *surface impedance, frozen soils, geoelectric structure, time series, state of frozen soils, seasonal changes*

Задача зондирования методом поверхностного импеданса состоит в определении параметров изучаемой среды по структуре электромагнитного поля, создаваемого на ее поверхности удаленным источником. Поле источников, находящихся в дальней зоне, наиболее просто и наглядно представляется в теории плоских волн. Из которой следует, что параметры среды, на которую из верхнего полупространства падает плоская электромагнитная волна, определяют величину отношения горизонтальных взаимно-перпендикулярных компонент поля E_x и H_y на поверхности раздела. Это отношение по аналогии с теорией длинных линий называют [1] поверхностным импедансом

$$Z = \frac{E_x}{H_y}$$

Как известно, электромагнитное поле, проникая в толщу пород, в зависимости от частоты поля и электрических свойств пород, вызывает в ней токи проводимости, определяемые проводимостью пород σ, и токи смещения, определяемые диэлектрической проницаемостью ε.

Для полупроводящих сред первое уравнение Максвелла имеет вид

$$rotH = \sigma E + \varepsilon_a \frac{dE}{dt},$$

где $\sigma E = j_{пр}$ – плотность тока проводимости; $\varepsilon_a \frac{dE}{dt}$ – плотность тока смещения; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды.

Отсюда отношение токов проводимости и смещения записывается как

$$\left|\frac{j_{пр}}{j_{см}}\right| = \left|\frac{\sigma E}{\omega \varepsilon_a E}\right| = \frac{\lambda \sigma}{2\pi c \varepsilon \varepsilon_0} = \frac{60\lambda\sigma}{\varepsilon},$$

и является электромагнитным параметром, определяющим электрические свойства среды для переменного поля в зависимости от его частоты. Если $60\lambda\sigma >> \varepsilon$, то в среде преобладают токи проводимости, а сама она по свойствам приближается к проводнику. Если $60\lambda\sigma << \varepsilon$ – то преобладают токи смещения, а среда близка по свойствам к диэлектрику.

Модуль поверхностного импеданса определяется отношением амплитуд электрической и магнитной горизонтальных составляющих и принимает положительные значения. Аргумент (фаза) импеданса характеризует отставание или опережение по фазе магнитной составляющей относительно электрической и находится в пределах +90°< arg Z<-90°.

В результате мониторинговых исследований сезонных изменений геоэлектрического разреза (ГЭР), по данным радиоимпедансного зондирования [2], получена модель геоэлектрического строения мерзлых грунтов на стационаре ИМЗ СО РАН, которую здесь иллюстрирует сезонное изменение ГЭР во времени (рис. 1).

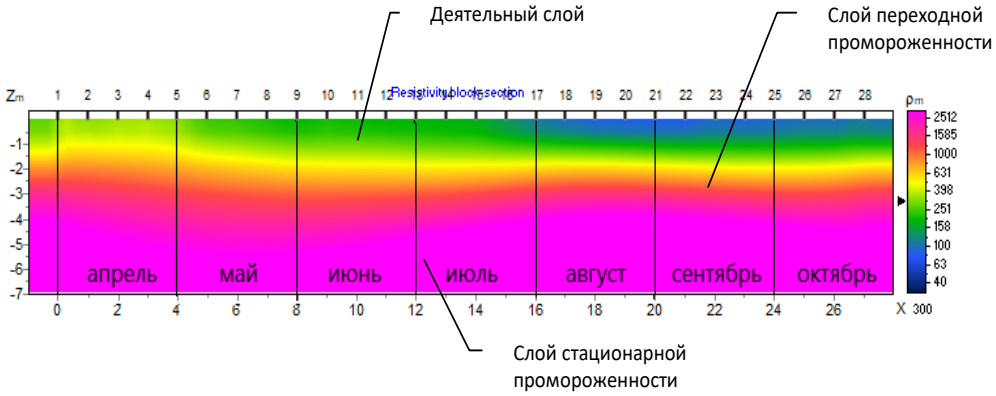


Рис. 1. Временной ряд сезонных изменений геоэлектрического разреза мерзлых грунтов до глубины 7 м, в период с апреля по октябрь

Модель представляется состоящей из трех основных горизонтов: деятельный слой (ДС) (зимой – сезонно-мерзлый, летом – сезонно-талый); слой переходной проморожeнности (СПП), имеющий градиентное изменение льдистости; слой стационарной проморожeнности (ССП) – опорный. Эта модель подтверждается экспериментально полученными результатами режимных радиоимпедансных зондирований в одном пункте, проведенных с интервалом в одну неделю, и представляющих изменения параметров ГЭР грунтов со временем (рис. 1).

Нами проводились режимные радиоимпедансные зондирования (РИЗ) с измерением модуля и фазы поверхностного импеданса грунтов на частотах 22.3, 171, 334, 549 и 864 кГц на луговой и лесной экспериментальных площадках стационара ИМЗ СО РАН «Туймаада».

По периодической зависимости **модуля импеданса** видны следующие характерные особенности изменения его величины на луговой и лесной экспериментальных площадках (рис. 2, 3):

– для частот 549 и 864 кГц они малоотличимы на лугу и значительно отличаются в лесу, что указывает на близость значений толщины скин-слоя для этих частот на лугу и отдаленность значений в лесу;

– максимумы модуля импеданса на частоте 864 кГц на лугу в апреле 2008 (122 Ом) значительно ниже, чем в то же время в лесу (178 Ом), а на частоте 171 кГц, наоборот, они выше на лугу (73 Ом) и ниже на лесу (на уровне 41 Ом) в 2007 и 2008 годах;

– минимумы модуля импеданса на частоте 864 кГц на лугу в октябре 2007 (51 Ом) ниже, чем в лесу в июле 2007 (89 Ом), а на частоте 171 кГц они, напротив, выше на лугу в октябре 2008 (на уровне 53 Ом), чем в лесу в феврале-марте 2007 (26 Ом);

– размах амплитуды колебаний модуля импеданса на частоте 864 кГц на лугу 71 Ом и на лесу 87 Ом, а на частоте 171 кГц на лугу 20 Ом и в лесу 15 Ом;

– малые значения на лугу на частоте 864 кГц длились в 2007 году с июня до начала октября и в 2008 году с конца августа по середину октября, а на частоте 171 кГц в 2007 году с июня по начало ноября и в 2008году с конца августа по середину октября;

– малые значения в лесу длились на частоте 864 кГц в 2007 году с июля по август и в 2008 с конца августа по середину октября, а на частоте 171 кГц с середины ноября по начало апреля в 2007 году.

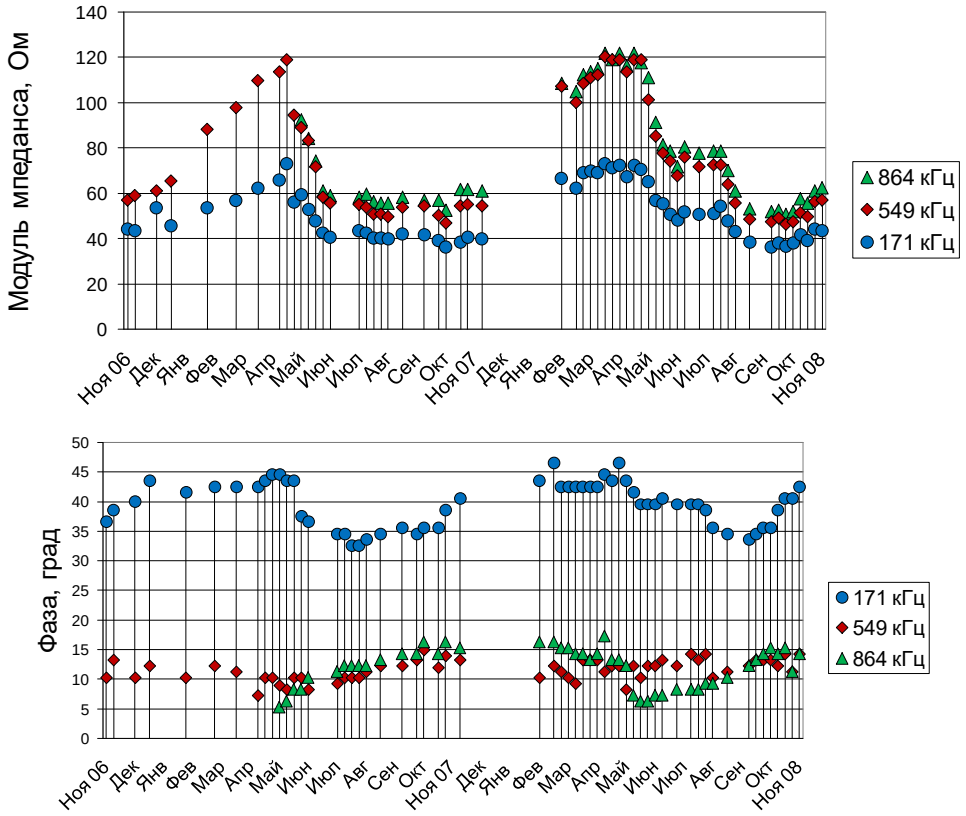


Рис. 2. Модуль и фаза импеданса на луговой площадке

По периодической зависимости **фазы импеданса** видны следующие характерные особенности изменения его величины на луговой и лесной экспериментальных площадках (рис. 2, 3):

– для частот 549 и 864 кГц они, также, как и значения модуля импеданса, малоотличимы на луговой площадке и значительно отличаются на лесной, что указывает на близость значений толщины скин-слоя для этих частот на луговой, а также на отдаленность значений на лесной площадке;

– на луговой площадке максимумы значений наблюдались на частоте 864 кГц в зимний период с октября 2007 до середины февраля 2008 (16°), а на частоте 171 кГц в середине апреля – начале мая 2007(45°) и в феврале-начале мая (47°) 2008 года;

– на луговой площадке минимумы значений наблюдались на частоте 864 кГц в мае 2007 (5°) и в середину мая – начале июня (6°) в 2008, а на частоте 171 кГц в июне-сентябре (33°) 2007 и в августе-октябре (34°) 2008 года;

– на лесной площадке максимумы значений наблюдались на частоте 864 кГц в мерте 2007(61°) и в феврале – начале марта 2008 (62°), а на частоте 171 кГц в марте-апреле (73°) 2007 и в феврале-апреле (73°) 2008 года;

– на лесной площадке минимумы значений наблюдались на частоте 864 кГц в июле-августе (11) 2007 и в августе (20°) 2008, а на частоте 171 кГц в июле (46°) 2007 и в августе (48°) 2008 года;

– размах амплитуды колебаний фазы импеданса на частоте 864 кГц на луговой площадке 11° и на лесной 50°, а на частоте 171 кГц на луговой площадке 14° и на лесной 27°;

– на луговой площадке, на частоте 864 кГц, значения фазы принимают емкостные значения с указанными выше периодами минимумов, а на частоте 171 кГц фаза принимает индуктивные значения в зимние периоды и слабо-емкостные в июне – начале октября 2007 и в августе-сентябре 2008 года;

– на лесной площадке, на частоте 864 кГц, фаза принимает сильно-индуктивные значения в зимние периоды и слабо-емкостные в июне-сентябре 2007 и в июле-сентябре 2008, а на частоте 171 кГц сильно-индуктивные значения в зимние периоды и индуктивные значения в июне-августе 2007 и 2008 годов.

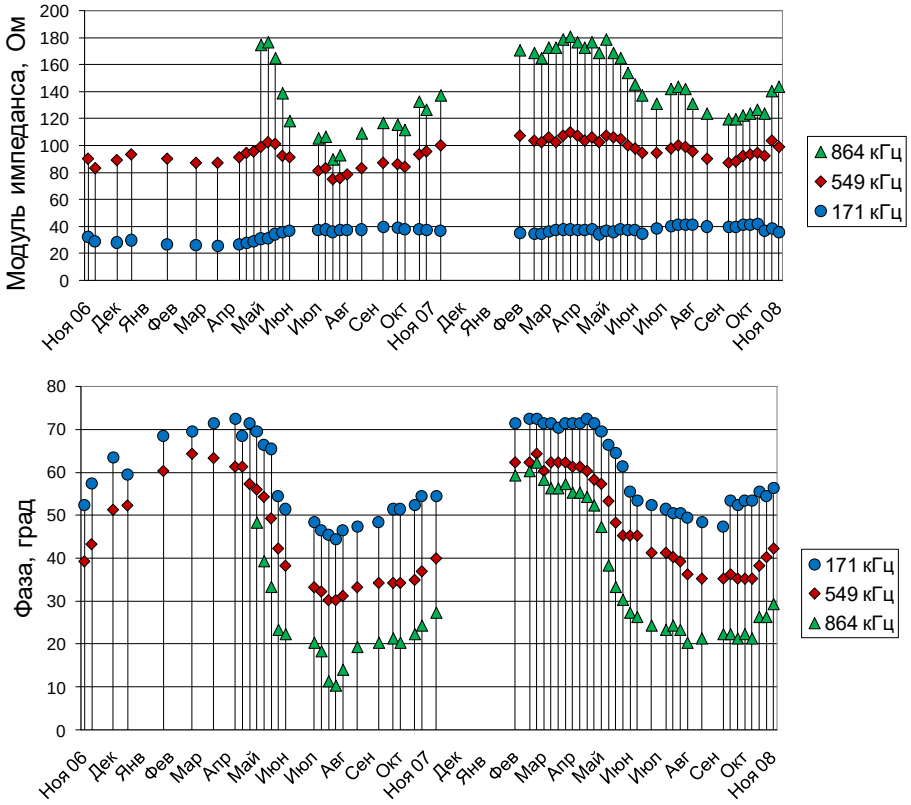


Рис. 3. Модуль и фаза импеданса на лесной площадке

Из результатов наших работ методом РИЗ следует, что изменения модуля импеданса в большей степени реагируют на изменение эффективного сопротивления, при мониторинге, а изменение фазы импеданса в большей степени реагирует на изменение УЭС слоев с определенной мощностью, т. е. на изменение соотношения токов проводимости и смещения.

Интерпретируя изменение параметров поверхностного импеданса мерзлых грунтов во времени, в зависимости от меняющихся условий прохождения теплового потока, необходимо учесть следующее. Для каждой частоты в данное время существует своя толщина скин-слоя, зависящая, кроме геоэлектрического строения, от созданной сезонными климатическими и погодными факторами ситуации. Толщина скин-слоя определяет, тем самым глубинность измерения геоэлектрических параметров на данной частоте, и насколько участвуют в результатах измерения те, или иные слои геоэлектрического разреза, в зависимости от глубины их залегания.

Изменение модуля импеданса на луговой площадке показывает что здесь, близкие по величине значения импеданса на частотах 549 и 864 кГц относятся целиком к деятельному слою (ДС), а на лесной площадке значения на 549 кГц уже отчасти относятся к находящемуся в подошве ДС, промежуточному слою переходной промороженности (СПП). На частоте 171 кГц, с учетом ее толщины скин-слоя, все значения модуля и фазы импеданса относятся к СПП.

Для интерпретации данных мониторинга состояния мерзлых грунтов следует учесть, что теплопроводность ДС определяется его влажностью, а на степень промороженности СПП указывает величина его УЭС. Поэтому, описывая состояния данных слоев оптимально влажность ДС оценивать по его проводимости, а промороженность СПП по его сопротивлению, подразумевая удельное электрическое сопротивление.

Таким образом, на луговой площадке проводимость ДС в апреле 2008 года выше, а на лесной площадке выше сопротивление СПП. То есть на лесной площадке промороженность грунтов ДС выше, чем на луговой площадке. Объяснить это можно, только меньшей высотой снегового покрова на территории лесного массива.

Ситуация с более высокой промороженностью грунтов СПП на луговой площадке в марте-апреле объясняется повышением льдистости ДС, приводящим к повышению теплопроводности влажных грунтов ДС.

Ступенька горизонтальных асимптотических значений модуля и фазы импеданса в июне 2008 года объясняется сочетанием в этот период, сухой погоды при среднемесячном выпадении осадков 15 мм и стабильной средне суточной температуры в пределах 20-21°С, выделяющимся, по сравнению с другими годами.

Проводимость ДС на луговой площадке в конце теплого периода 2007 выше, чем на лесной в самом его разгаре благодаря его меньшей влажности.

Сопротивление же СПП на луговой в конце теплого периода выше, чем на лесной в феврале-марте 2007 года. Низкие значения сопротивления СПП на лесной площадке могут быть вызваны затеканием через межмерзлотный талик грунтовых вод. Наличие межмерзлотного проводящего слоя подтверждается сильно-индуктивными значениями фазы импеданса на частоте 171 кГц, полученными на лесной площадке.

В целом же, сопротивление СПП на луговой площадке в теплый период времени приближается к стабильным круглогодично значениям сопротивления СПП на лесной площадке. В холодный же период года сопротивление СПП на луговой площадке повышается и достигает максимума в марте-апреле, благодаря сезонно повышающейся льдистости ДС.

Изменения геоэлектрического строения во времени (рис. 4), полученные на луговой площадке при мониторинге поверхностного импеданса по результатам еженедельных РИЗ, соответствуют представленной выше модели и демонстрируют вариации СПП в течение трех лет. Здесь СПП имеет величину удельного электрического сопротивления (УЭС) порядка 1500 Ом·м и выделяется красным тоном, а деятельный слой – зеленым. В деятельном слое, мощностью до 1,5 м, УЭС, в зависимости от состояния грунтов, изменяется в пределах 80-450 Ом·м.

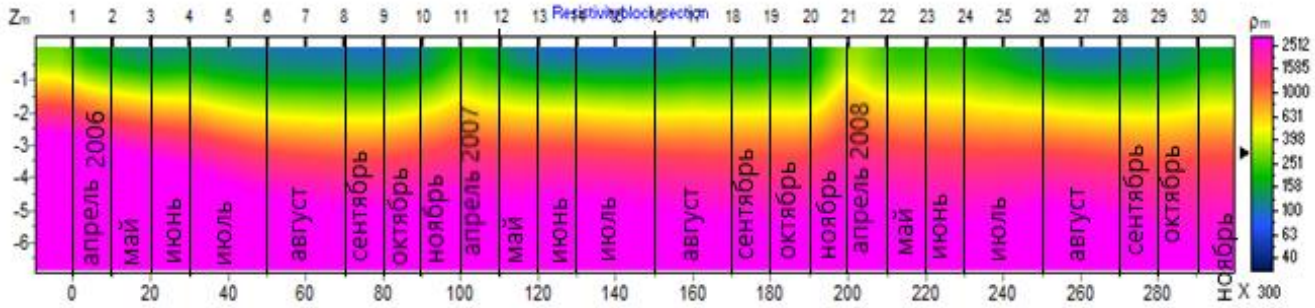


Рис. 4. Временной ряд изменения УЭС в геоэлектрическом разрезе песчаных грунтов на луговой площадке стационара в 2006–2008 годах

Минимальная мощность ДС, оцениваемая в 1 м, наблюдается в марте 2006 года. Весенне-летнее протаивание ДС приводит к максимальным значениям до 2 м в августе-сентябре 2006 года. Зимой, последующего 2007 года, мощный снеговой покров, с максимальной высотой 51 см, приводит к сохранению мощности ДС в апреле этого года на уровне 1,5 м и к ее увеличению до 2 м, вплоть до ноября. В теплый период 2008 года мощность ДС растет от 1 м в апреле до 2 м в ноябре.

Мощность СПП, от минимального значения 1м в апреле 2006 возрастает до 1,5 м в августе-сентябре. В аномальном, по растеплению грунтов, 2007 году и последующем 2008 она возрастает до 2–3 м в августе-сентябре.

Таким образом, аномальное растепление лета 2007 года, вызванное предстоящим высоким снеговым покровом и последующими обильными дождями в июне и августе, привело к необратимым последствиям и в 2008 году.

По изменению УЭС во временном ряду (рис. 4) наблюдаются изменения основных параметров ДС и СПП, а следовательно и прослеживается изменение состояния мерзлых грунтов, необходимое для мониторинга.

Наблюдаемое, при мониторинге, изменение состояния грунтов слоя переходной промороженности, позволит оперативно и заблаговременно, предупредить опасность перехода грунтов данного слоя из мерзлого состояния в пластично-мерзлое.

Список литературы

1. Wait J.R. Electromagnetic Waves in Stratified Media. New York: Macmillan, 1962. Ch. 2. 515 p.
2. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. 204 с.

УДК 551.345_550.837
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-510-513

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОМОРОЖЕННОСТИ И ГРАДИЕНТА ПРОМЕРЗАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Ефремов В.Н.
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
E-mail: vne@mpi.ysn.ru

Аннотация. *Приведено понятие промороженности и слоя переходной промороженности (СПП) с определением его места под деятельным слоем в массиве мерзлых дисперсных грунтов. Показано, какие три сезонных климатических фактора и как оказывают существенное влияние на. промороженность мерзлых грунтов, характеризуемую их удельным электрическим сопротивлением (УЭС). Введен градиент промерзания, характеризуемый по изменению УЭС в СПП. Приведены результаты изменения УЭС в геоэлектрическом разрезе и градиента промерзания СПП, в сопоставлении с параметрами воздействующих климатических факторов, в период с апреля по ноябрь 2006–2008 годов. Предлагается, по изменению промороженности и градиента промерзания СПП, оценивать состояние многолетнемерзлых грунтов. Приведена разработаная методика оперативного прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов по результатам радиоэлектромагнитного мониторинга.*

Ключевые слова: *промерзание грунтов, слой переходной промороженности, градиент промерзания, климатические факторы, прогноз состояния мерзлых грунтов.*

FORECAST OF THE STATE OF FROZEN SOILS, TAKING INTO ACCOUNT THE ACTUAL CHANGES IN FROST PENETRATION DEGREE AND FROST PENETRATION GRADIENT UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS

Efremov V.N..
Melnikovs Permafrost Institute SB RAS

Abstract. *The concept of frost penetration degree and the layer of transitional permafrost (LTP) is given with the definition of its place under the active layer in the array of frozen dispersed soils. It is shown which three seasonal climatic factors have a significant impact on. the frost penetration degree of frozen soils, characterized by their electrical resistivity (RES). A frost penetration gradient has been introduced, characterized by a change in the RES in the LTP. The results of changes in the electrical resistivity in the geoelectric section and the frost penetration gradient of the LTP, in comparison with the parameters of the influencing climatic factors, in the period from April to November 2006–2008, are presented. It is proposed to assess the state of permafrost soils based on changes in the frost penetration and frost penetration gradient of the LTP. A developed methodology for the operational forecast of the state of permafrost soils based on the results of radioelectromagnetic monitoring is presented.*

Keyword: *frost penetration degree, layer of transitional permafros, frost penetration gradient, climatic factors, forecast of the state of frozen soils*

Состояние многолетнемерзлых грунтов определяет устойчивость образуемой ими природно-технической системы в основании зданий и инженерных сооружений. Поэтому так важен прогноз его изменения, под климатическим воздействием. Его оперативный прогноз – это расчетная оценка состояния грунтов, ожидаемого в ближайший месяц, в зависимости от воздействия на него климатических факторов, и оцениваемого на основании метеорологического прогноза. Основными климатическими факторами, значимо влияющими на состояние многолетнемерзлых грунтов, являются, по нашим представлениям, температура приземного воздуха, высота снегового покрова и дождевые осадки.

Влияние климатических факторов на состояние многолетнемерзлых грунтов изучено нами в результате радиоэлектромагнитного мониторинга, разработанного и проводимого нами с 2005 года на территории стационара ИМЗ СО РАН. Мониторинг проводился с 2005 года радиоимпедансным [1], а с 2017 – РМТ зондированиями бесконтактным способом. Наблюдаемыми сезонно-еженедельно параметрами являются удельные электрические сопротивления (УЭС) слоев грунтового массива, определяемые по результатам зондирования. Для геокриологической оценки состояния массива нами разработаны методики определения, по величине УЭС слоев, показателей влажности и льдистости грунтов.

Основное внимание, по понятным причинам, уделяем влиянию климатических факторов на состояние верхней части массива дисперсных многолетнемерзлых грунтов, которую называем слоем переходной промороженности (СПП) [2]. Слой этот находится в подошве деятельного слоя (ДС). С глубиной, промороженность грунтов СПП возрастает до тех пор, пока не сравняется на его кровле со стабильным значением подстилающего опорного горизонта стационарной промороженности. Количественно, промороженность СПП, оцениваем по величине его УЭС на данной глубине и показателю льдистости. Ориентировочно, СПП занимает свое положение в песчаном массиве на глубине от 2 до 4 и более метров. Именно этот слой, наряду с деятельным слоем, представляется подверженным опасным деструктивным изменениям, вплоть до перехода в пластично-мерзлое, или даже талое состояние, при глобальном потеплении климата.

Влияние каждого, из трех указанных климатических факторов, нами изучено и оценено [3]. Оно может быть использовано для оперативного прогнозирования параметров и состояния ДС и СПП. Для этого и для расчета показателей влажности ДС и льдистости СПП разработаны соответствующие формулы.

Температура приземного воздуха является основным климатическим фактором, влияющим на состояние мерзлых грунтов. Влияние остальных климатических факторов в изменении состояния грунтов СПП сводится к различающемуся воздействию осадков на тепловой поток, порождаемый воздействием температуры приземного воздуха (рис. 1).

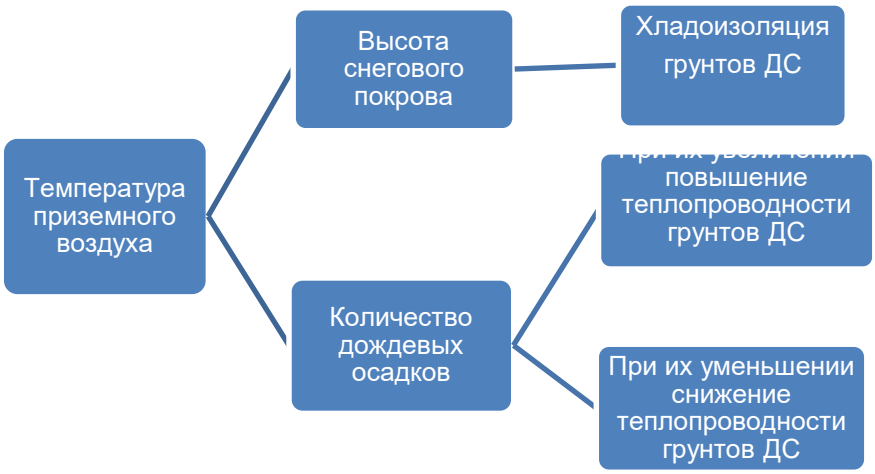


Рис. 1. Схема взаимосвязи климатических факторов с типом их воздействия на изменяющий состояние грунтов тепловой поток

Снеговой покров снижает воздействие отрицательных температур теплового потока, уменьшая, тем самым, зимнее промерзание ДС и последующее промерзание СПП сверху. Изменение теплопроводности грунтов ДС влияет на величину теплового потока. Соответственно изменяется и его воздействие, на грунты СПП, значительная степень которого и отражается на их промороженности.

Параметром, показывающем результат изменения промороженности грунтов, определяющей их состояние, является УЭС грунтов. Его изменение по глубине демонстрирует степень воздействия климатических факторов на грунты ДС и СПП. В результате сопоставления данных УЭС с метеоданными за теплый период – с апреля по ноябрь, по трем годам (рис. 2), отмечается нижеследующее.

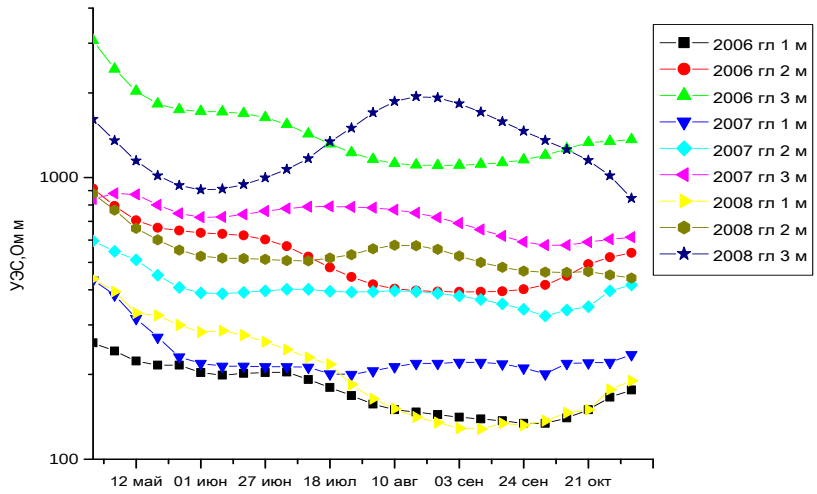


Рис. 2. Изменение УЭС в апреле-ноябре 2006–2008 годов, на различной глубине от дневной поверхности

Опорная картина типового изменения УЭС приходится на 2006 год, когда, после зимнего промерзания, при максимальной высоте снегового покрова 49 см, величина УЭС в ДС в апреле, на глубине 1 м, составила всего лишь 276 Ом·м, а на глубине 2 м – 952 Ом·м. В то же время, УЭС СПП на глубине 3 м – уже 3070 Ом·м. В ДС, при максимальном оттаивании, УЭС снизилось до 134 Ом·м на глубине 1 м в конце сентября и до 393 Ом·м на глубине 2 м в начале сентября. В СПП максимальное снижение УЭС происходило, ожидаемо, в августе и достигло 1104 Ом·м.

В 2007 году, аномальном по растеплению грунтов, при максимальной высоте снегового покрова 51 см, УЭС ДС в апреле, на глубине 1 м повысилось, по сравнению с 2006, до 433 Ом·м. Тогда как на глубине 2 м – напротив, понизилось до 596 Ом·м – после дождя в конце апреля. Понизилось УЭС и в СПП до 839 Ом·м, на глубине 3 м. В июне значения УЭС ДС на глубине 1 м выровнялись с июньскими значениями ДС на 1 м в 2006 году. Произошло это под действием дождя в начале июня и весьма обильного дождя в начале июля. На глубине 2 м, в августе, УЭС выровнялось с августовским значением 2006 года. В то же время, в июне-августе УЭС СПП, под воздействием осадков, снизилось до 750 Ом·м и достигло в начале октября минимального значения 575 Ом·м, почти вдвое меньшего, чем в 2006 году.

В 2008 году максимальная высота снегового покрова 49 см, такая же, как и в 2006, привела к значению УЭС, в апреле на 1 м, 455 Ом·м, близкому к значению в 2007 году. На этой глубине значения УЭС ДС в августе-октябре практически совпали со значениями 2006 года. Значения УЭС СПП на глубине 3 м в июне, от значений, близких к июньским 2007 года, значительно возросли к июлю и резко возросли к августу, достигнув максимального значения 1940 Ом·м в середине августа, приблизившись к максимуму 2006 года, составившему в апреле 3070 Ом·м. В дальнейшем УЭС СПП понизилось в сентябре-октябре до 845 Ом·м.

Еще одним параметром, показывающим изменение промороженности СПП, под воздействием климатических факторов, является градиент их промерзания сверху в зимний период. Характеризуется он градиентом десятичного логарифма УЭС на отрезках глубины относящихся к переходу от ДС к СПП (рис. 3).

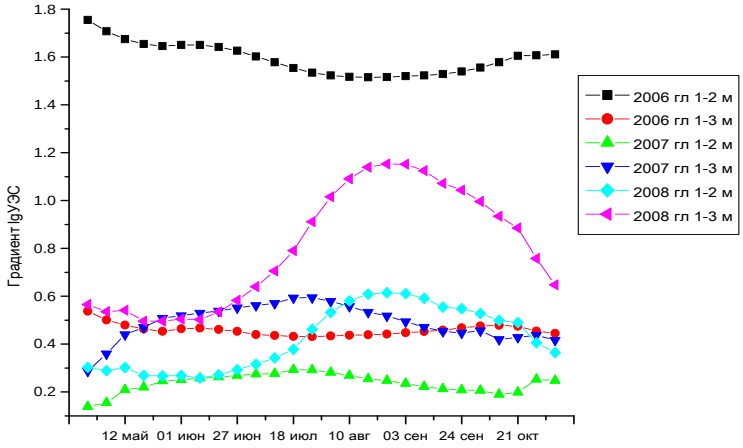


Рис. 3. Изменение градиента промерзания в апреле-ноябре 2006–2008 годов на отрезках глубины залегания грунтов СПП

Здесь, данные 2006 года показывают незначительные изменения градиента промерзания на уровне 0,5 внутри отрезка глубины 1-3 м, относящегося в большей степени к СПП. Более значимы изменения градиента промерзания на уровне 1,7 внутри отрезка глубины 1-2 м, относящиеся к пограничной области между ДС и СПП. Они показывают снижение градиента промерзания до уровня 1,6 в августе-сентябре.

В 2007 году наблюдается совершенно иная картина. На отрезке глубины 1-3 м (СПП) происходит повышение градиента промерзания от уровня 0,3 до 0,6. Оно вызвано снижением УЭС нижней части ДС, из-за аномального растепления. На отрезке 1–2 м происходят малозначимые повышения градиента промерзания от уровня 0,1 до 0,3 в июле и от уровня 0,2 до 0,3 в конце октября.

В апреле-июне 2008 года градиент промерзания на отрезке 1-3 м (СПП) достигает того же уровня 0,5, что и в 2006 году. С июля он возрастает, достигая максимального значения 1,16 в конце августа и снижается далее до 0,6 к ноябрю. На отрезке 1–2 м градиент промерзания возрастает от 0,3 в апреле, достигая максимума в 0,62 также, в конце августа, и снижаясь, далее, до 0,4 к ноябрю.

Таким образом, наряду с промороженностью грунтов СПП, для описания состояния мерзлых грунтов и его прогнозирования, выдвигается градиент промерзания СПП, характеризуемый градиентом десятичного логарифма УЭС СПП.

Нами разработана методика оперативного прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов по результатам радиоэлектромагнитного мониторинга их состояния, на основе контроля мощности и УЭС деятельного слоя и слоя переходной промороженности, а также промороженности и градиента промерзания этого слоя. Она содержит алгоритм расчета прогнозируемого геоэлектрического разреза (ГЭР) на основе учета данных радиоэлектромагнитного мониторинга и пошаговый расчет прогнозируемого летнего воздействия, в заданный период, каждого климатического фактора на ГЭР, полученный при весеннем мониторинге. То есть за отправную точку берется состояние грунтов, выраженное в ГЭР, который определяется по результатам весеннего радиоэлектромагнитного мониторинга. Последний, в финальной точке, преобразуется в прогнозное для теплого периода (май-октябрь) состояние. При этом возможен учет всех прогнозируемых сценариев погоды на предстоящий теплый период. Оперативный прогноз позволит провести превентивные мероприятия при аномально развивающейся погодной ситуации для устранения, либо снижения возможных деструктивных последствий изменения состояния грунтов.

Список литературы

1. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2013. 204 с.
2. Ефремов В.Н. Новый подход к мониторингу состояния грунтов криолитозоны: наблюдения за степенью их промороженности с оценкой льдистости по электрическому сопротивлению // Сборник докладов шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. Москва, 2022 г. С.392-398.
3. Ефремов В.Н. Геофизический мониторинг состояния мерзлых грунтов // «Целостность и ресурс в экстремальных усдовиях. Сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН 19–23 сентября 2024 г. – Издательство АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании». Киров, 2024. С.146-149.

УДК 614.833.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-514-519

ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА ОТ АВАРИЙ ПОДЗЕМНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Захарова М.И.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: marine3@yandex.ru

Аннотация. *В статье представлена модель оценки индивидуального риска аварий подземных участков газопроводов при аномальных метеоусловиях Севера.*

Аномальные метеоусловия Севера характеризуются низкими температурами окружающего воздуха и мощными продолжительными температурными инверсиями в сочетании со штилем. Эти внешние параметры окружающей среды оказывают влияние как на частоту аварий, так и на дальность зоны действия поражающих факторов при аварии.

Оценка индивидуального риска проводится для повышения промышленной безопасности опасных производственных объектов.

Ключевые слова: *дерево событий, частота, инверсия, индивидуальный риск.*

INDIVIDUAL RISK ASSESSMENT OF UNDERGROUND SECTIONS OF THE NORTH GAS PIPELINES IN WINTER

Zakharova M.I.
The Institution of Russian Academy of Sciences the V.P. Larionov's Institut of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS

Abstract. *The article presents a model for assessing the individual risk of accidents in underground gas pipelines under abnormal meteorological conditions in the North.*

Abnormal meteorological conditions in the North are characterized by low ambient temperatures and strong, prolonged temperature inversions combined with calm weather. These external environmental parameters have an impact on both the frequency of accidents and the range of the damaging factors in an accident.

The assessment of individual risk is conducted to improve the industrial safety of hazardous production facilities.

Keyword: *event tree, frequency, inversion, individual risk.*

Газопроводы являются источником повышенной опасности из-за большого количества сварных и фланцевых соединений, запорной и регулирующей арматуры, жестких условий работы с высоким уровнем внутренних напряжений и значительных объемов веществ, перемещаемых по ним. Поэтому, даже относительно незначительное отклонение фактических условий эксплуатации от принятых в проектных расчетах могут привести к выбросу значительного количества опасных веществ.

Определенный интерес представляет оценка индивидуального риска от аварий газопроводов, эксплуатирующихся в экстремальных природно-климатических условиях Севера.

В условиях Севера, определяющими внешними факторами являются низкие температуры атмосферного воздуха и аномальные неблагоприятные метеорологические условия, характеризующиеся продолжительными температурными инверсиями в сочетании со штилем. Эти внешние параметры окружающей среды оказывают влияние как на частоту аварий, так и на дальность зоны действия поражающих факторов при аварии.

Важнейшим этапом оценки риска является оценка частот отказов и сценариев развития аварийных ситуаций на газопроводах.

По результатам анализа аварий газопроводов, произошедших в условиях Севера, выявлены основные причины аварий газопроводов, разработано «дерево отказов» истечения газа из подземных участков газопроводов с оценкой частот реализации отказов, рис. 1.

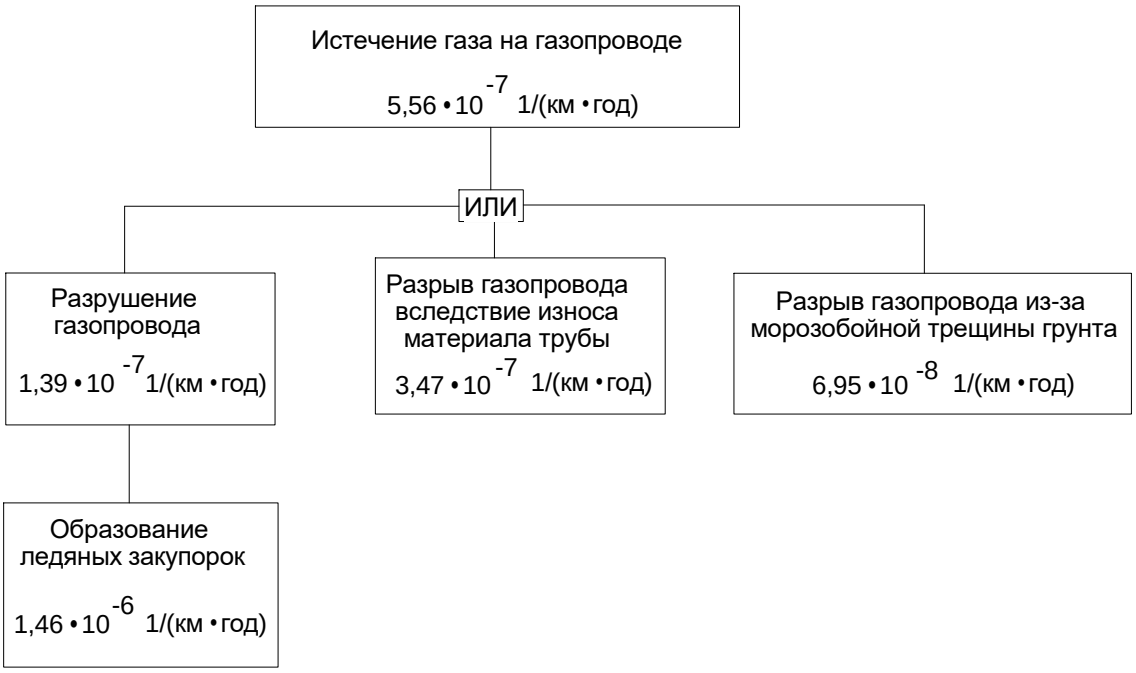


Рис. 1. «Дерево отказов» истечения газа при разрыве подземного газопровода

Основная опасность аварий газопроводов, приводящая к выбросу значительного количества опасных веществ, связана с полным разрушением газопровода. По анализу аварий газопроводов, разрыв на полное сечение имеет место в основном для подземных участков газопровода и составляет 5,56 · 10 $^{-7}$ 1/(км·год). Наиболее частыми причинами разрыва газопровода являются: образование ледяных закупорок и износ материала трубы.

Разгерметизация или порыв газопровода с выбросом значительного количества опасных веществ, может привести к скоплению взрывоопасной газовоздушной смеси метана в окружающей атмосфере.

Наиболее значительное скопление взрывоопасной газовоздушной смеси метана в окружающей атмосфере имеет место, когда появляются неблагоприятные для ее рассеивания метеорологические условия [1]. К опасным метеорологическим условиям относятся застои воздуха, характеризующиеся очень слабыми ветрами 0–2 м/с и температурные инверсии.

В холодное время года всю территорию Восточной Сибири охватывает мощный сибирский антициклон, в котором происходит формирование континентального воздуха, в нижних слоях более холодного, чем арктический. Формирование континентального воздуха в зимнее время при ясной тихой погоде, способствующей большой потере тепла земной поверхностью в результате излучения, приводит к сильному охлаждению воздуха снизу и образованию мощных температурных инверсий, т. е. к возрастанию температуры с высотой [2].

Рассмотрим вероятность образования облака взрывоопасной газовоздушной смеси (ГВС) метана в окружающей атмосфере.

Частоту образования облака взрывоопасной ГВС метана $\lambda_{\text{гвс}}$ оцениваем как произведение следующих параметров: частоты разрыва на полное сечение подземного газопровода $\lambda_{\text{ист}}$ на вероятность появления опасных метеорологических условий $\text{P}_{\text{ому}}$:

$$\lambda_{\text{гвс}} = \lambda_{\text{ист}} \cdot \text{P}_{\text{ому}}$$

По результатам анализа метеоданных с 1997 по 2024 г. получены вероятности появления опасных метеоусловий по месяцам в зимнее время, табл.1.

Таблица 1. Вероятности появления опасных метеоусловий

Месяцы	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
Вероятности появления опасных метеоусловий, $\text{P}_{\text{ому}}$	0,03	0,73	0,87	0,87	0,75	0,29	0,07

Из таблицы 1 видно, что в зимний период наибольшая вероятность появления опасных метеорологических условий наблюдается в январе месяце. Наиболее опасными периодами являются ноябрь, декабрь, январь, февраль месяцы, где вероятность образования температурной инверсии со штилем в среднем составляет 0,73–0,87.

По результатам анализа известных аварий газопроводов, произошедших при низких температурах, разработано «дерево событий» истечения газа из газопровода с оценкой частот реализации аварийных сценариев, рис. 2

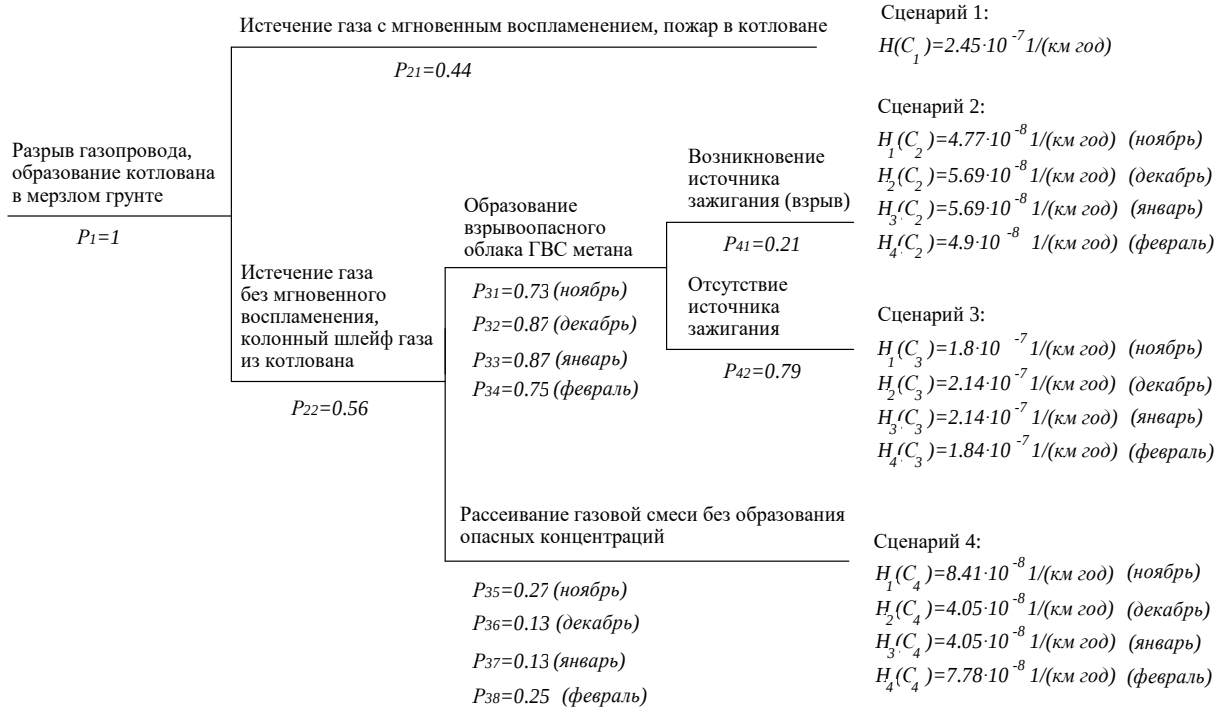


Рис. 2. «Дерево событий» истечения газа из подземного участка газопровода при низких температурах окружающей среды

Из рисунка 2 видно, что наиболее частыми сценариями являются сценарий 1 – «пожар в котловане» и сценарий 3 – истечение газа из газопровода с образованием облака ГВС метана без последующего воспламенения, их частоты составляют $2{,}45\cdot10^{-7}$ 1/(км·год) и $2{,}14\cdot10^{-7}$ 1/(км·год) соответственно.

Наиболее опасными являются сценарии 1 и 2, поражающими факторами которых являются тепловое излучение и ударная волна.

Оценку индивидуального риска проводим для сценариев 1 и 2.

Индивидуальный риск в основном определяется потенциальным риском $R_{\text{пот}}$ и вероятностью поражения человека в районе возможного действия опасных факторов $P_{\text{пор}}$.

Согласно РБ [3] потенциальный риск трактуется как частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории.

Таким образом, оценку потенциального риска $R_{\text{пот}}$ проводим по следующим формулам:

– для сценария 1:

$$R_{\text{пот}}^{(1)} = \lambda_{\text{ист}} \cdot \mathrm{P}_{21}$$

где

$\lambda_{\text{ист}}$ – частота разрыва на полное сечение подземного газопровода, 1/(км·год);

P_{21} – вероятность истечения газа с мгновенным воспламенением;

– для сценария 2:

$$R_{\text{пот}}^{(2)} = \lambda_{\text{ист}} \cdot \mathrm{P}_{22} \cdot P_{\text{ому}} \cdot P_{41}$$

где

P_{22} – вероятность колонного шлейфа газа из котлована;

$P_{\text{ому}}$ – вероятность появления опасных метеоусловий по месяцам;

P_{41} ($P_{\text{заж}}$) – вероятность появления источника зажигания.

Таким образом модель оценки потенциального риска $R_{пот}^{(2)}$ при сценарии 2 – взрыве облака (ГВС) метана в открытом пространстве примет следующий вид:

$$R_{пот} = \lambda_{ист} \cdot P_{22} \cdot P_{заж} \cdot \begin{cases} P_{ому} = 0{,}73 \text{ (ноябрь)} \\ P_{ому} = 0{,}87 \text{ (декабрь, январь)} \\ P_{ому} = 0{,}75 \text{ (февраль)} \end{cases} \quad (1)$$

Результаты оценки потенциального риска $R_{пот}^{(2)}$ по формуле (1) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Оценка потенциального риска с учетом аномальных метеоусловий Севера

Месяцы	**Потенциальный риск, 1/(км·год)**
ноябрь	$4{,}77 \cdot 10^{-8}$
декабрь	$5{,}69 \cdot 10^{-8}$
январь	$5{,}69 \cdot 10^{-8}$
февраль	$4{,}9 \cdot 10^{-8}$

Индивидуальный риск $R_{инд}$ оцениваем по следующей формуле:

$$R_{инд} = R_{пот} \cdot P_{пор}$$

где $P_{пор}$ – вероятность поражения человека в районе возможного действия теплового излучения.

Величина вероятности поражения человека выражается функцией Гаусса через пробит-функцию:

$$P_{пор} = f[\mathrm{Pr}(D)]$$

Пробит-функция описывается следующим выражением [4]:

$$\mathrm{Pr} = -12{,}8 + 2{,}56 \cdot ln(D)$$

$$D = t \cdot q^{4/3}$$

$$t = t_0 + \frac{x_б}{u_{ср}}$$

где t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях (принимается равным 5 с);

$x_б$ – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 1,4 кВт/м^2), м;

$u_{ср}$ – средняя скорость движения человека к безопасной зоне (принимается 5 м/с);

D – доза тепловой радиации, (кВт/м^2)$^{4/3}$·с.

Низкие температуры влияют на дальность безопасного расстояния, увеличивая коэффициент пропускания атмосферы, тем самым увеличивая интенсивность теплового излучения.

Результаты оценки условной вероятности поражения человека в зависимости от расхода газа с учетом низких температур представлены в таблице 3.

Таблица 3. Вероятность поражения человека в зависимости от расхода газа с учетом низких температур

G, кг/с	t, с	D, (кВт/м^2)$^{4/3}$·с	Pr	Поражение, %
80	35,2	758	4,18	20
160	42,2	909	4,64	30,6
240	47,4	1021	4,94	40,8
320	52,8	1138	5,21	50,8
400	56,8	1224	5,4	60,6

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара и в зонах, где интенсивность теплового излучения превышает 10 кВт/м^2, принимаем равной 1.

Таким образом, индивидуальный риск $R_{инд}$ в зоне действия открытого пламени и в зонах, где интенсивность теплового излучения превышает 10 кВт/м^2 при реализации сценария 1, составит $2{,}45 \times 10^{-7}$ 1/(км·год).

Индивидуальный риск при реализации сценария 1 в зонах, где интенсивность теплового излучения от 10 кВт/м^2 до 1,4 кВт/м^2 в зависимости от расхода газа представлена в таблице 4.

Таблица 4. Индивидуальный риск в зонах, где интенсивность теплового излучения от 10 кВт/м^2 до 1,4 кВт/м^2 в зависимости от расхода газа

Потенциальный риск 1/(км·год)	Индивидуальный риск, 1/(км·год)				
	Расход газа, кг/с				
	80	160	240	320	400
$2{,}45\cdot10^{-7}$	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$7{,}5\cdot10^{-8}$	$1\cdot10^{-7}$	$1{,}24\cdot10^{-7}$	$1{,}48\cdot10^{-7}$

Для оценки индивидуального риска при фугасном поражении человека возможно использование распределения Вейбулла [5]:

$$F(\Delta p) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\Delta p - \Delta p_{пор}}{\eta}\right)^{\xi}\right]$$

где $F(\Delta p)$ – функция вероятностей летальных исходов в зависимости от величины избыточного давления ударной волны Δp; η, ξ, $\Delta p_{пор}$ – параметры закона распределения Вейбулла: η – параметры масштаба; ξ, – параметр формы; $\Delta p_{пор}$ – параметр положения (порог поражения индивиидума).

Результаты оценки индивидуального риска при фугасном воздействии ударной волны представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты оценки индивидуального риска при фугасном воздействии ударной волны с учетом аномальных метеоусловий Севера при аварии подземных участков газопровода

Месяцы	Потенциальный риск, 1/(км·год)	Индивидуальный риск, 1/(км·год)			
		Δp = 30 кПа			
		Легкое поражение	Среднее поражение	Тяжелое поражение	Смертельный исход
ноябрь	$4{,}77\cdot10^{-8}$	$3{,}72\cdot10^{-8}$	$8{,}35\cdot10^{-9}$	$2{,}67\cdot10^{-9}$	$7{,}63\cdot10^{-10}$
декабрь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$4{,}43\cdot10^{-8}$	$9{,}96\cdot10^{-9}$	$3{,}19\cdot10^{-9}$	$9{,}1\cdot10^{-10}$
январь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$4{,}43\cdot10^{-8}$	$9{,}96\cdot10^{-9}$	$3{,}19\cdot10^{-9}$	$9{,}1\cdot10^{-10}$
февраль	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$3{,}82\cdot10^{-8}$	$8{,}58\cdot10^{-9}$	$2{,}74\cdot10^{-9}$	$7{,}84\cdot10^{-10}$
		Δp = 60 кПа			
ноябрь	$4{,}77\cdot10^{-8}$	$4{,}76\cdot10^{-8}$	$3{,}9\cdot10^{-8}$	$2{,}42\cdot10^{-8}$	$1{,}28\cdot10^{-8}$
декабрь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}68\cdot10^{-8}$	$4{,}65\cdot10^{-8}$	$2{,}88\cdot10^{-8}$	$1{,}52\cdot10^{-8}$
январь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}68\cdot10^{-8}$	$4{,}65\cdot10^{-8}$	$2{,}88\cdot10^{-8}$	$1{,}52\cdot10^{-8}$
февраль	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}895\cdot10^{-8}$	$4{,}01\cdot10^{-8}$	$2{,}48\cdot10^{-8}$	$1{,}31\cdot10^{-8}$
		Δp = 90 кПа			
ноябрь	$4{,}77\cdot10^{-8}$	$4{,}77\cdot10^{-8}$	$4{,}75\cdot10^{-8}$	$4{,}4\cdot10^{-8}$	$3{,}62\cdot10^{-8}$
декабрь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}66\cdot10^{-8}$	$5{,}25\cdot10^{-8}$	$4{,}32\cdot10^{-8}$
январь	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}69\cdot10^{-8}$	$5{,}66\cdot10^{-8}$	$5{,}25\cdot10^{-8}$	$4{,}32\cdot10^{-8}$
февраль	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}88\cdot10^{-8}$	$4{,}52\cdot10^{-8}$	$3{,}72\cdot10^{-8}$

Предлагаемые различными зарубежными организациями и специалистами пороговые значения индивидуального риска колеблются от 10^{-3} до 10^{-8}. В Нидерландах, Дании и Франции, эта величина составляет 10^{-6} в год.

В работе [5] предлагается использовать в расчетах следующие уровни критериев индивидуального риска для населения:

1. Для действующих опасных производственных объектов: уровень риска более 10^{-4} в год – зона недопустимого риска; менее 10^{-4} в год, но более 10^{-5} в год – зона жесткого контроля риска; менее 10^{-5} в год – зона приемлемого риска.
2. Для строительства новых объектов уровень риска должен быть снижен для каждой зоны на порядок.

Результаты оценки индивидуального риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений по чрезвычайному реагированию, а также для определения места размещения опасных производственных объектов. В целях безопасности населения от промышленных взрывов и пожаров необходима оценка зон потенциального и индивидуального риска от аварий с учетом внешних метеорологических условий Севера.

Список литературы

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.
2. Безуглая Э. Ю., Виноградова Е. В., Елекоева Л. П. и др. Инверсии температуры над территорией СССР // Труды ГГО. 1977. Вып. 387. С.88-109
3. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28.11.2022 г.
4. Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3.11.2022 г.
5. Козлитин А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: СГТУ, 2002. 180 с.

УДК 614.833.4
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-520-525

ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РИСКА ОТ АВАРИЙ НАДЗЕМНЫХ УЧАСТКОВ ГАЗОПРОВОДОВ СЕВЕРА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Захарова М.И.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»
E-mail: marine3@yandex.ru

Аннотация. *Повышение промышленной безопасности опасных производственных объектов, работающих в условиях Севера, требует всестороннего учета влияния специфических для данного района природно-климатических факторов на параметры риска.*

Низкие температуры и аномальные метеоусловия Севера оказывают существенное влияние как на частоту аварий, так и на развитие аварий.

Аномальные метеоусловия Севера характеризуются мощными температурными инверсиями, возникающими при антициклоне за счет излучения вечномерзлого грунта при экстремально низких температурах окружающего воздуха, и условиями застоя воздуха.

В статье представлена модель оценки индивидуального риска аварий надземных участков газопроводов с учетом аномальных метеоусловий Севера. Оценены потенциальный и индивидуальный риски при взрыве облака газовоздушной смеси метана на открытой местности и тепловом поражении.

Ключевые слова: *дерево событий, частота, инверсия, индивидуальный риск.*

INDIVIDUAL RISK ASSESSMENT OF ABOVEGROUND SECTIONS OF THE NORTH GAS PIPELINES IN WINTER

Zakharova M.I.,
The Institution of Russian Academy of Sciences the V.P. Larionov's Institut of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS

Abstract. *Improving the industrial safety of hazardous production facilities operating in the North requires a comprehensive consideration of the impact of natural and climatic factors specific to this region on risk parameters.*

Low temperatures and abnormal weather conditions in the North have a significant impact on both the frequency of accidents and their progression.

The abnormal weather conditions in the North are characterized by strong temperature inversions caused by the radiation of permafrost at extremely low ambient temperatures during anticyclones, as well as stagnant air conditions.

The article presents a model for assessing the individual risk of accidents in above-ground sections of gas pipelines, taking into account the abnormal weather conditions in the North. The potential and individual risks of an explosion of a methane gas-air mixture in an open area and thermal injury are evaluated.

Keyword: *event tree, frequency, inversion, individual risk.*

Суровые природно-климатические условия Севера значительно снижают надежность и безопасность эксплуатации газопроводов. Неконтролируемое развитие аварийных ситуаций может привести к катастрофическим разрушениям и гибели людей.

Анализ риска – новое научное направление, представляет собой один из существенных компонентов обеспечения безопасности и проводится для выявления отдельных источников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам.

Определенный интерес представляет анализ риска аварийного истечения газа на надземных участках газопроводов при аномальных метеоусловиях Севера.

В условиях Севера, определяющими внешними факторами являются низкие температуры атмосферного воздуха и аномальные неблагоприятные метеорологические условия, характеризующиеся

продолжительными температурными инверсиями в сочетании со штилем. Эти внешние параметры окружающей среды оказывают влияние как на частоту аварий, так и на дальность зоны действия поражающих факторов при аварии.

Важнейшим этапом оценки риска является оценка частот отказов и сценариев развития аварийных ситуаций на газопроводах.

По результатам анализа аварий газопроводов, произошедших в условиях Севера, выявлены основные причины аварий газопроводов, разработано «дерево отказов» истечения газа из надземных участков газопроводов с оценкой частот реализации отказов, рис. 1.

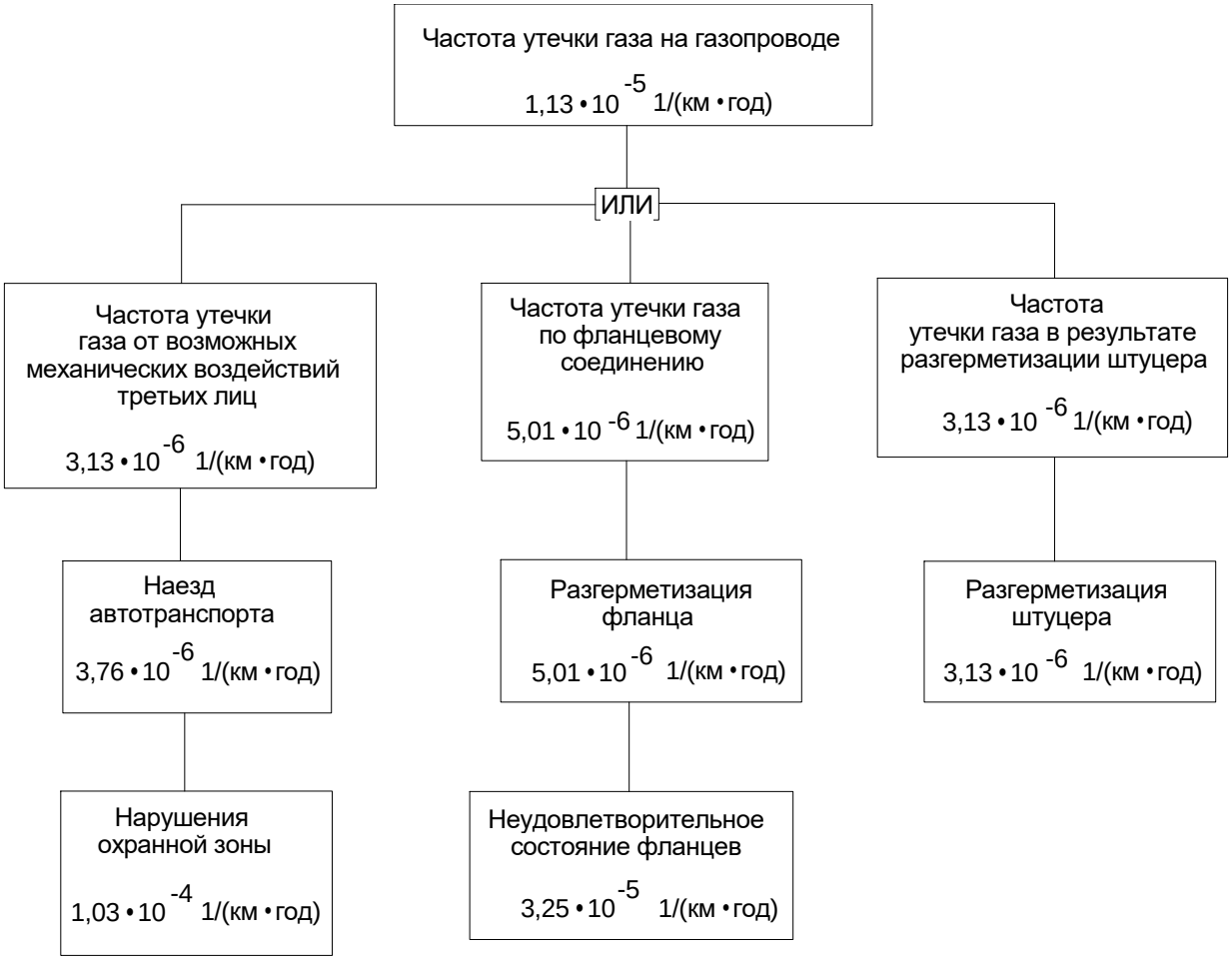


Рис. 1. «Дерево отказов» истечения газа при разрыве надземного участка газопровода

Статистический анализ причин аварий газопроводов показал, что основными причинами возникновения утечек газа на надземных участках газопровода являются: неисправности во фланцевых соединениях, разгерметизации штуцеров и механические воздействия третьих лиц. Частота утечки газа из надземного участка газопровода составила $1{,}13 \cdot 10^{-5}$ 1/(км·год). Наиболее частыми утечками являются утечки газа из-за разгерметизации фланцев – $5{,}01 \cdot 10^{-6}$ 1/(км·год).

При разгерметизации или порыве газопровода возможен выброс значительного количества опасных веществ.

Необходимо отметить, в открытой местности метан относительно взрывобезопасен, в связи с его малой плотностью. Однако опасность взрыва существует при наличии температурной инверсии в сочетании с застоем воздуха.

Инверсия в метеорологии означает аномальный характер изменения какого-либо параметра в атмосфере с увеличением высоты. Наиболее часто это относится к температурной инверсии, то есть к увеличению температуры с высотой в некотором слое атмосферы вместо обычного понижения.

В работе [1] проведено исследование влияния температурной инверсии и штиля на концентрацию примесей в воздухе. В результате выявлено, что совместное действие штиля и температурной инверсии является наиболее опасным.

Рассмотрим вероятность образования облака взрывоопасной газовоздушной смеси (ГВС) метана в окружающей атмосфере.

Частоту образования облака взрывоопасной ГВС метана $\lambda_{\text{гвс}}$ оцениваем как произведение следующих параметров: частоты утечки газа из надземного участка газопровода $\lambda_{\text{ист}}$ на вероятность появления опасных метеорологических условий $\text{P}_{\text{ому}}$:

$$\lambda_{\text{гвс}} = \lambda_{\text{ист}} \cdot \text{P}_{\text{ому}}$$

По результатам анализа метеоданных с 1997 по 2024 г. получены вероятности появления опасных метеоусловий по месяцам в зимнее время, табл.1.

Таблица 1. Вероятности появления опасных метеоусловий

Месяцы	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
Вероятности появления опасных метеоусловий, $\text{P}_{\text{ому}}$	0,03	0,73	0,87	0,87	0,75	0,29	0,07

Из таблицы 1 видно, что в зимний период наибольшая вероятность появления опасных метеорологических условий наблюдается в январе месяце. Наиболее опасными периодами являются ноябрь, декабрь, январь, февраль месяцы, где вероятность образования температурной инверсии со штилем в среднем составляет 0,73–0,87.

По результатам анализа известных аварий газопроводов, произошедших при низких температурах, разработано «дерево событий» истечения газа из газопровода с оценкой частот реализации аварийных сценариев, рис. 2.

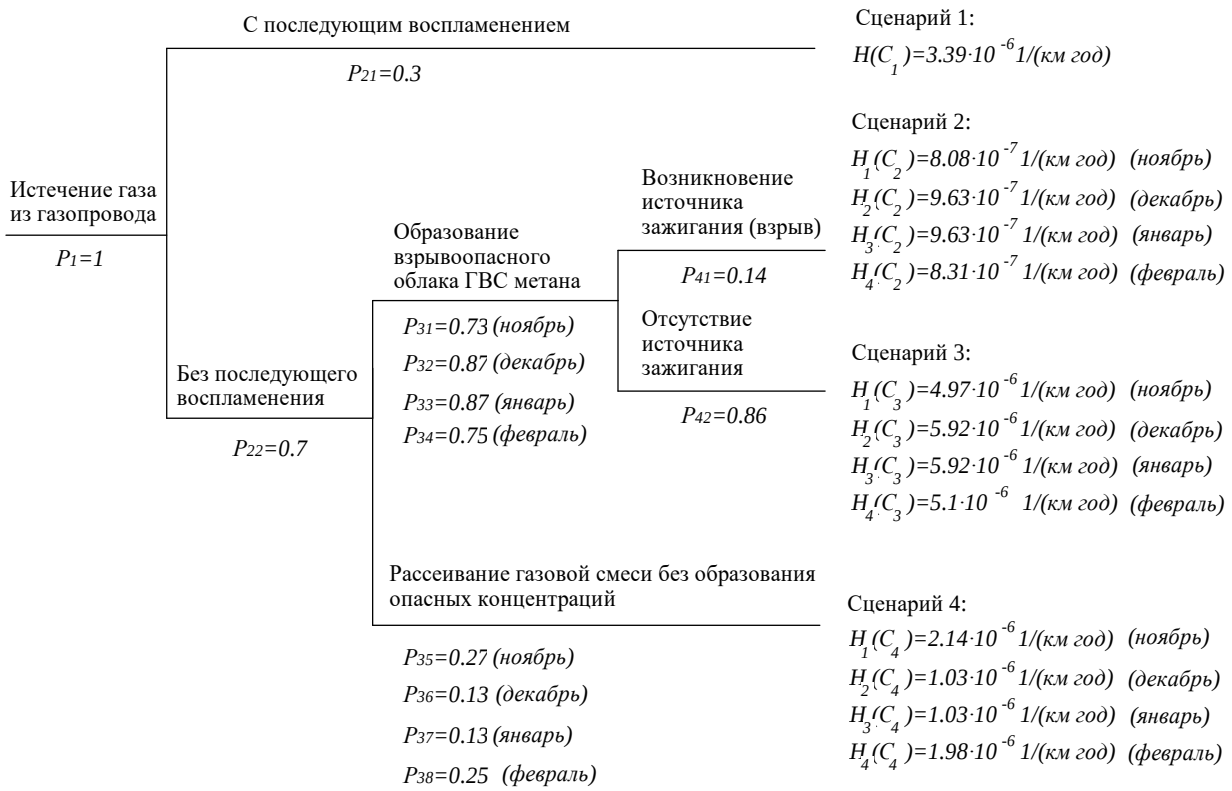


Рис. 2. «Дерево событий» истечения газа из надземного участка газопровода при низких температурах окружающей среды

Из рисунка 2 видно, что наиболее частыми сценариями являются сценарий 1 – истечение газа из газопровода с последующим воспламенением и сценарий 3 – истечение газа из газопровода с образованием облака ГВС метана без последующего воспламенения, их частоты составляют $3{,}39 \cdot 10^{-6}$ 1/(км·год) и $5{,}92 \cdot 10^{-6}$ 1/(км·год) соответственно.

Рассмотрим наиболее опасные сценарии – сценарий 1 и 2, поражающими факторами которых являются тепловое излучение и ударная волна.

Сценарий 1 в обобщенном виде кратко описывается следующим образом: разгерметизация трубопровода с утечкой природного газа в окружающую среду → мгновенное воспламенение истекающего газа с образованием струи пламени → воздействие теплового излучения на рецепиенты.

Сценарий 2 – разгерметизация трубопровода с утечкой природного газа в окружающую среду → образование облака ГВС метана → взрыв (при наличии источника зажигания) → воздействие ударной волны на рецепиенты.

Низкие температуры влияют на дальность безопасного расстояния при тепловом поражении, увеличивая коэффициент пропускания атмосферы, тем самым увеличивая интенсивность теплового излучения [2].

Температурные инверсии влияют на величину слабых ударных волн, увеличивая избыточное давление от 5 до 100 раз в зависимости от характкера инверсии, тем самым увеличивая дальность безопасных расстояний при взрыве [3].

Одной из наиболее часто употребляемых характеристик опасности является индивидуальный риск – вероятность (или частота) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности при реализации неблагоприятного случайного события. Этот вид риска рассматривается в качестве первичного и основного понятия, в связи с приоритетом человеческой жизни как высшей ценности и позволяет осуществлять установление приемлемого и неприемлемого уровней риска.

Оценку индивидуального риска $R_{\text{инд}}$ проводим по следующей формуле:

$$R_{\text{инд}} = R_{\text{пот}} \cdot P_{\text{пор}}$$

где $P_{\text{пор}}$ – вероятность поражения человека в районе возможного действия теплового излучения.

Величина вероятности поражения человека выражается функцией Гаусса через пробит-функцию:

$$P_{\text{пор}} = f[\text{Pr}(D)]$$

Пробит-функция описывается следующим выражением [4]:

$$\text{Pr} = -12{,}8 + 2{,}56 \cdot ln(D)$$

$$D = t \cdot q^{4/3}$$

$$t = t_0 + \frac{x_{\text{б}}}{u_{\text{ср}}}$$

где t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях (принимается равным 5 с);

$x_{\text{б}}$ – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 1,4 кВт/м^2), м;

$u_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения человека к безопасной зоне (принимается 5 м/с);

D – доза тепловой радиации, (кВт/м^2)$^{4/3}$·с.

Результаты оценки условной вероятности поражения человека в зависимости от расхода газа с учетом низких температур представлены в таблице 2.

Таблица 2. Вероятность поражения человека в зависимости от расхода газа с учетом низких температур

Диаметр газопровода 273				
G, кг/с	t, с	D, (кВт/м^2)$^{4/3}$·с	Pr	Поражение, %
40	12,7	273	1,56	0
80	20,6	444	2,81	0,2
120	28,6	615	3,64	0,9
Диаметр газопровода 1020				
300	64	1378	5,7	70,6
350	74	1593	6,08	80,6
400	84	1808	6,4	90,2

Оценку потенциального риска $R_{\text{пот}}$ проводим по следующим формулам:

– для сценария 1:

$$R_{\text{пот}}^{(1)} = \lambda_{\text{ист}} \cdot \text{P}_{21}$$

где

$\lambda_{\text{ист}}$ – частоты утечки газа из надземного участка газопровода, 1/(км·год);

P_{21} – вероятность истечения газа с мгновенным воспламенением;

– для сценария 2:

$$R_{пот}^{(2)} = \lambda_{ист} \cdot P_{22} \cdot P_{ому} \cdot P_{41}$$

где

P_{22} – вероятность истечения газа без последующего воспламенения;

$P_{ому}$ – вероятность появления опасных метеоусловий по месяцам;

P_{41} ($P_{заж}$) – вероятность появления источника зажигания.

Таким образом модель оценки потенциального риска $R_{пот}^{(2)}$ при сценарии 2 – взрыве облака (ГВС) метана в открытом пространстве примет следующий вид:

$$R_{пот} = \lambda_{ист} \cdot P_{22} \cdot P_{заж} \cdot \begin{cases} P_{ому} = 0{,}73 \text{ (ноябрь)} \\ P_{ому} = 0{,}87 \text{ (декабрь, январь)} \\ P_{ому} = 0{,}75 \text{ (февраль)} \end{cases}$$

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара и в зонах, где интенсивность теплового излучения превышает 10 кВт/м^2, принимаем равной 1.

Таким образом, индивидуальный риск $R_{инд}$ в зоне действия открытого пламени и в зонах, где интенсивность теплового излучения превышает 10 кВт/м^2 при реализации сценария 1, составит 3,39x10^{-6} 1/(км·год).

Индивидуальный риск при реализации сценария 1 в зонах, где интенсивность теплового излучения от 10 кВт/м^2 до 1,4 кВт/м^2 в зависимости от расхода газа представлена в таблице 3.

Таблица 3. Индивидуальный риск в зонах, где интенсивность теплового излучения от 10 кВт/м^2 до 1,4 кВт/м^2 в зависимости от расхода газа

Потенциальный риск 1/(км·год)	Индивидуальный риск, 1/(км·год)					
	Расход газа, кг/с					
	Диаметр газопровода 273			Диаметр газопровода 1020		
	40	80	120	300	350	400
$3{,}39 \cdot 10^{-6}$	0	$6{,}78 \cdot 10^{-9}$	$3{,}05 \cdot 10^{-8}$	$2{,}39 \cdot 10^{-6}$	$2{,}73 \cdot 10^{-6}$	$3{,}06 \cdot 10^{-6}$

Для оценки индивидуального риска при фугасном поражении человека возможно использование распределения Вейбулла [5]:

$$F(\Delta p) = 1 - exp\left[-\left(\frac{\Delta p - \Delta p_{пор}}{\eta}\right)^{\xi}\right]$$

где $F(\Delta p)$ – функция вероятностей летальных исходов в зависимости от величины избыточного давления ударной волны Δp; η, ξ, $\Delta p_{пор}$ – параметры закона распределения Вейбулла: η – параметры масштаба; ξ, – параметр формы; $\Delta p_{пор}$ – параметр положения (порог поражения индивиидума).

Результаты оценки индивидуального риска при фугасном воздействии ударной волны представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты оценки индивидуального риска при фугасном воздействии ударной волны с учетом аномальных метеоусловий Севера при аварии надземных участков газопровода

Месяцы	Потенциальный риск, 1/(км·год)	Индивидуальный риск, 1/(км·год)			
		$\Delta p = 40$ кПа			
		Легкое поражение	Среднее поражение	Тяжелое поражение	Смертельный исход
ноябрь	$8{,}08 \cdot 10^{-7}$	$7{,}68 \cdot 10^{-7}$	$3{,}21 \cdot 10^{-7}$	$1{,}29 \cdot 10^{-7}$	$4{,}69 \cdot 10^{-8}$
декабрь	$9{,}63 \cdot 10^{-7}$	$9{,}16 \cdot 10^{-7}$	$3{,}82 \cdot 10^{-7}$	$1{,}54 \cdot 10^{-7}$	$5{,}59 \cdot 10^{-8}$
январь	$9{,}63 \cdot 10^{-7}$	$9{,}16 \cdot 10^{-7}$	$3{,}82 \cdot 10^{-7}$	$1{,}54 \cdot 10^{-7}$	$5{,}59 \cdot 10^{-8}$
февраль	$8{,}31 \cdot 10^{-7}$	$7{,}9 \cdot 10^{-7}$	$3{,}3 \cdot 10^{-7}$	$1{,}33 \cdot 10^{-7}$	$4{,}82 \cdot 10^{-8}$

Таким образом, представлен методический подход к оценке индивидуального и потенциального риска аварий надземных участков газопроводов при низких температурах с учетом температурных инверсий.

Список литературы

1. Сонькин, Л. Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе // Труды ГГО. 1971. Вып. 254. С.121–131
2. Захарова М.И. Влияние низких температур окружающей среды на коэффициент пропускания атмосферы при оценках безопасных расстояний для человека от теплового воздействия пожара разлития нефтепродуктов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017, №3. С.90-100
3. Цейтлин Я.И., Смолий Н.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 1981. 192 с.
4. Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 3.11.2022 г.
5. Козлитин А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы. Саратов: СГТУ, 2002. 180 с.

УДК 004.9:332
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-526-529

ОЦЕНКА УЯЗВИМОСТИ СЕЛА ОКТЕМЦЫ ПРИ НАВОДНЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Прохоров В.А., Данилова Е.Н.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»
E-mail: prohorov_va@mail.ru

Аннотация. *Наводнения относятся к числу наиболее опасных природных явлений, вызванных комплексом сложных климатических факторов, угрожающих экономике, здоровью и жизни людей и наносящих ущерб инфраструктуре и экологической устойчивости. Это обусловило то, что развитие и совершенствование методов прогноза наводнений, картографического моделирования, расчета ущерба, создание карт риска наводнений являются актуальными направлениями в области снижения уровней опасности природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. В работе обсуждается проблема оценки уязвимости населенного пункта при наводнении через определение зон затопления с использованием ГИС технологий. Данные последствий наводнения села получены из разных источников, в том числе СМИ.*

Ключевые слова: *затор, наводнение, село, уязвимость, карта, ГИС-технологии*

ASSESSMENT OF THE VULNERABILITY OF THE VILLAGE OF OKTEMTSY TO FLOODS USING GIS TECHNOLOGIES

Prohorov V.A., Danilova E.N.
Federal state autonomous educational institution of higher education «M. K. Ammosov North-Eastern Federal University»

Abstract. *Floods are among the most dangerous natural phenomena caused by a complex combination of climatic factors, threatening the economy, human health, and lives, and damaging infrastructure and environmental sustainability. This has made the development and improvement of flood forecasting methods, cartographic modeling, damage calculations, and the creation of flood risk maps crucial areas for mitigating the risk of natural and man-made emergencies. This paper discusses the problem of assessing the vulnerability of a community to flooding by identifying flood zones using GIS technologies. Data on the impact of rural flooding was obtained from various sources, including the media.*

Keyword: *congestion, flood, village, vulnerability, map, GIS technology*

Село Октемцы, находящееся в пойме реки Лена, является уязвимым при наводнениях в период весеннего половодья. Имевшие место в последние годы наводнения привели к значительным материальным и социальным ущербам. В связи с этим и со строительством моста через реку Лена в районе Табаги, возможным повышением опасности затопления близлежащих сел актуальным становится оценка уязвимости и защищенности села Октемцы при весенних наводнениях.

В последние десятилетия в Якутии произошли катастрофические наводнения. Вскрытие рек сопровождается многочисленными заторами льда и наводнениями. Крупные наводнения имеют место на реке Лена, где подъём воды создается ледовыми массами [1, 2, 3, 4]. Основными факторами заторообразования на реке являются прочность и жесткость льда, и наличия препятствия в свободном движении льдин. В 2010 году в результате наводнения в зону бедствия попали 44 населенных пункта, пострадали 10 622 человек, 141 объект социальной сферы. В 2018 году в результате наводнения на реке Лена было подтоплено 35 населённых пунктов в 11 муниципальных районах (улусах). В зоне подтопления оказался 1191 дом, в которых проживают 3745 человек. Примеры наводнений 2001, 2010 и 2018 годов демонстрируют разрушительные последствия этих явлений, включая подтопление населённых пунктов, разрушение инфраструктуры и значительный экономический ущерб.

Село Октемцы неоднократно подвергалось разрушительным наводнениям (2001, 2010, 2018 гг.), которые наносили значительный ущерб инфраструктуре и сельскому хозяйству. Наводнению села способствует образование затора в районе села Табага. Важным фактором образования затора является наличие изгиба, относительное уменьшение ширины реки у Табагинского мыса и наличие островов в

этом районе. На рисунке 1 показаны отметки уровня воды при весеннем половодии за последние 15 лет. Критический уровень воды (уровень воды в створе ближайшего гидрологического поста), с превышением которого начинается затопление данного населенного пункта для села равен 480 см.

Рис. 1. Максимальные отметки уровня воды по годам

Наводнение 2010 года – одно из наиболее разрушительных наводнений. Вода нанесла ущерб инфраструктуре села, в том числе автомобильным дорогам и системам электроснабжения. При возмещении ущерба населению приняты три категории подтоплений: дворовых участков, до оконного проема и до потолка (рис. 2). Таким образом, анализ показывает, что наводнение, в зависимости от их масштабов и общего объема причиняемого ущерба, можно отнести к категории 3 – к высоким наводнениям, происходящим один раз в 25–50 лет.

Рис. 2. Фото наводнения села, 2010 год [6]

Картографический анализ зон подтопления с применением ГИС-технологий является ключевым методом исследования территорий, подверженных затоплению [5]. Этот подход позволяет не только выявлять уже существующие проблемные участки, но и прогнозировать потенциальные зоны затопления на основе комплексного анализа пространственных данных.

В качестве исходных данных была заимствована цифровая карта села Октемцы у Акционерного общества «САХАГИПРОЗЕМ» в формате SXF программного обеспечения ГИС Панорама, созданная на основе топографической съемки села (рис. 3). Для исследования и моделирования зон затопления использовали QGIS 3.22.3 (Quantum GIS), так как данное приложение QGIS предоставляет необходимые инструменты для обработки геоданных, построения карт рисков и визуализации результатов. В соответствии с этим файлы были экспортированы из формата SXF в формат SHP, который поддерживает ПО QGIS. Используя границы населённого пункта, применяя инструменты анализа векторной геометрии, созданы полигоны для расчета площади территории с. Октемцы, в которую входит восточная

часть села, находящаяся на коренном берегу реки Лена и западная часть территории, находящаяся на холмах (рис. 3).

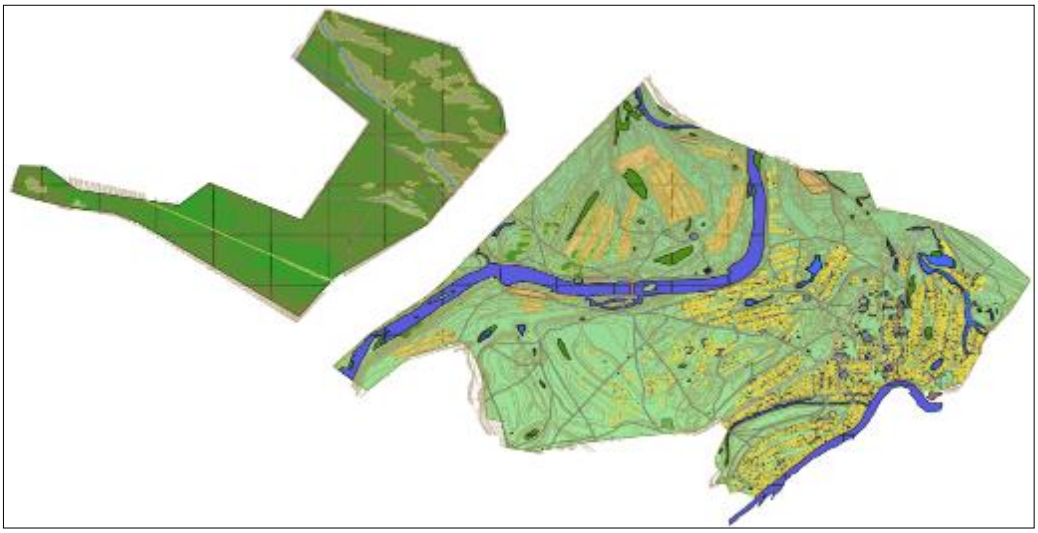


Рис. 3. Цифровая карта территории села Октемцы

В геоинформационной системе QGIS построили модель карты наводнений 2010 года (рис. 4) села Октемцы. При наводнении вода поднялась до отметки 615 см, что соответствует 97,38 м Б.С. Используя векторные методы выборки точек определили отметки рельефа, лежащие ниже уровня наводнения 97, 38 по Б.С. Вокруг выбранных точек создали буферную зону шириной 20 м. Используя вычисляемые поля и встроенные функции QGIS, определили площадь буферной зоны затопления – 1,24 квадратных километров. Подсчетом по цифровой карте определили количество подтопленных жилых строений – 271. На рисунке 4 красным выделены затопленные участки села Октемцы:

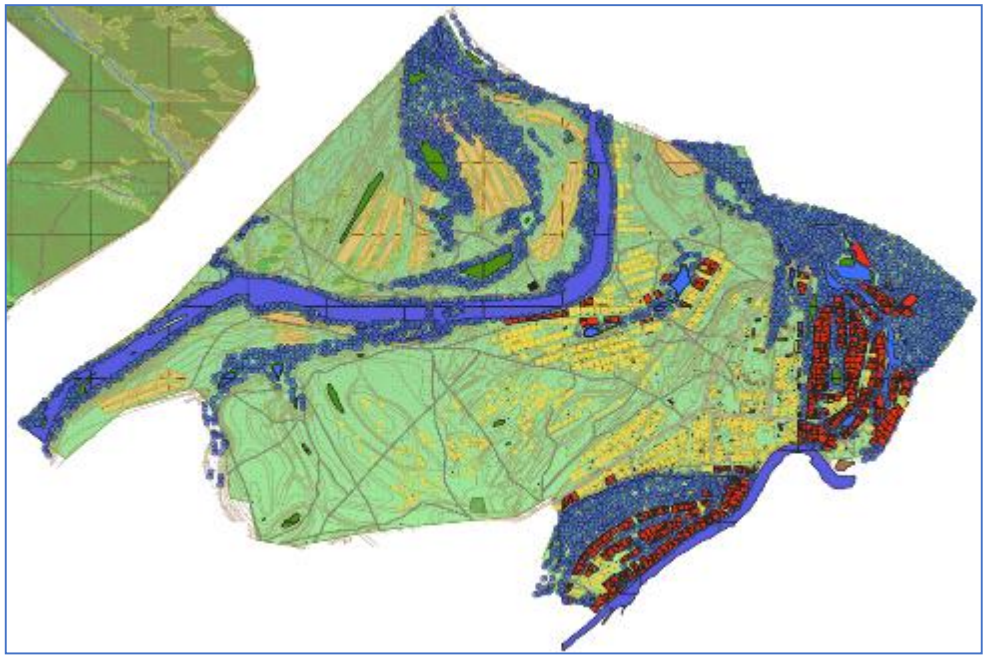


Рис. 4. Карта наводнений 2010 года

Весной 2018 года произошёл подъём уровня паводковых вод на территории села из-за ледовых заторов. Максимальный уровень воды составил 5 метров 51 сантиметров при критической отметке в 4 метра 80 сантиметров, что соответствует 96,68 м Б.С. Превышение составило 71 см. 2018 год оказался менее катастрофичным, но потребовал значительных ресурсов для ликвидации ущерба. Анализ последствий паводка на модели карты затоплений (рис. 5) показывает, что наводнение, в зависимости от его масштаба и общего объема причиняемого ущерба, можно отнести к категории 2 – как высокое

наводнение, наблюдающиеся один раз в 20–25 лет, сопровождающееся затоплением значительных участков речных долин, нанося материальный ущерб. Также с помощью выборки точек рельефа села выделили отметки ниже уровня 96,68 м, построили буферную зону шириной 20 м. Определили площадь затопления 0,75 квадратных км. Подтоплению подверглись 82 участка (рис. 5):

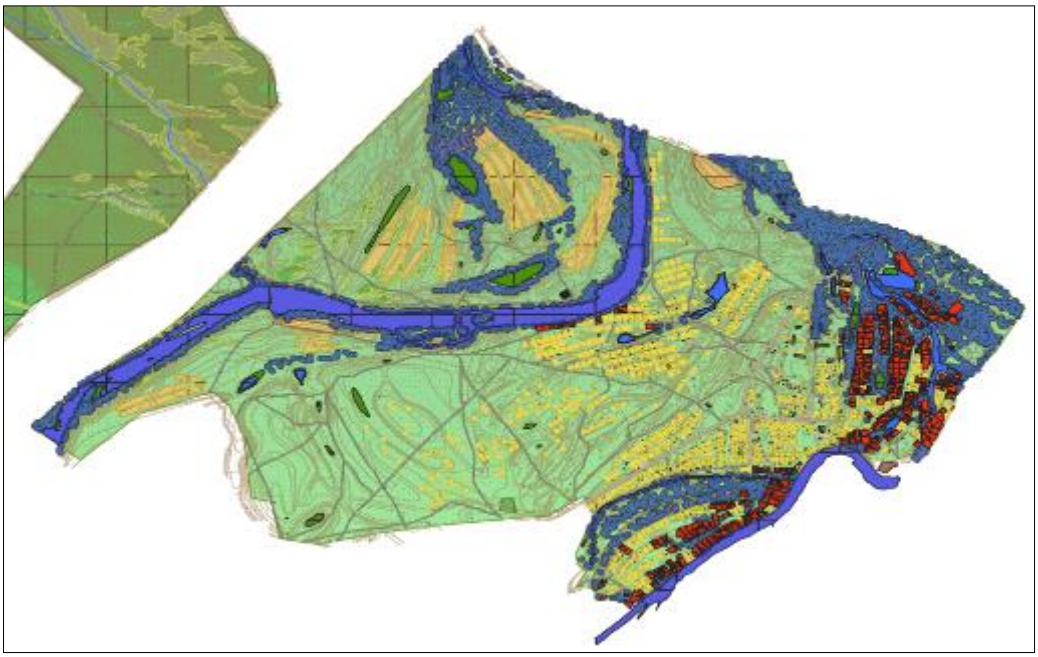


Рис. 5. Карта наводнений 2018 года

В таблице 1 приведены данные по последствиям наводнений 2010 и 2018 годов:

Таблица 1. Последствия наводнений с.Октемцы

Последствия	Ед.	Годы наводнений	
		2010	2018
Максимальные уровни воды	см	615	551
Подтопление жилых домов	шт	270	>82
Разрушенных домов	шт	30-35	5-7
Эвакуированные	чел	> 200	80
Площадь затопления	км^2	1.24	0.75
Затоплено территории	%	26%	14%
Размыто дорог	км	>5	3-5
Отключение электроэнергии	дни	3-5	-
Затопление сельхоз угодий	га	>100	50
Финансовая помощь на ликвидацию последствий	руб, млн	50	30

Уязвимость села перед наводнением оценили на цифровой карте села Октемцы через площадь затопленной части территории населенного пункта и количеством затопленных дворовых территорий. Проведённое исследование подтвердило высокую уязвимость села Октемцы к наводнениям и необходимость реализации комплексных мер защиты территории села от затоплений.

Список литературы

1. Кильмянинов В.В., Тазатинов В.М., Шепелев В.В. Заторы – ледовые монстры рек Якутии // Наука и техника в Якутии. 2001. № 1. С.36-40.
2. Изменение уровней воды и уклонов водной поверхности при заторных явлениях на р. Лене / А. П. Аммосов, Р. Н. Шпакова, К. И. Кусатов, З. Г. Корнилова // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2019. Т.28. С.3-20. DOI 10.26516/2073-3402.2019.28.3.
3. Бурцева Е. И., Парфенова О. Т. Экономический ущерб от наводнений на реках Республики Саха (Якутия) // Проблемы современной экономики. 2015. №1(53). С.256–259.
4. Ноговицын Д.Д., Кильмянинов В.В. К вопросу о прогнозировании заторных явлений на р. Лене. Наука и техника в Якутии № (12) 2007. 2007. С.19-24.
5. Т. А. Капитонова, Г. П. Стручкова, С. А. Тихонова, Л. Е. Тарская // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т.50. С.63–75. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.50.63

УДК 665.71
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-530-533

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО-МАГНИТНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Сивцев С.И., Александров А.Р., Ерофеевская Л.А.
ФГБУН ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Институт проблем нефти и газа СО РАН
E-mail: sivtsevsemen@mail.ru

Аннотация. *В данной работе исследованы возможности ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) для анализа нефтепродуктов на примере образцов сырой нефти Талаканского месторождения и битума отобранного на территории р. Буотама северного склона Алданской антеклизы. Проведен сравнительный анализ эффективности ^{1}H и ^{13}C ЯМР-спектроскопии. Установлено, что ^{13}C ЯМР обладает большей информативностью благодаря широкому диапазону химических сдвигов, что позволяет надежно идентифицировать основные структурные группы. Показана удовлетворительная корреляция количественных данных, полученных обоими методами. Результаты анализа выявили повышенную ароматичность битума (24,12% ароматических атомов углерода) по сравнению с нефтью (8,13%). Методом ^{13}C ЯМР оценена средняя длина алифатических цепей в образцах, что подтверждает его эффективность для структурно-группового анализа сложных углеводородных смесей.*

Ключевые слова*: нефть, битум, ядерно-магнитный резонанс, спектроскопия, ароматичность*

APPLICATION OF NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY FOR THE ANALYSIS OF PETROLEUM PRODUCTS

Sivtsev S.I., Aleksandrov A.R., Erofeevskaya L.A.
FSBIS FRC YSC SB RAS, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS

Abstract. *This study explores the application of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) spectroscopy for the analysis of petroleum products. The research focuses on a sample of Talakan crude oil and a bitumen sample, analyzed using 1H and 13C NMR spectroscopy. A comparative evaluation of the two methods revealed that 13C NMR provides superior information content due to its wider chemical shift range, enabling the identification of key structural groups. The results demonstrate a satisfactory correlation between 1H and 13C NMR data for aliphatic fragments. The bitumen sample showed a significantly higher aromatic carbon content (24.12%) compared to the crude oil (8.13%).*

Keyword*: oil, bitumen, nuclear magnetic resonance, spectroscopy, aromaticity*

Введение. Анализ нефтепродуктов занимает ключевое место в современной химической и энергетической промышленности. Нефтепродукты, являясь сложными многокомпонентными системами, требуют применения высокоточных и информативных методов для их исследования и характеристики. Одним из таких методов является ядерно-магнитный резонанс (ЯМР), который благодаря своей универсальности и неразрушающему характеру позволяет получить детальную информацию о структуре, составе и свойствах нефтяных компонентов. Таким образом, цель данной работы заключается в исследовании возможностей применения ЯМР-спектроскопии для анализа различных видов нефтепродуктов. Особое внимание уделяется разработке методологии определения состава и структурных характеристик исследуемых проб, а также сравнительному анализу эффективности ^{1}H и ^{13}C ЯМР спектроскопии для этих целей. Рассмотрены ключевые принципы, применяемые в ЯМР-спектроскопии, и представлены примеры успешного анализа углеводородных соединений, что позволяет убедиться в актуальности и практической значимости данного метода в области нефтехимии.

Материалы и методы. Были исследованы ядерно-магнитным резонансным методом (ЯМР) образец сырой нефти Талаканского месторождения и образец битума, полученный из образца доломитизированного известняка отобранного с территории р. Буотама. Изучение спектров ядерного магнитного резонанса проводилось с использованием спектрометра марки Bruker 400 (производство Германия, фирма Bruker, частота 400 МГц). В качестве растворителя применяли дейтерированный хлороформ, а в роли внутреннего стандарта использовали тетраметилсилан. Пробы растворяли в хлороформе до полного растворения органической составляющей, после чего нерастворившиеся остатки подвергались фильтрации. Для снятия спектра ^{1}H ЯМР было выполнено 48 накоплений, а для получения спектра

^{13}C ЯМР 6000 накоплений. В ^{1}H спектре сигнал растворителя наблюдается на 7,28 м.д., а сигнал стандарта – на 0 м.д. В ^{13}C спектре сигнал растворителя находиться на 77 м.д., а сигнал стандарта ТМС – на 0 м.д.

Результаты. Спектроскопия ^{1}H ЯМР, применяемая для исследования нефтяных фракций, характеризуется рядом ограничений. Основным из них является незначительная величина диапазона химических сдвигов (порядка 15 м.д.), характерная для большинства органических соединений. Это приводит к сильному перекрытию и уширению сигналов от молекул со сходным строением в составе многокомпонентных смесей [1]. Интерпретацию данных дополнительно затрудняет наличие спин-спинового взаимодействия между протонами, в связи с чем протонный ЯМР находит свое применение главным образом для решения определенных задач структурного анализа.

С другой стороны, спектроскопия ^{13}C ЯМР обладает существенно большей информативностью благодаря широкому диапазону химических сдвигов (до 200 м.д.) для ядер ^{13}C [2, 3]. Преимущества дополняются широкополосной развязкой между ядрами ^{1}H и ^{13}C, что облегчает интерпретацию спектров ^{13}C ЯМР. Этот метод может эффективно использоваться для анализа смесей, состоящих из молекул известных типов. Хотя сырая нефть включает огромное число индивидуальных компонентов, возможности ^{13}C ЯМР-спектроскопии позволяют классифицировать их по основным структурным группам даже в условиях, когда точная идентификация каждого вещества не представляется возможной.

В настоящее время исследованы и описаны как 1H, так и 13C спектры образцов нефтепродуктов [4, 5], характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химические сдвиги функциональных групп

Спектр	Химический сдвиг (ppm)	Функциональные группы
^{13}C ЯМР	9-21,39	γ-CH_3 – группы
	21,39-36,15	CH_2 – группы в нафтеновых (циклоалкановых) фрагментах и метиленовые группы (CH_2), не соседствующие с метиновой (CH) группой в алкильных соединениях
	36,15-60	Метиновая (CH) группа в алкильных фрагментах; CH и CH_2 алкильные группы нафтеновых фрагментов, соседние с группой CH
	108-118	Олефиновые фрагменты
	118-150	Углерод в аренах (ароматических соединениях)
^{1}H ЯМР	0,5-1,00	Протоны γ-CH_3 – групп
	1,00-2,1	Протоны β-CH_2, β-CH – групп в алкильных и нафтеновых фрагментах; протоны при алкильном β-CH_2-, β-CH- и далее положении к ароматическим углеродам
	2,1-2,4	CH_3 – в α-положении к ароматическим углеродам
	2,4-4,5	CH- и CH_2- группы в α-положении к ароматическим углеродам; мостиковая CH_2 – группа между ароматическими кольцами
	4,5-6,0	Протоны олефиновых групп
	6,0-7,2	Протоны одноцикловых аренов
	7,2-9,3	Протоны в полициклических ароматических соединениях

На спектрах ^{13}C ЯМР (рис. 1) регистрируется множество хорошо разрешенных сигналов. Их положение (химический сдвиг) позволяет отнести каждый пик к определенной структурной области, подтверждая наличие в образце ароматических структур, а также первичных (CH_3-), вторичных (-CH_2-) и других типов атомов углерода [6].

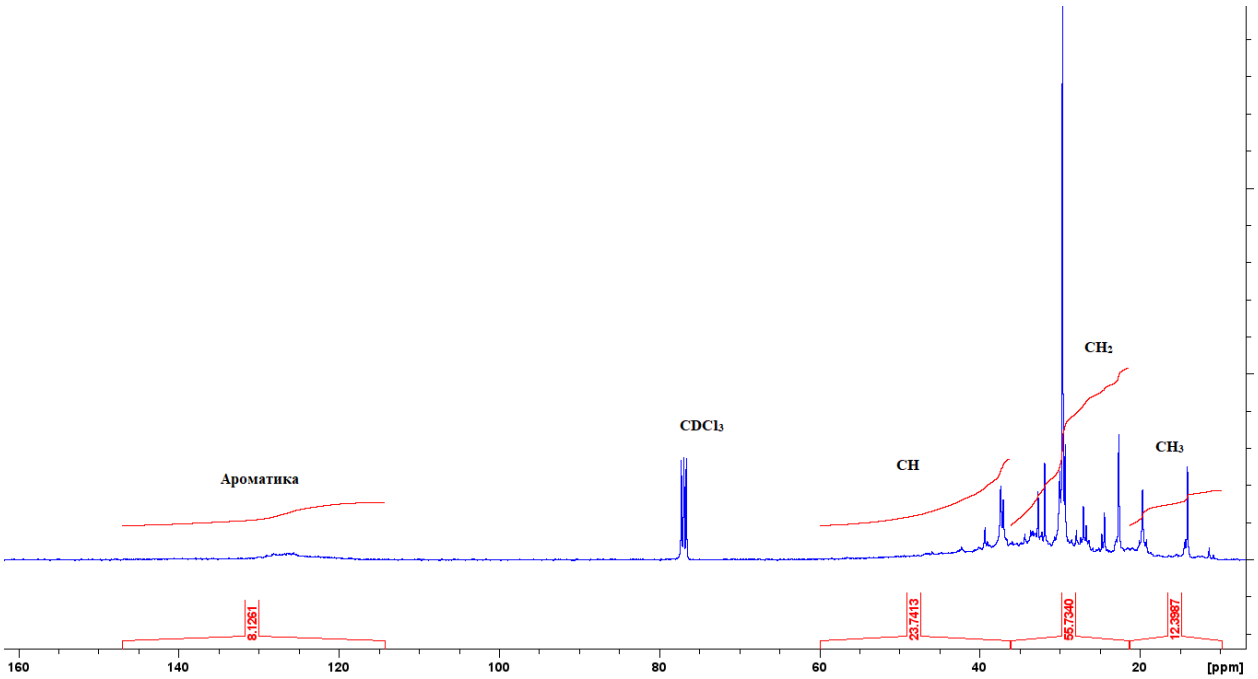


Рис. 1. ^{13}C ЯМР спектр нефти

Для количественной обработки спектров ^{1}H ЯМР (рис. 2) и пересчета интенсивностей сигналов в молярные доли функциональных групп проводили нормировку интегральных площадей на число эквивалентных протонов в каждой группе. В частности, значение интенсивности для метильных фрагментов делили на 3, а для метиленовых – на 2. Данная процедура позволяет представить интегральные интенсивности в спектрах протонного ЯМР непосредственно в виде долей, занимаемых каждой функциональной группой в общем составе (табл.2) [7].

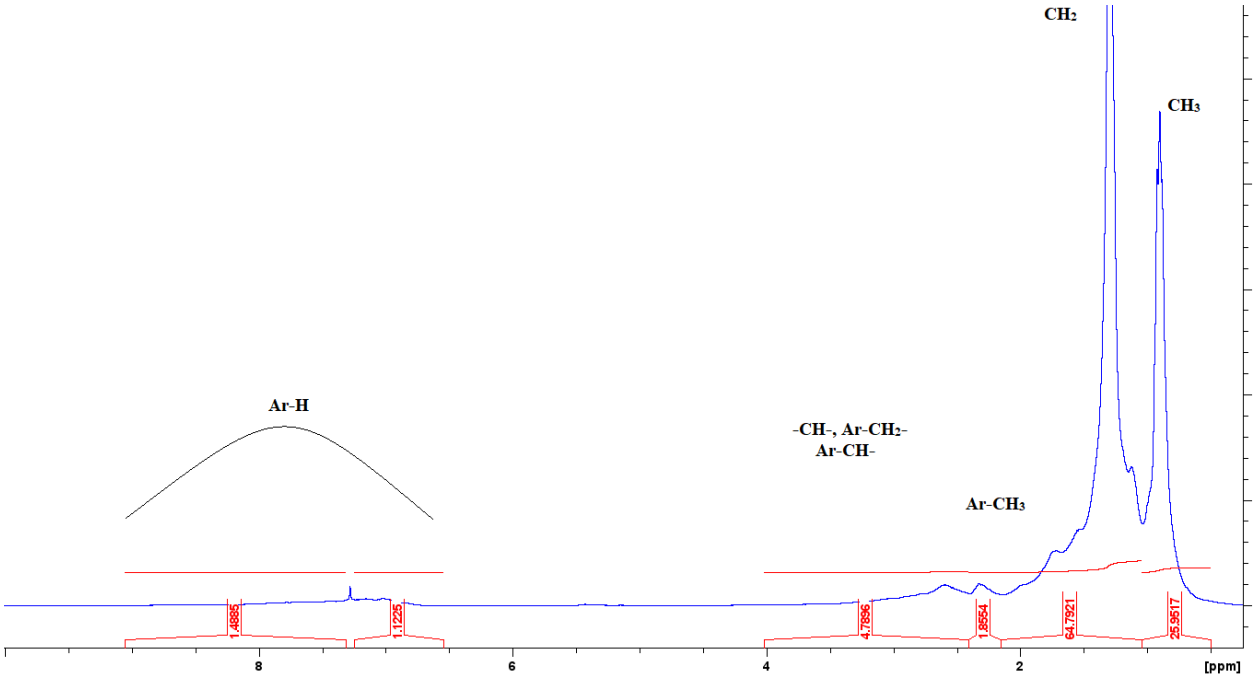


Рис. 2. ^{1}H ЯМР спектр нефти

Таблица 2. Молярное содержание (%) функциональных групп по данным ЯМР спектроскопии

Спектры	Химический сдвиг (ppm)	Доля в %	
		Битум	Нефть
^{13}C ЯМР	9-21.39	12,80	13,91
	21.39-36.15	45,58	54,29
	36.15-60	17,50	23,69
	114-147	24,12	8,11
^{1}H ЯМР	0.5-1.06	13,17	17,63
	1.06-2.16	54,3	66,03
	2.16-2.42	2,53	1,26
	2.42-4.2	13,86	9,76
	6.45-9.3	16,14	5,32

По данным таблицы 2, можно сделать вывод, что методы ^{1}H и ^{13}C ЯМР дают схожие результаты относительно содержания метильных групп в исследованных образцах. Из-за затруднений в дифференциации сигналов метиленовых и метиновых групп, их суммарное содержание учитывалось вместе. В протонных спектрах резонансные пики этих групп локализованы в области 1,06–4,2 м.д., тогда как в карбоновых спектрах соответствующие сигналы проявляются в интервале 21,39–60 м.д. Сравнительная оценка данных, приведенных в табл. 2, указывает на удовлетворительную корреляцию количественных результатов, рассчитанных по ^{1}H и ^{13}C ЯМР спектрам для указанных групп. Важно отметить, что в анализируемых образцах олефиновые соединения либо отсутствуют, либо присутствуют в следовых количествах, что подтверждается отсутствием характерных сигналов в ^{13}C ЯМР спектрах в области 108–118 м.д. и в ^{1}H ЯМР спектрах в диапазоне 4,5–6,0 м.д. Оставшаяся часть интегральных интенсивностей в спектрах ^{1}H и ^{13}C ЯМР соответствует ароматическим структурным фрагментам.

Заключение. Проведенный анализ показал, что исследуемый образец битума характеризуется повышенной ароматичностью. Мольная доля ароматических атомов углерода в его составе достигает 24,12%, что ожидаемо больше чем в образце сырой нефти, где этот показатель равен 8,13%.

Из полученных данных ^{13}C ЯМР спектров, можно сделать выводы о средней длине алифатических цепей. Если предположить, что все алифатические углеводороды неразветвленные, то среднюю длину цепи можно рассчитать по интенсивностям групп CH_3 (C1) и CH_2 (C2) как (C2/C1)*2+2. В нашем случае это дает значения 9,12 для битума и 9,8 для сырой нефти [8].

Исследования выполнены в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №1025041400001-6-2.5.1;1.5.1;1.4.4 с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Список литературы

1. V. Calemma, P. Iwanski, M. Nali, R. Scotti, L. Montanari, Structural characterization of asphaltenes of different origins // Energy Fuels, 1995, vol. 9, pp. 225-230
2. Breitmaier E., Woelter W. 13C NMR spectroscopy. Methods and application in organic chemistry. Weinheim; N. Y.: Verlag Chemie, 1978, 322 p.
3. Friebolin H. Basic One- and Two Dimensional NMR Spectroscopy. Weinheim; Basel; N. Y.: Wiley-VCH, 1991, 365 p.
4. Klochkov V.V., Efimov S.V. and Margulis B.Ya. Qualitative and quantitative composition of oil samples produced at various fields, according to NMR spectroscopy. Scientific notes of Kazan University. Series Natural Sciences. 2012;154(1):119-125.
5. Kalabin G.A., Kanitskaya L.V., Kushnarev D.F. Quantitative NMR spectroscopy of natural organic raw materials and products of their processing. M.: Chemistry, 2000, 408 p.
6. Guohui Gao, Jian Cao, Tianwu Xu, Hongan Zhang, Yunxian Zhang, Kai Hu, Nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil as proxies for oil source and thermal maturity based on 1H and 13C spectra // Fuel. 2020, vol. 271, 117622.
7. Полетаева О.Ю., Колчина Г. Ю., Леонтьев А. Ю., Бабаев Э. Р., Мовсумзаде Э. М. Исследование состава высоковязких тяжелых нефтей методом ядерной магнитно-резонансной спектроскопии // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2021, Т.64, №1, С.52-58.
8. I.Z. Rakhmatullin, S.V. Efimov, B.Ya. Margulis, V.V. Klochkov, Qualitative and quantitative analysis of oil samples extracted from some Bashkortostan and Tatarstan oilfields based on NMR spectroscopy data // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017, vol. 156, pp. 12-18.

УДК 504.054
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-534-538

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ И ВЛИЯНИЕ ИРЕЛЯХСКОГО ДРАЖНОГО ПОЛИГОНА НА ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЯКУТИИ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ КОСМОСНИМКОВ

Тихонова С.А., Стручкова Г.П, Капитонова Т.А.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН
E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Аннотация. *Современные технологии ДЗЗ дают возможность проводить анализ и оценку геоэкологического состояния водных объектов и окружающей среды в целом. Их применение, позволяет фиксировать состояние обширных территорий практически одномоментно, с одинаковыми условиями наблюдения всех участков мониторинга, дает возможность оперативно отслеживать и анализировать процессы изменения окружающей среды, обеспечивать регулярное наблюдение, особенно важно в условиях дефицита данных наземных наблюдений. Применение данного метода актуально для удаленных труднодоступных районов и в случае необходимости оперативных оценок загрязнения, а также для отслеживания прогноза течения процесса.*

Целью данного исследования является оценка загрязнения водных объектов на территории Республики Саха (Якутия) тяжелыми металлами используя спектральные характеристики данных ДЗЗ. Объектом исследования был выбран район рек Ирелях, Малая Ботуобия и Вилюй, воды которых подверглись масштабному загрязнению отходами алмазодобывающих предприятий вследствие разрушения дамб дражных полигонов. Также исследуется мутность воды в районе Иреляхского дражного полигона.

Ключевые слова: *ДДЗ, ГИС, взвешенные вещества, спутник Landsat и NDTI.*

ASSESSMENT OF HEAVY METAL POLLUTION AND THE IMPACT OF THE IRELYAKH DREDGE LANDFILL ON WATER BODIES IN YAKUTIA BASED ON SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SATELLITE IMAGES

S.A. Tikhonova, G.P. Struchkova, T.A. Kapitonova
V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Yakutsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *Modern remote sensing technologies enable the analysis and assessment of the geoecological state of water bodies and the environment as a whole. Their use allows for the simultaneous recording of the state of vast territories, with identical observation conditions for all monitoring sites. This enables the rapid monitoring and analysis of environmental change processes and ensures regular monitoring, which is especially important in conditions where ground-based observation data is scarce. This method is particularly relevant for remote, hard-to-reach areas and when rapid pollution assessments are needed, as well as for monitoring process forecasts.*

The objective of this study is to assess the heavy metal pollution of water bodies in the Republic of Sakha (Yakutia) using the spectral characteristics of remote sensing data. The study focused on the Irelyakh, Malaya Botuobiya, and Vilyuy rivers, whose waters were subject to extensive pollution by diamond mining waste following the destruction of dredging dams. Water turbidity in the area of the Irelyakh dredging site is also studied.

Keywords: *remote sensing, GIS, suspended solids, Landsat satellite, and NDTI.*

Объект исследования. 19 августа 2018 года в результате размыва нескольких дамб в Мирнинском районе в реку попала загрязнённая техническая вода. Загрязнение прошло по реке Ирелях, Оччугуй-Ботуобуя и Вилюй. Область исследования включала реку Вилюй начиная с Сунтарского до Кобяйского улуса. Река Вилюй – самый длинный крупный левый приток Лены. Длина реки Вилюй равна 2450 километрам, площадь бассейна – 454 тыс. кв. км. Питание водоема смешанное, с небольшим преобладанием снегового.

На рисунке 1 представлено расположение на карте исследуемых участков реки Вилюй, пересекающей последовательно территории указанных районов. Расстояние между тестовыми участками: 1 и 2 ~170 км, 2 и 3 ~ 120 км, 3 и 4 ~ 100 км, 4 и 5 ~160 км.

Рис. 1. Расположение исследуемых участков реки Вилюй, пересекающей территории районов 1) Сунтарский, 2) Нюрбинский 3) Верхневилюйский, 4) Вилюйский, 5) Кобяйский

По результатам лабораторных исследований после прорыва дамбы нормативы предельно допустимых концентраций были существенно превышены: взвешенных веществ в 728,6 раза, железа в 38,7 раза, меди в 27,6 раза [19]. Подсчитано, что ущерб составляет по реке Ирелях более 11 млн. 190 тыс. рублей, по реке Малая Ботуобия свыше 4 млрд. рублей. Ущерб реке Вилюй был рассчитан управлением Росприроднадзора по Республике Саха (Якутия) и составил около 23 млрд.рублей .

Дражные полигоны Ирелях. Добыча алмазов в крупных аллювиальных россыпях, таких как, например, Иреляхское месторождение Мирнинского ГОКа АК АЛРОСА, представляет собой водохранилище, построенной на участке реки Ирелях. Участки реки перегораживаются временными плотинами и заливаются водой, при этом происходит естественная оттайка мерзлых грунтов. Алмазоносные речные отложения поднимаются со дня реки, промываются и обогащаются с помощью драги, которая представляет собой плавучую обогатительную фабрику. Оставшаяся после извлечения алмазов пустая порода сбрасывается в воду, создавая отвалы. Период существования дражных полигонов Ирелях составляет более 65 лет.

Материалы и методы. В данной работе использовались методы предварительной цифровой обработки космических изображений: геометрическая, радиометрическая и атмосферная коррекция. После проведения обработки ДЗЗ, их можно использовать для создания качественной картографической продукции. Также использовались регрессионные зависимости, полученные методами многомерной линейной и нелинейной регрессии, между спектральными характеристиками отраженной поверхности, извлеченными из изображений спутника Landsat и концентрациями тяжелых металлов, измеренными лабораторным способом зарубежными авторами. (Ratnakar Swain, Bhabagrahi Sahoo Mapping of heavy metal pollution in river water at daily time-scale using spatio-temporal fusion of MODIS-aqua and Landsat satellite imageries. Journal of Environmental Management, vol. 192, 1 May 2017, pp. 1-14)

- Сначала мы вычисляем индекс мутности воды по формуле (1):

$$\mathrm{T_u} = \mathrm{NDTI} = \frac{\mathrm{RED-GREEN}}{\mathrm{RED+GREEN}} \quad (1)$$

где T_u – мутность, выражается в нефелометрических единицах мутности (NTU); L_3- это зеленый канал с длиной волны (543-578nm), L_4- красный канал с длиной волны (650-680nm), спектральные диапазоны спутниковых снимков Sentinel-2.

- Потом вычисляется TSS (общее количество взвешенных веществ) по формуле (2):

$$\mathrm{TSS}=\begin{cases} 2.73*(T_u)^{0.98}+4.63, T_u \le 50 \\ 4.37*(T_u)^{0.83}, 50 < T_u < 200 \\ 0.22*(T_u)^{1.12}+135.84, T_u \ge 200 \end{cases} \quad (2)$$

- Далее представлены формулы (3,4,5) соотношения между концентрацией тяжелого металла и TSS:

$$Fe=20.27*(TSS)^{1.008} \quad (3)$$
$$Zn=3.98*(TSS)^{0.43}+0.16 \quad (4)$$
$$Cu=1.084*(e^{0.013})^{(TSS)} \quad (5)$$

где концентрации *TSS* выражены в мг/л; а концентрации железа, цинка и меди указаны в мкг/л.

Для исследования загрязнения воды был применен метод спектрального анализа на программном комплексе ENVI, проведена радиометрическая и атмосферная коррекция, затем сделана классификация с обучением методом спектрального угла. Для каждого района было исследовано по 3-4 снимка и рассчитано среднее значение для каждого спектра.

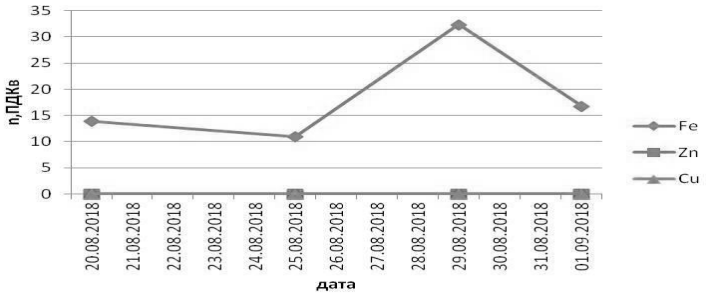
Результаты. В данной работе значения концентраций тяжелых металлов в воде, полученные с использованием ДДЗЗ сравниваются с данными, лабораторных измерений, выполненных лабораторией Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), которые приводятся в кратности превышения концентрации тяжелых металлов ПДК. Стандарты допустимых значений концентрации тяжелых металлов в водоемах хозяйственно-питьевого (ПДКв) и рыбохозяйственного назначения (ПДКр/х) приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Стандарты допустимых значений концентрации тяжелых металлов в водоемах хозяйственно-питьевого (ПДКв) и рыбохозяйственного назначения (ПДКр/х)

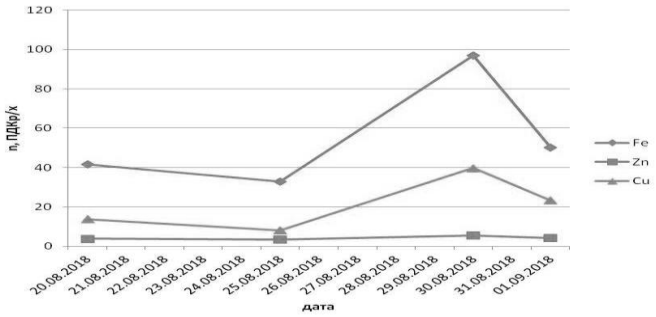
Вещество	ПДКв, мг/дм^3	ПДКр/х, мг/дм^3
Железо (Fe)	0,3	0,1
Медь (Cu)	1,0	0,001
Цинк (Zn)	1,0	0,01

В качестве примера на рисунке 2 представлены результаты исследования – Динамика изменения концентраций тяжелых металлов в воде, на участке реки Вилюй в районе с. Нюрба (в кратности превышения от ПДК), полученная с использованием снимков Sentinel-2

А) воды хозяйственно-питьевого назначения (ПДКв)



Б) рыбохозяйственного назначения (ПДКр/х.);



В) по данным лабораторных измерений и ПДКр/х

	22.08.2018	23.08.2018	24.08.2018	25.08.2018	27.08.2018у	27.08.2018в	28.08.2018у	28.08.2018в	29.08.2018у	29.08.2018в	30.08.2018у	30.08.2018в	31.08.2018у	31.08.2018в	01.09.2018у	01.09.2018в	02.09.2018у	02.09.2018в	03.09.2018у	03.09.2018в	04.09.2018у	04.09.2018в
железо	2,3	6	4,9	5,6	7,2	7,4	7,4	7,7	8,1	8,9	26,3	44,8	38,7	33,9	32,2	28,8	12,8	16,7	21,1	12,2	11,3	19
медь	0	2,8	3,5	2,5	3,3	3,8	0,0	0	0,0	0,0	1,6	4,6	9,2	7,8	2,13	1,99	0	0,9	0	0	1,3	1,5
цинк	1,2	1,1	2,9	3,8	3,8	2,8	4,9	5,3	3,4	2,2	1,5	3	3,9	0,2	0	0	0	0	3,6	0	0	1,7
марганец	1	0,85	1,1	1,3	1,7	1,2	1,0	1,5	1,1	0,85	13,9	16,6	21,3	10	7,3	9,7	2,5	10,4	1,200	1,2	1	1,4

Рис. 2. Динамика изменения концентраций тяжелых металлов в воде, на участке реки Вилюй в районе с. Нюрба (в кратности превышения от ПДК), полученная с использованием снимков Sentinel-2

Сравнение результатов лабораторного анализа отбора проб воды и дешифрирования спутниковой информации на исследуемых участках показывает при использовании ПДКр/х результаты наземного и спутникового исследования различаются почти в 2 раза по содержанию железа, меди и цинка. При использовании ПДКв. для спутниковых данных сравнение результатов показывает, что значения получаются более близкие к данным наземных лабораторий, но немного заниженные на совпадающие даты, рис. 2 (А,Б,В)**.** В целом максимальные значения совпадают по дате 30.08.2018 и качественно динамика изменения концентраций тяжелых металлов хорошо согласуются. Разница в результатах наземных и спутниковых исследований объясняется тем, что при дешифрировании спутниковой информации используется отражение солнечного излучения от водной поверхности, на которое влияет большое количество факторов, например, глубина водного объекта, наличие взвешенных веществ в воде и водной растительности, наличие или отсутствие ветрового волнения (которое вполне может наблюдаться на исследуемых реках в силу их достаточно большой ширины).

Чтобы проанализировать влияние дражных полигонов на водные объекты были рассмотрены временные ряды индекса мутности NDTI, рис. 3.

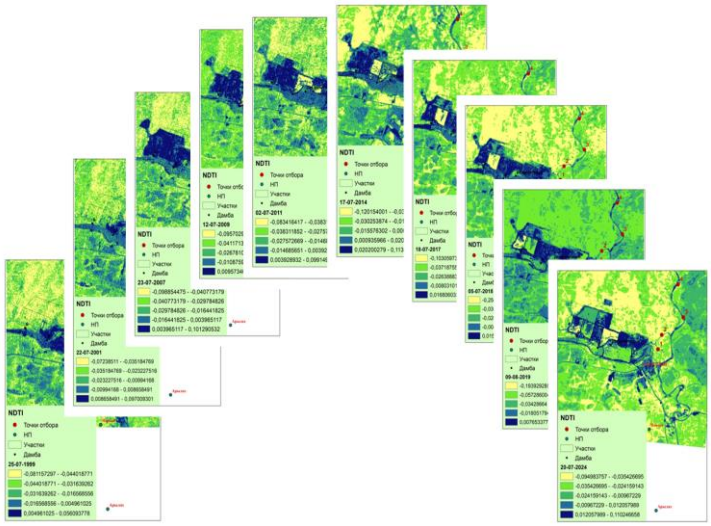


Рис. 3. Временные ряды индекса мутности NDTI за 1999 и 2024 годы

Максимальные значения индекса, соответствующие максимальному загрязнению водного объекта ожидаемо обнаруживаются в воде самого полигона и меняются от 0,056 в 1999 году до 0,26 в 2018 непосредственно перед аварией, которая произошла 19 августа 2018 года.

Заключение. Предлагаемый в данной статье метод полезен для оперативной оценки экологического ущерба водным ресурсам на удаленных и труднодоступных территориях.

В работе продолжены исследования возможностей использования данных дистанционного зондирования Земли для оценки загрязнения водных объектов при разливах хвостохранилищ, дамб дражных котлованов месторождений и дополнения базы наземных лабораторных фактических данных в труднодоступных регионах.

Временные ряды индекса NDTI позволяют хронологически оценить развитие, расширение ОГП и изменение состояния рек Ирелях и Ботуобия.

Предложенная методика оценки качества воды может быть полезна как при принятии решений при оперативной оценке воздействия загрязнения, ущерба от чрезвычайных ситуаций, отслеживания процесса загрязнения на труднодоступных территориях Севера и Арктики, выбора мест очистки воды, своевременного оповещения населения об ухудшении экологический ситуации, так и при постоянном мониторинге промышленных вод, для проведения превентивных мероприятий и обеспечения устойчивой системы водоснабжения.

Список литературы

1. Алексеев И. И., Тананаев Н. И., Короткий А. А. Гидрологическая система р. Ирелях и ее взаимодействие с промышленно-коммунальной инфраструктурой Мирнинского района, Республика Саха (Якутия) // Вестник МГТУ. 2025. Т.28. №1. С.103–118. DOI: https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-1-103-118)
2. Железняк М.Н., Шац М.М. Теплофизическая характеристика алмазного месторождения «Айхал» (Якутия) // Недропользование XXI век. 2022. 1 (93). С.98-103.
3. Киприянова Н.С., Томский М.И., Иванова Ф.Г., Каратаев П.Д. К изучению антропогенного и техногенного факторов риска заболеваемости населения злокачественными новообразованиями в условиях Крайнего Севера// Сборник материалов XXI Межрегиональной конференции онкологов с международным участием «Актуальные проблемы клинической онкологии и преканцерогенеза», посвященной 65-летию организации онкологической службы в Якутии. 2015.
4. Легостаева Я.Б., Гололобова А.Г., Попов В.Ф., Макаров В.С. Геохимические свойства и трансформация микроэлементного состава почв при разработке коренных месторождений алмазов в Якутии // Записки Горного института. 2023. Т.260. С.212-225. DOI: 10.31897/PMI.2023.35
5. Хованская М. А., Воробьёва М. Г. Влияние геологических работ на поверхностные воды и донные отложения Айхальского горнопромышленного комплекса (Якутия)//Вестник ВГУ. серия: Геология. 2019. №1. С.93-101.
6. Шепелёв В.В., Железняк М.Н., Павлова Н.А. О специфических мерзлотно-гидрогеологических условиях района трубки «Мир»//Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т.24, №3. С.80–87. doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-7
7. Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство. 2022. №4. С.100-106. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-100-106.
8. Ялтанец И.М., Пастихин Д.В., Гошин Е.Г. Особенности разработки хвостохранилищ в условиях Крайнего Севера//Гидротехническое строительство. 2017. № 10. С.15-18.
9. Kuangjia L., Yansheng G., Manzhou L., Lin Z., Junjie D., Zijian L., et al. Spatial analysis, source identification and risk assessment of heavy metals in a coal mining area in henan//Central China Int. Biodeterioration Biodegradation. 128 (2018), pp.148-154.
10. Ranjan A.K., Parida B.R., Dash J., Gorai A.K. Quantifying the impacts of opencast mining on vegetation dynamics over eastern India using the long-term Landsat-series satellite dataset//Ecological Informatics. 2022, vol. 71, 101812.
11. Werner T.T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing//The Extractive Industries and Society. 2019, vol. 6, no. 3. pp. 993-1012.

УДК 544.222.2
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-539-545

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА БЕЗБАЛЛАСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И СИБИРИ

Шабуневич В.И.
АО Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава,
АО «ВНИКТИ», Коломна
E-mail: Viktor-shab@yandex.ru

Аннотация. *Разработана методика исследования напряженно-деформированного состояния участков железнодорожного пути, основанная на применении кроме статического и модального, также и гармонического анализа метода конечных элементов. Показана возможность проведения сравнительного анализа изменений по частоте колебаний динамических параметров напряженно-деформированного состояния элементов участка безбалластного железнодорожного пути при разных температурах.*

Ключевые слова: *метод конечных элементов, гармонический анализ, модели участков железнодорожного пути, резонансные пики напряжений и деформаций.*

EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A SECTION OF BALLASTLESS RAILWAY TRACK IN THE CONDITIONS OF THE NORTH AND SIBERIA

V.I. Shabunevich
JSC Scientific Research and Design and Technology Institute of Rolling Stock,
JSC «VNIKTI», Kolomna

Abstract. *A methodology for studying the stress-strain state of track sections has been developed. This methodology utilizes both static and modal analysis, as well as harmonic analysis, using the finite element method. The feasibility of comparative analysis of changes in the dynamic parameters of the stress-strain state of track elements at different temperatures is demonstrated.*

Keywords: *finite element method, harmonic analysis, track section models, resonant stress and strain peaks.*

С повышением скоростей движения и ужесточением требований к качеству пути появились новые конструкции – путь без балласта с опиранием рельсов на сплошное монолитное основание. В настоящее время наибольшая протяженность, например, высокоскоростных линий эксплуатируется на безбаластном пути [1].

Известен метод исследования влияния жесткости промежуточных скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов. В основе проведенных расчетов накопления контактно-усталостных повреждений в рельсах лежат данные о вертикальной и горизонтальной поперечной жесткости промежуточных рельсовых скреплений, полученные по результатам стендовых испытаний. Для проведения указанных исследований применялись методы моделирования, реализованные на базе программного комплекса «Универсальный механизм» [2].

Известен также метод исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов (МКЭ), в котором разработаны трехмерные геометрические и конечно-элементные (КЭ) модели системы «колесо – рельс» и участка пути на балласте с толщиной под шпалой 45 см, промежуточными рельсовыми скреплениями ЖБР-65ПШР, шпалами Ш-3Д с прутковым армированием, рельсами типа Р65 с целью получения исходных данных для методики расчета жизненного цикла рельсов. При расчетах учитывались следующие параметры: тип подвижного состава (нагрузка на ось), план линии, скорость движения подвижного состава, наличие отступлений в профиле, поправочные коэффициенты по влиянию шлифовки рельсов и климатических условий, кратность тяги, рекуперативное торможение и горно-перевальные условия, введение весовых коэффициентов дефектов головки и подошвы. В результате были получены данные для оценки НДС рельсов при различных условиях эксплуатации до критических величин развития дефектов [3].

Известны исследования влияния подуклонки рельсов на контактные напряжения и давления в системе «колесо-рельс» при различном усилии воздействия колес подвижного состава, а также проведена оценка влияния упругости подрельсового основания на деформации и напряжения в пятне контакта без учета изменения силовых параметров взаимодействия пути и подвижного состава при изменении общей жесткости пути. Для проведения исследований была разработана КЭ модель для расчета НДС системы «колесо-рельс» при различной степени уплотнения подрельсового основания и различной подуклонке рельсов. Были проведены расчеты эквивалентных напряжений и контактных давлений, возникающих при взаимодействии колеса и рельса при различных исходных данных: жесткости основания, подуклонки рельсов, положения колеса [4].

Известен также метод исследования НДС упругой клеммы рельсового скрепления W30, принятый за прототип, в котором разработана КЭ модель клеммы, включающая 450 тысяч элементов типа «тетраэдр» размером 1 мм и 90 тысяч узлов. Для проведения верификации разработанной модели и результатов статического расчета проведены лабораторные испытания натурной клеммы с определением напряжений кручения и изгиба методом тензометрирования. Датчики базой l = 5 мм для регистрации касательных напряжений от кручения наклеивались под углом 45º на диаметрально противоположных участках прутка на внешнем и внутреннем радиусах в зонах технологических перегибов упругой клеммы. Для регистрации изгибных напряжений датчики наклеивали в верхней части наружных поперечных участков упругой клеммы. Было выявлено, что средняя величина расхождений по 13 контрольным точкам составила 10,1%, что позволило сделать вывод о том, что разработанная КЭ модель упругой клеммы Skl 14 с достаточной для практического применения точностью может использоваться для определения ее напряженно-деформированного состояния, а уровни напряжений могут стать эталонами при разработке новых конструкций клемм [5].

Общим недостатком указанных выше известных методов являются проведение только статического и модального анализов с помощью МКЭ.

В предлагаемой методике основу составляет применение гармонического анализа исследуемых конструкций, кроме выполняемых также статического и модального анализов. Температурное воздействие окружающей среды на исследуемые объекты может быть учтено в МКЭ изначально в статическом анализе.

В начале исследования создается трехмерная КЭ модель участка безбалластного железнодорожного пути (рис. 1). Модель содержит 174273 Tetra и Hex трехмерных элементов и 353935 узлов КЭ сетки.

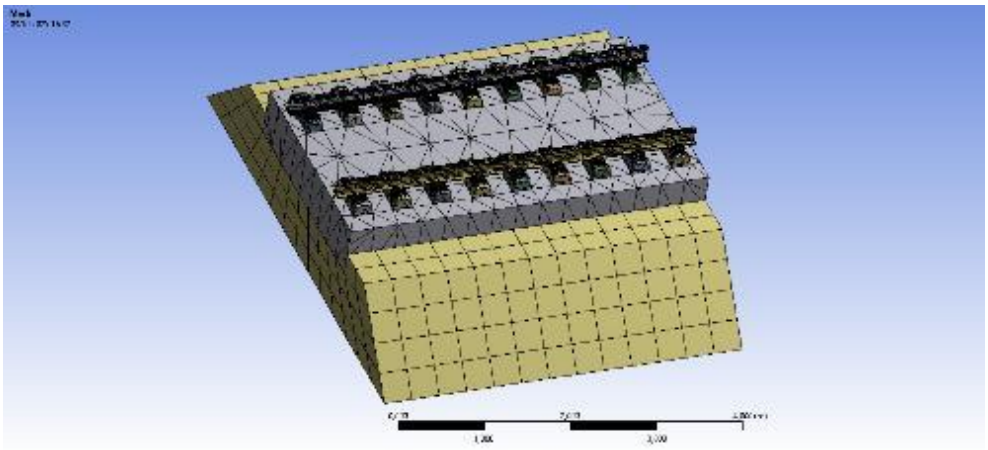


Рис. 1. Конечно-элементная модель участка безбалластного пути

Далее производят ее статический (рис. 2–4), модальный (рис. 5) и гармонический анализы (рис. 6–8).

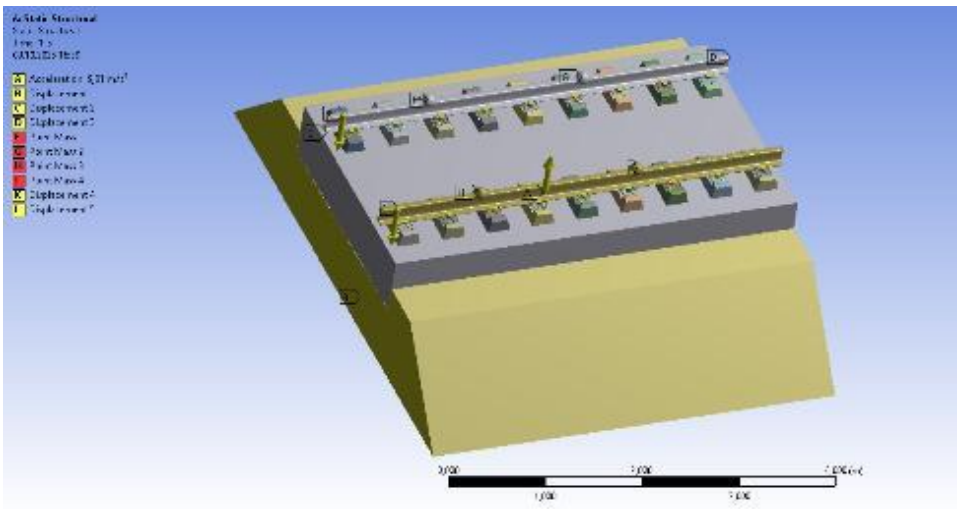


Рис. 2. Схема нагружения при статическом анализе модели участка пути

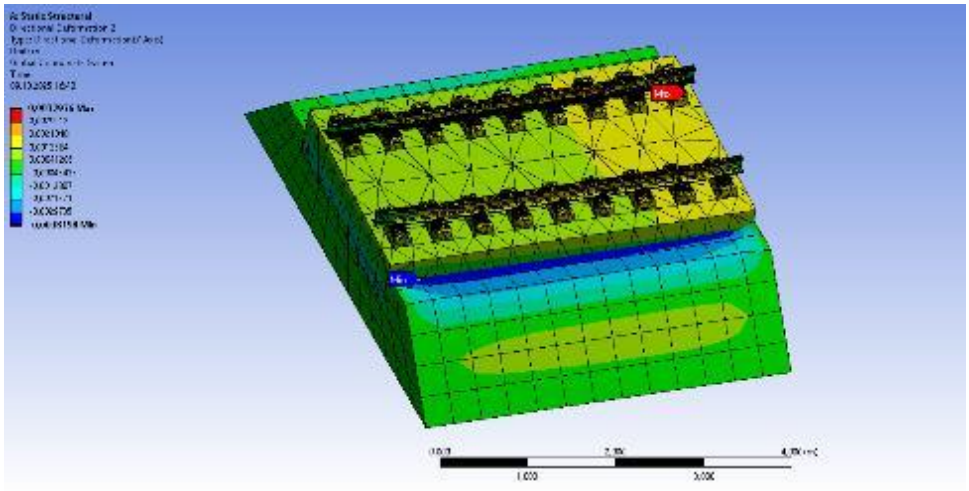


Рис. 3. Горизонтальная поперечная деформация модели участка пути при 22 °С

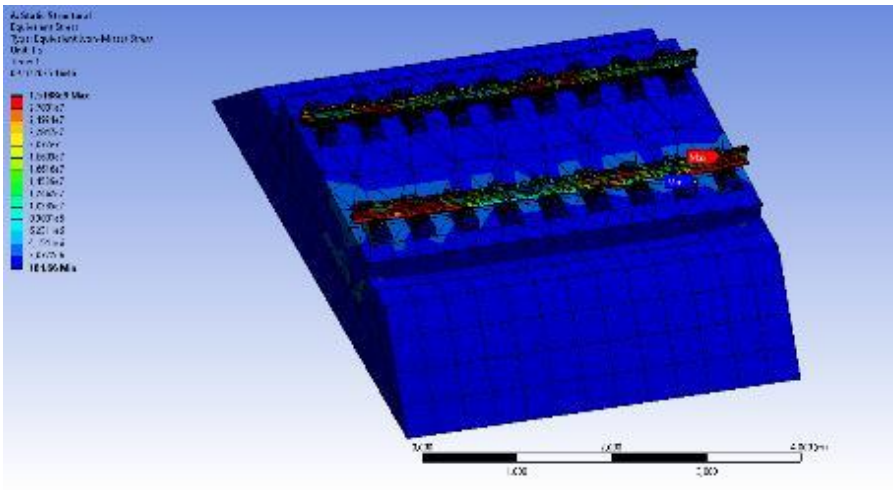
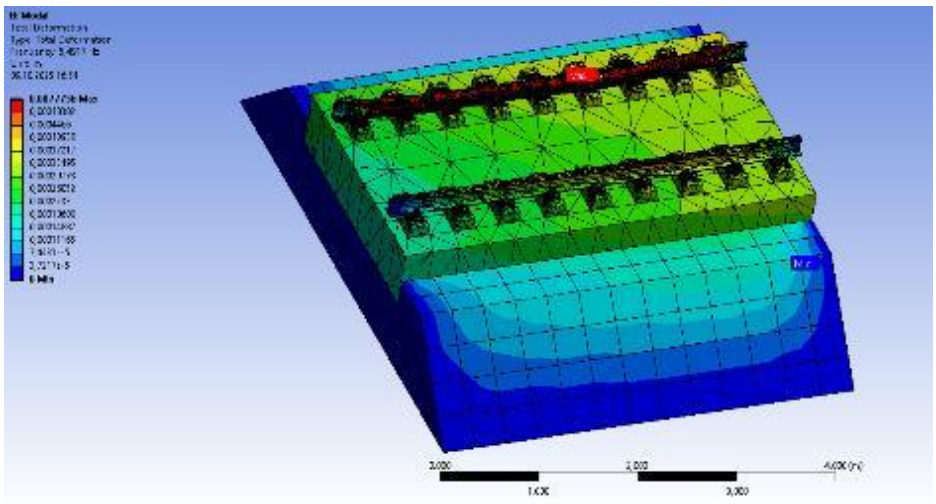
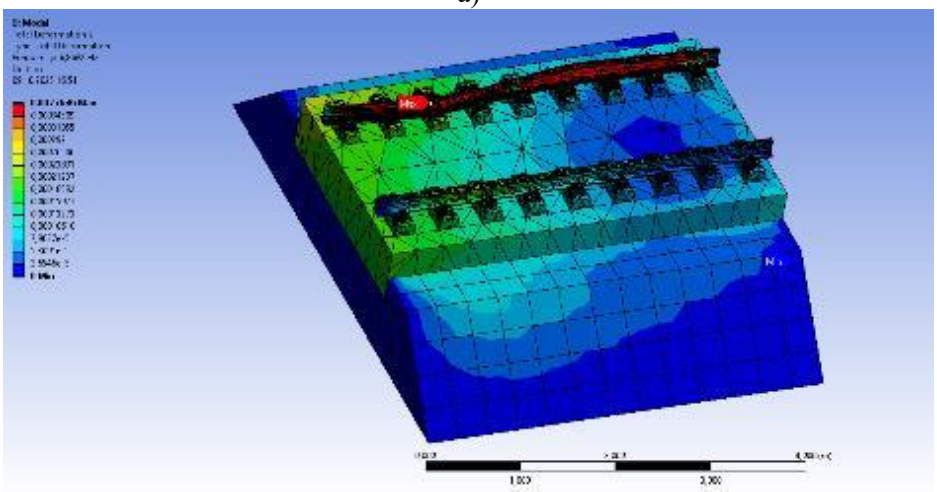


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в модели участка пути



а)



б)

Рис. 5. Первые моды собственных колебаний участка пути

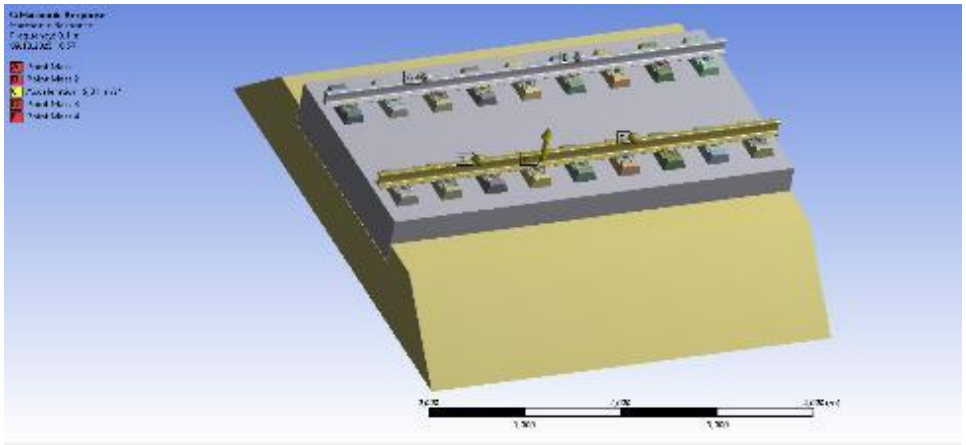
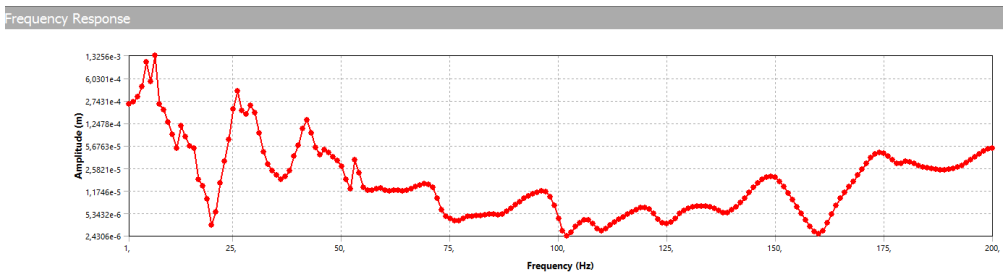
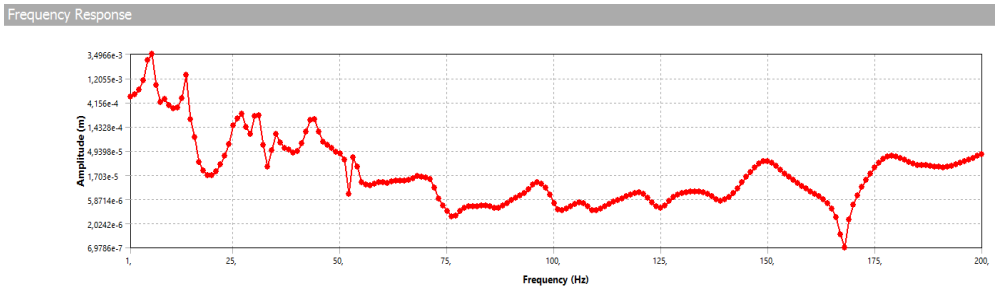


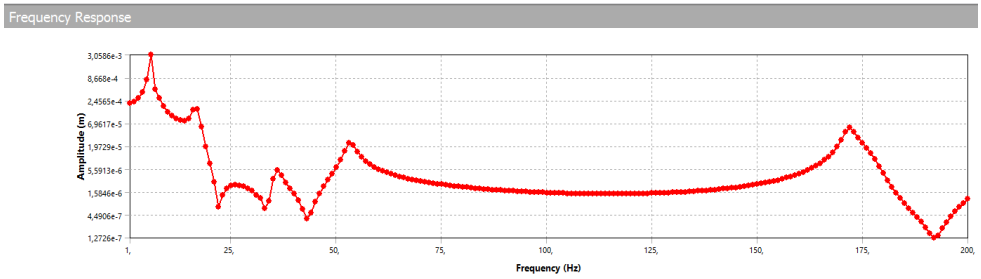
Рис. 6. Схема гармонического анализа участка пути



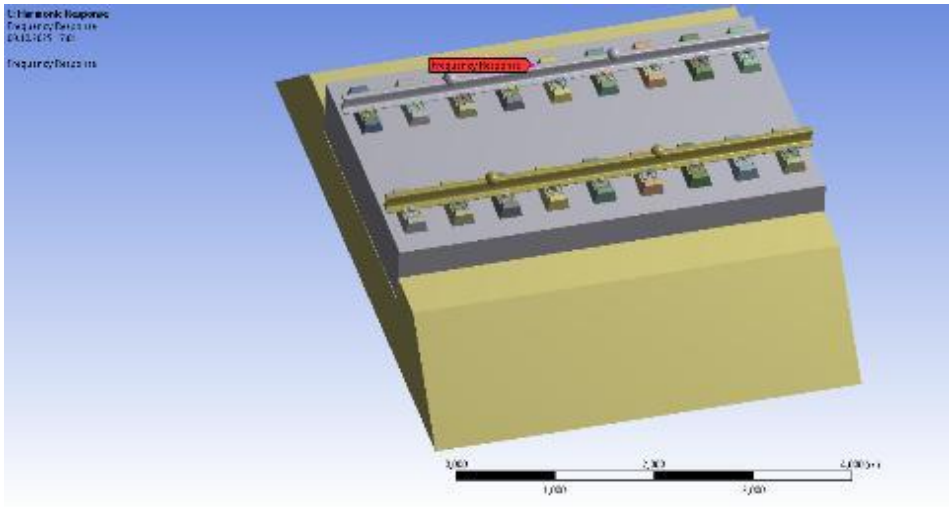
а)



б)

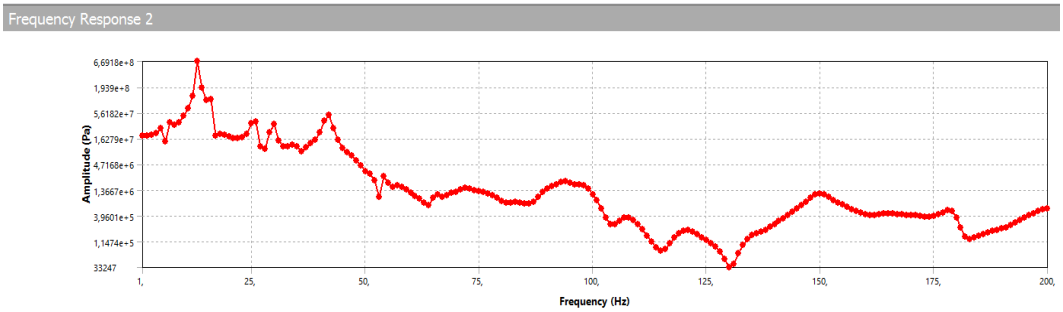


в)

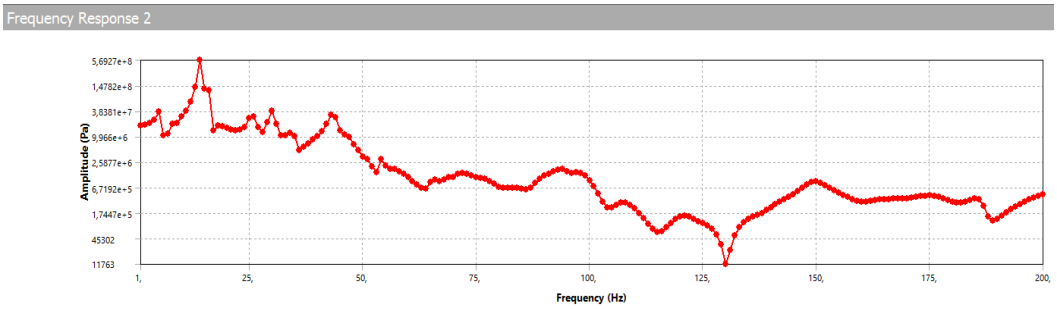


г)

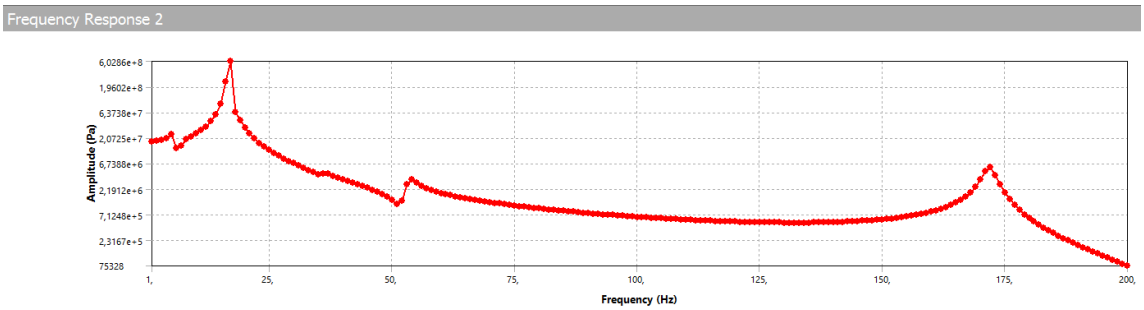
Рис. 7. График изменения поперечных перемещений по частоте при температуре 22 ºС (а), при температуре –38 ºС (б), при температуре –38 ºС с замерзшей насыпью (в) в узле головки рельса (г)



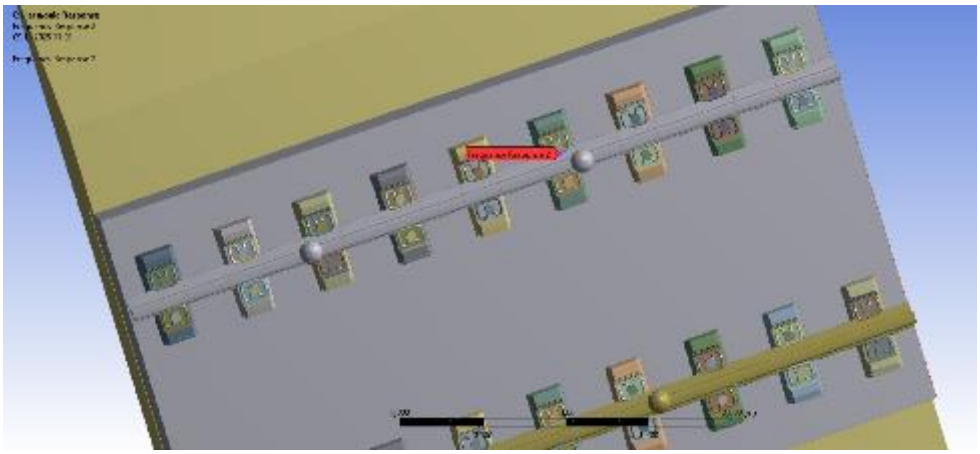
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. График изменения продольных напряжений по частоте при температуре 22 °С (а), при температуре –38 °С (б), при температуре –38 °С с замерзшей насыпью (в) в узле подошвы рельса (г)

Рассмотренная методика позволяет также анализировать изменение по частоте возможных колебаний параметров напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов участка безбалластного железнодорожного пути в зависимости от температурных условий.

Список литературы

1. Савин А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения// Железнодорожный транспорт на современном этапе. Сборник трудов ученых ВНИИЖТ, посв. 70 лет аспирантуре ВНИИЖТ. М: ВМГ-Принт. 2014. С.240-246.
2. Кузнецова Н.В., Сидорова Е.А. Особенности влияния промежуточных рельсовых скреплений на эксплуатационную стойкость рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2021. Т.80. №4. С.201 – 208.
3. Абдурашитов А.Ю. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов // Известия Транссиба. 2023. №1(53). С.62-73.
4. Галлямов Д.И., Овчинников Д.В. Влияние подуклонки рельсов на контактные напряжения и давления в системе «колесо-рельс» // Вестник ВНИИЖТ. 2023. Т.82. №1. С.9 – 17.
5. Коссов В.С. и др. Определение напряженно-деформированного состояния упругой клеммы рельсового скрепления W30 // Вестник ВНИИЖТ. 2025. Т.84. №1. С.51–59.

УДК 504.052
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-546-553

К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОСВОЕНИЯ НЕДР ЗЕМЛИ

Шабуневич В.И.
АО Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава,
АО «ВНИКТИ», Коломна
E-mail: Viktor-shab@yandex.ru

Аннотация. *Предлагается к рассмотрению методика решения проблем большой добычи полезных ископаемых путем создания четырех упрощенных масштабных (уменьшенных в 20 тысяч раз) конечно-элементных моделей Земли, содержащих ядро, мантию и относительно тонкую сплошную кору. Во второй модели в районе Северного полюса сделана сферическая выемка до середины глубины коры Земли. В третьей модели аналогичная выемка сделана в районе экватора. В четвертой модели сделаны две такие выемки в районе полюса и экватора. Выемки имитируют сделанную глобальную сырьевую добычу в указанных местах. И далее проводятся статический, модальный и гармонический расчетные анализы моделей и оценивается влияние глобальных сырьевых выемок на изменение прочностных статических и динамических характеристик рассматриваемых моделей.*

Ключевые слова: *метод конечных элементов, масштабные конечно-элементные модели Земли, гармонический анализ, резонансные пики напряжений и деформаций.*

ON THE QUESTION OF SOLVING THE PROBLEMS OF EARTH SUBSOIL DEVELOPMENT

V.I. Shabunevich
JSC Scientific Research and Design and Technology Institute of Rolling Stock,
JSC «VNIKTI», Kolomna

Abstract. *We propose a method for solving problems of large-scale mineral extraction by creating four simplified, scaled-down (20,000 times smaller) finite element models of the Earth, each containing a core, mantle, and a relatively thin, continuous crust. In the second model, a spherical excavation extending to the mid-depth of the Earth's crust is made near the North Pole. In the third model, a similar excavation is made near the equator. In the fourth model, two such excavations are made near the pole and the equator. These excavations simulate the global extraction of raw materials at these locations. Static, modal, and harmonic analyses of the models are then conducted, and the impact of global resource extraction on changes in the static and dynamic strength characteristics of the models under consideration is assessed.*

Keywords: *finite element method, large-scale finite element models of the Earth, harmonic analysis, resonant stress and strain peaks.*

Глобальное потепление стало одной из примет нашего времени. Его темпы сегодня беспрецедентно высоки: об этом свидетельствуют комплексные результаты всемирной системы наблюдений. Не удивительно, что в такой ситуации каждое из последних десятилетий было отчетливо теплее предыдущего. Виновником сложившегося положения международное научное сообщество называет человечество, хозяйственная деятельность которого способствует росту содержания в атмосфере парниковых газов (двуокиси углерода CO_2, метана CH_4, закиси азота N_2O и др.), а с ним и усилению парникового эффекта*. Это зафиксировано в ряде международных соглашений, в частности в Рамочной конвенции об изменении климата 1992 г. Масштабность явления уже тогда поставила перед правительствами ведущих экономических держав и рядом международных организаций второй из вечных русских вопросов: «Что делать?». Первой попыткой снизить темпы глобального потепления стало введение в действие в 2005 г. Киотского протокола, регламентировавшего выбросы парниковых газов в последующие десятилетия. Напомним, что по разным причинам в нем не участвовали крупнейшие эмитенты – США и Китай, а также Индия. На втором этапе действия протокола, начиная с 2013 г., пролонгировать участие в нем отказались Канада, Япония и Россия. В результате действие Киотского протокола по сути сошло на нет: на страны, сохранившие ему верность, приходилось лишь около 15% суммарной эмиссии парниковых газов. Оценкам плюсов и минусов этого документа и, в частности, его низкой эффективности посвящено много публикаций, в том числе и наших [1, 2].

В последней четверти XX и первом десятилетии XXI веков человечество столкнулось с качественно новыми глобальными и весьма острыми проблемами при освоении земных недр, обусловленными практически повсеместно увеличением глубины горных работ, динамическими и газодинамическими явлениями, техногенными землетрясениями (рудники объединения «Апатит», Соликамского РУ в России, «Верра» в Германии и др.), горными ударами (рудники Таштагола, Норильска, СУБРа), тектоническими нарушениями, катастрофическими прорывами воды в выработанное пространство рудников (3-го и 1-го Березняковского РУ «Уралкалий»), взрывами метана в угольных шахтах (Казахстан, Россия, Украина и др.), приводящими к частой гибели значительного числа шахтеров, крупным деформациям массивов горных пород, разрушению горных выработок, выбросам сотен кубических метров пород, сдвижению поверхности и образованию на ней воронок, разрушению зданий и сооружений, затоплению рудников, обезвоживанию земель и др. В XXI веке минерально-сырьевая база России будет характеризоваться дальнейшим значительным увеличением глубины горных работ (глубина залегания полезных ископаемых превысит 700–1500 м), ростом горного давления и температуры пород, усложнением природных условий вновь осваиваемых месторождений – снижением (более чем в 1,5–2 раза) содержания полезных компонентов, повышением содержания вредных примесей, увеличением (более чем в 3 раза) доли труднообогатимых (упорных) полезных ископаемых, ухудшением экологической обстановки, особенно горнодобывающих регионах с крупномасштабным освоением минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. При этом значительная часть отходов горно-обогатительного и металлургического производств прежнего периода также будет ценным сырьем для получения, как металлов, так и строительных материалов, удобрений, химической продукции и др. Истощение крупных приповерхностных месторождений с относительно хорошим качеством полезных ископаемых вызовет необходимость освоения крупных месторождений на больших глубинах, средних месторождений с бедным содержанием компонентов, вовлечения мелких месторождений с большим содержанием компонентов, в том числе на труднодоступных территориях, разработка которых в связи с уровнем развития техники и технологии была ранее экономически нецелесообразна [3, 4].

Основной глобальной проблемой практически каждого горнодобывающего предприятия является изменение ландшафта местности. Для того чтобы построить разрез, требуется очень большая территория, подходящая для выполнения работы на ней. Кроме вреда, наносимого огромной площади, на которую идет немалое воздействие техникой, оборудованием и т. д., происходит также вырубка лесов, в связи с чем страдает флора и фауна данной местности. В свою очередь возникает сложная ситуация с нарушением плодоносного горизонта. На местах, где происходит расположение горного предприятия, обычно окружающая среда загрязняется настолько, что про плодородные земли речь будет идти с очень малой вероятностью. Немаловажным фактором, оказывающим отрицательное влияние на экологию является изменение русла рек. При строительстве разрезов, как уже упоминалось раннее, сильно меняется ландшафт местности, за счет чего страдают небольшие водоемы. Еще немаловажной проблемой являются взрывы на открытых работах, от которых поднимается огромное количество пыли, выбрасываемой в воздух. Также посредством проведений взрывных работ на предприятиях происходит сдвиг пород, нарушается их устойчивость.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что негативные воздействия горных работ на природную среду особенно значительны при открытом способе добычи угля. По известным данным угольные шахты и разрезы Кузбасса добывают более 40 % угля в России. На разрезах перемещается в отвалы 300–350 млн. т. горных пород. Общая площадь нарушенных земель возрастает на 65,5 тыс. га. Площадь, подлежащая рекультивации – 4938,5 га, рекультивировано после реструктуризации угольной индустрии Кузбасса 157,4 га. В атмосферу выбрасываются от 1,5 до 2 млрд. $м^3$ метана, сбрасывается во внешние водоемы 34,4 % всех взвешенных веществ и 10 % нефтепродуктов. Снижение угледобычи в Кузбассе со 159 млн. тонн (1988 г.) до 102,7 млн. тонн (2000 г.) не решает экологических проблем угольной промышленности, они стали более актуальными в связи с ликвидацией бесприбыльных и нерентабельных шахт, разрезов и обогатительных фабрик [5].

Созданы упрощенные масштабные (уменьшенные в 20 тысяч раз) конечно-элементные (КЭ) модели Земли, содержащие ядро, мантию и относительно тонкую сплошную кору. Во второй модели в районе Северного полюса сделана сферическая выемка до середины глубины коры Земли. В третьей модели аналогичная выемка сделана в районе экватора. В четвертой модели сделаны две такие выемки в районе полюса и экватора. Выемки имитируют сделанную глобальную сырьевую добычу в указанных местах.

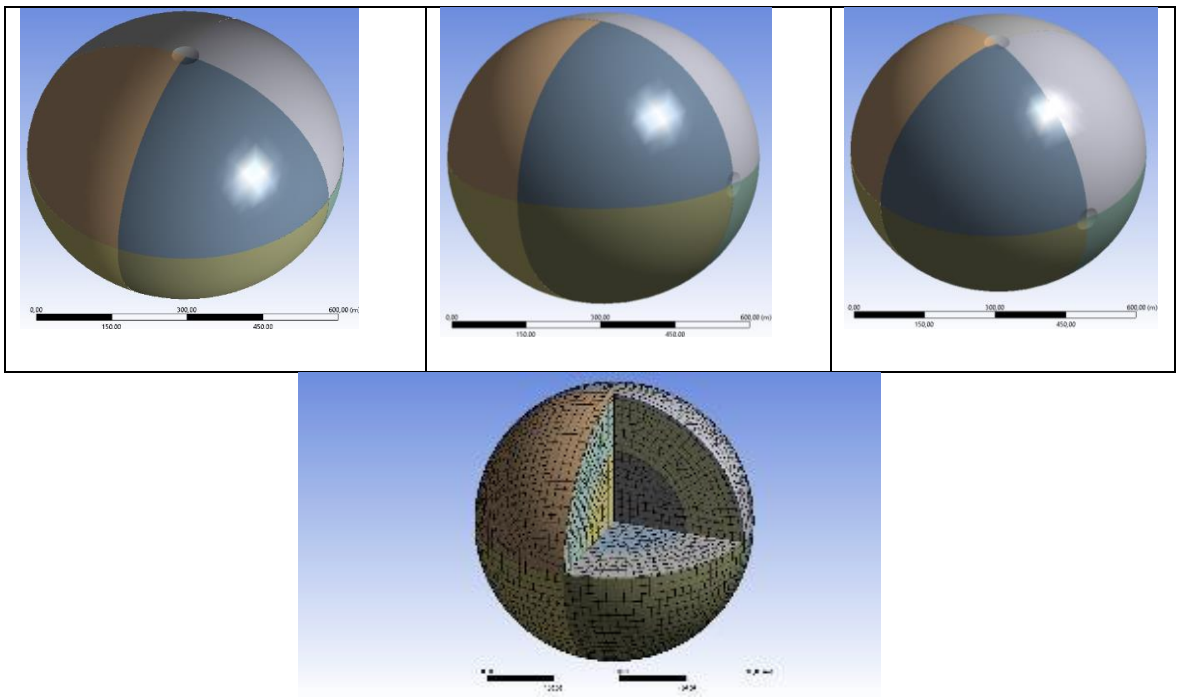


Рис. 1. Масштабные модели Земли (первая исходная КЭ модель без добычи показана с вырезом сегмента)

Проведены МКЭ расчеты по статическому анализу моделей (рис. 2–4), по их модальному анализу (рис. 5) и по гармоническому анализу (рис. 6–8).

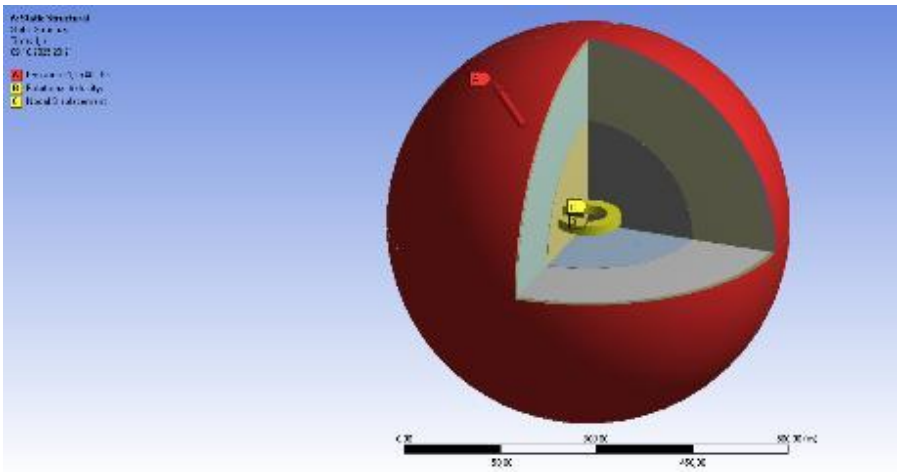


Рис. 2. Схема закрепления и нагружения КЭ моделей Земли при статическом анализе

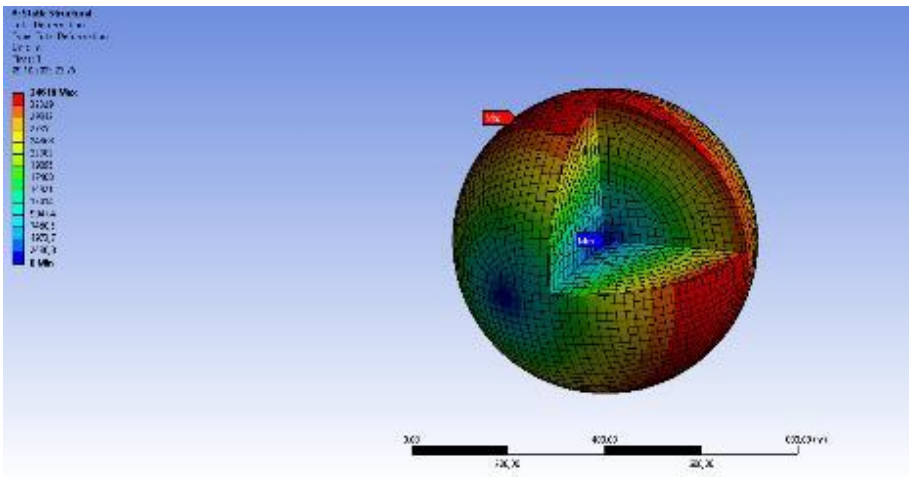


Рис. 3. Общая деформация исходной модели Земли при статическом анализе

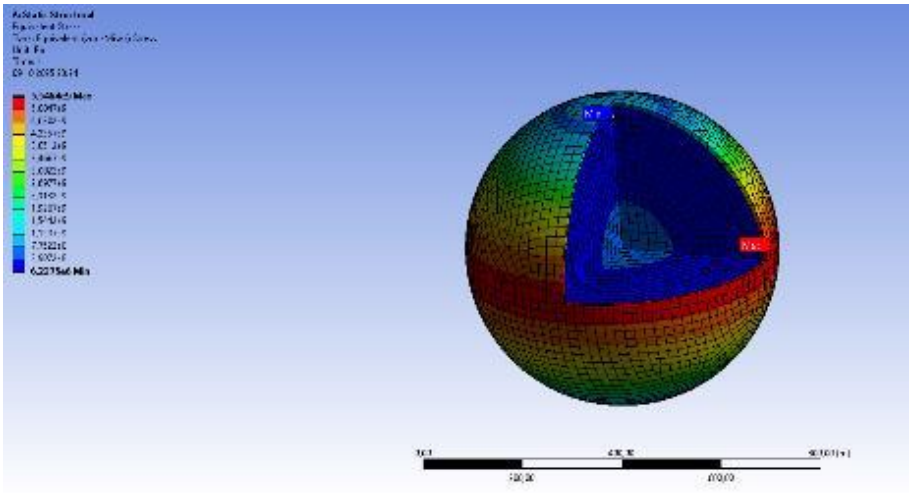
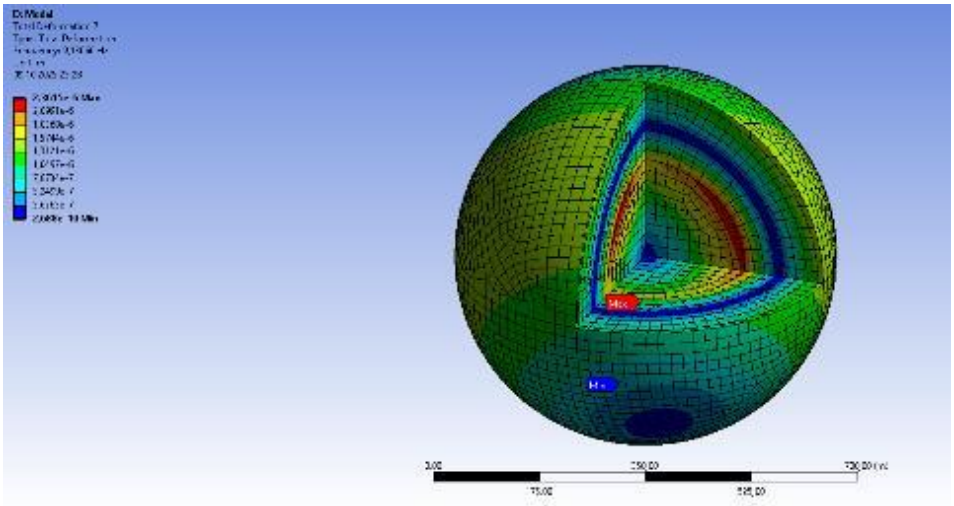
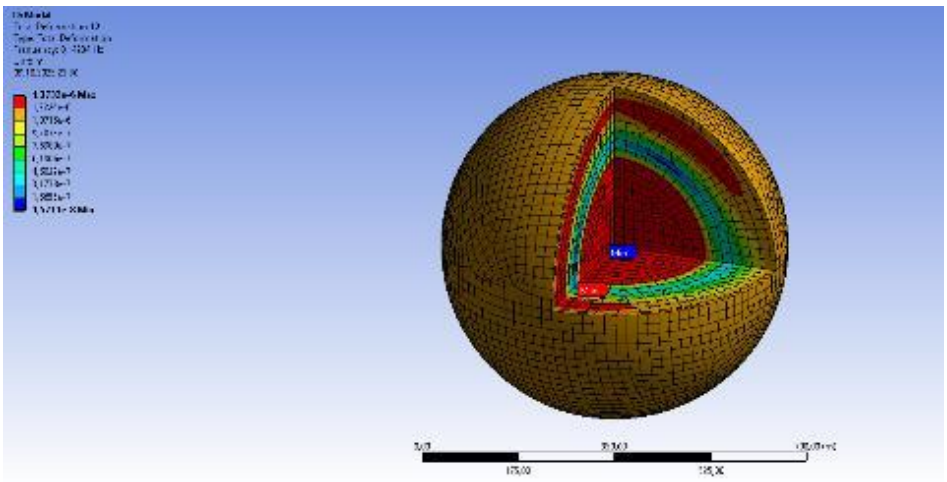


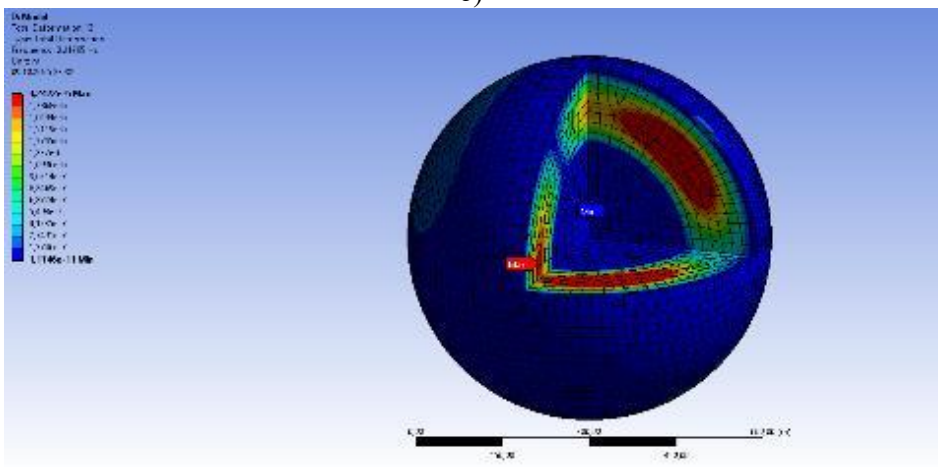
Рис. 4. Эквивалентные напряжения в исходной модели Земли при статическом анализе



а)



б)



в)

Рис. 5. Первые основные моды колебаний модели Земли на частоте 0.137 Гц (а), на частоте 0.142 Гц (б) и на частоте 0.213 Гц (в)

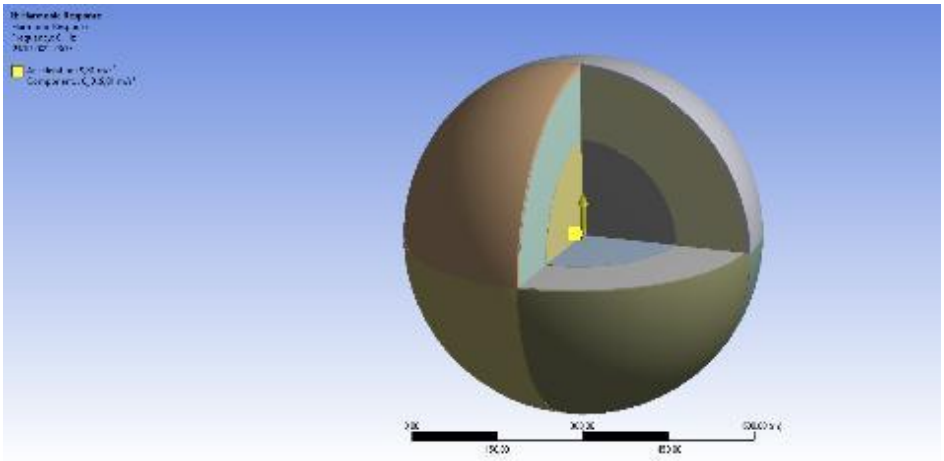
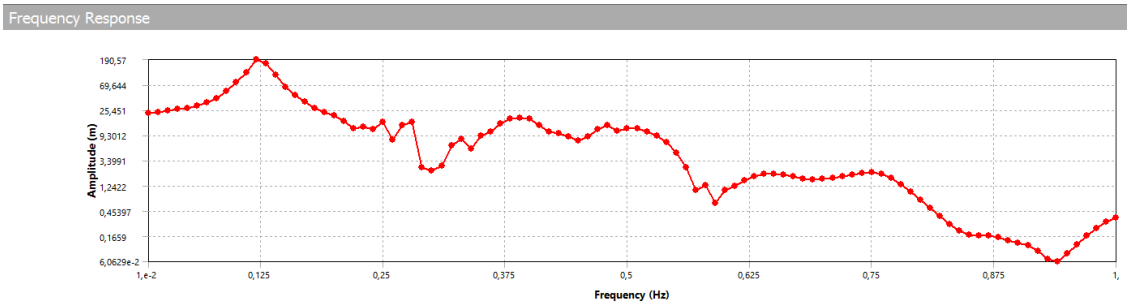
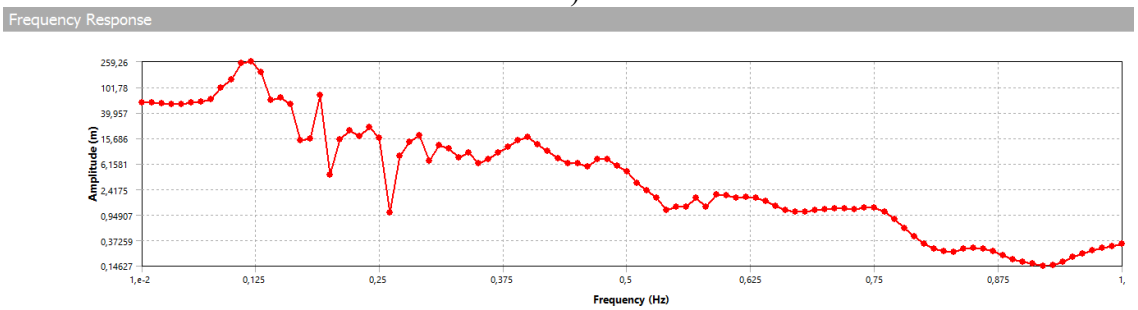


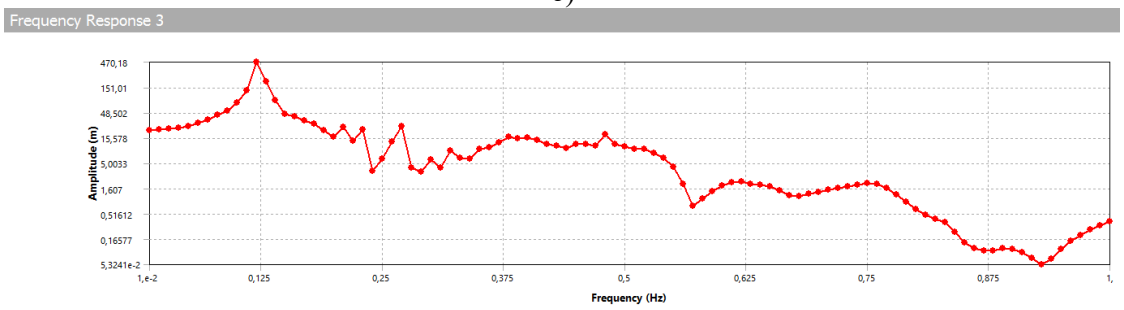
Рис. 6. Схема нагружения модели Земли при гармоническом анализе



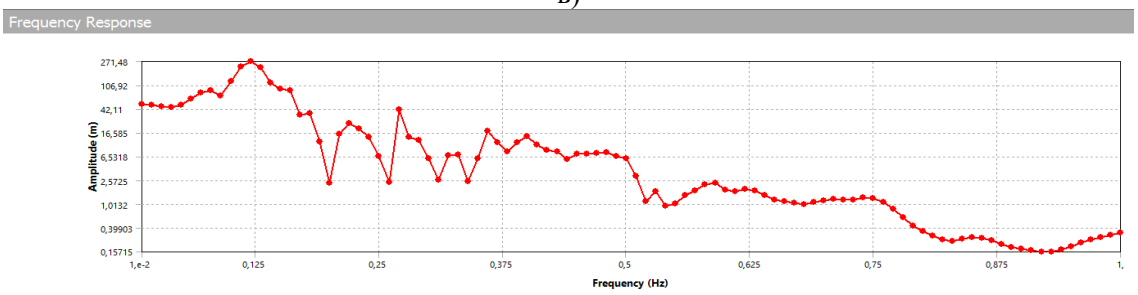
а)



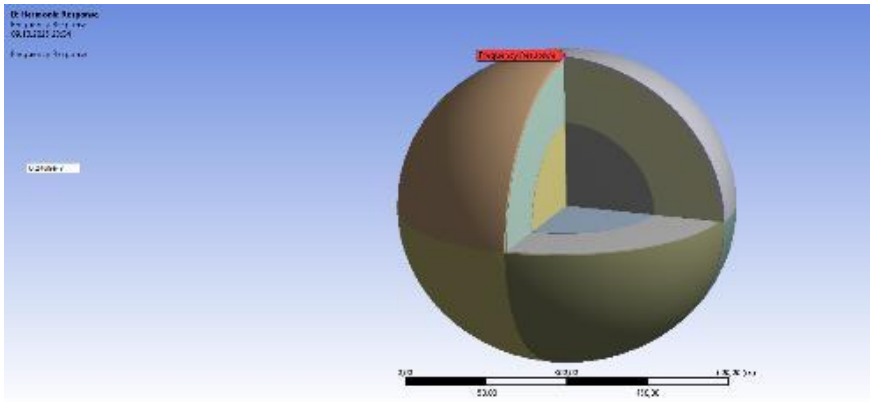
б)



в)

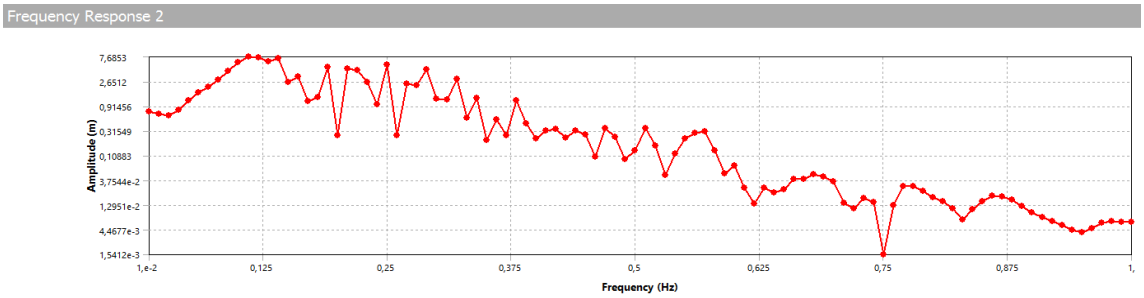


г)

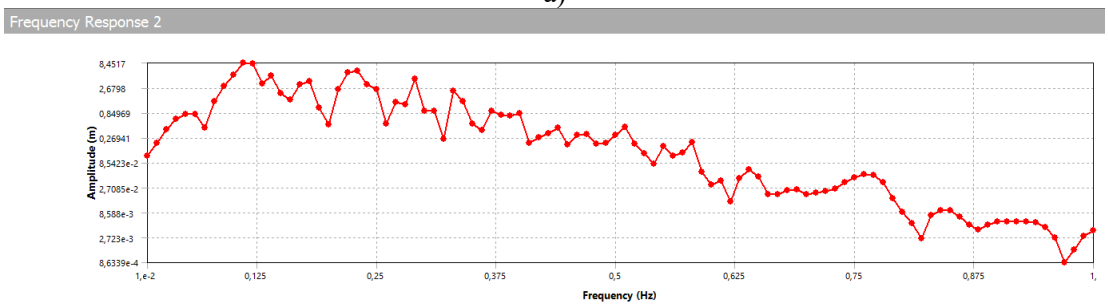


д)

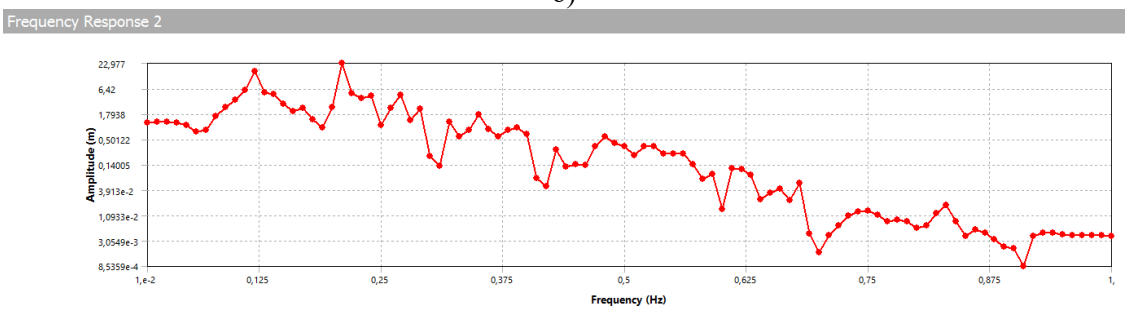
Рис. 7. Графики изменений по частоте вертикальных перемещений а) – без глобальной добычи, б) – при добыче на полюсе, в) – при добыче на экваторе, г) – при добыче на полюсе и экваторе в узле Северных полюсов моделей Земли (д)



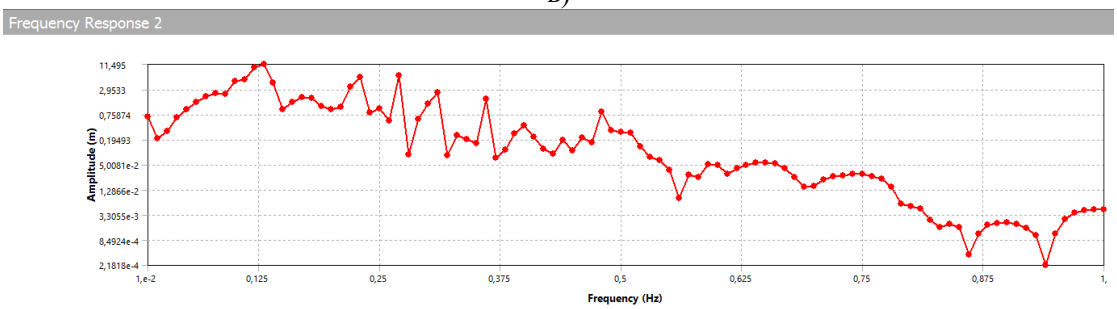
а)



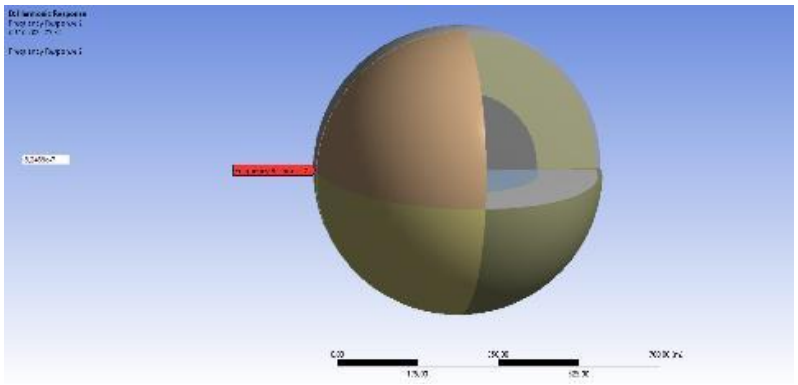
б)



в)



г)



д)

Рис. 8. Графики изменений по частоте горизонтальных перемещений а) – без глобальной добычи, б) – при добыче на полюсе, в) – при добыче на экваторе, г) – при добыче на полюсе и экваторе в узле экваторов моделей Земли (д)

Анализ результатов расчетов показал увеличение параметров напряженно-деформированного состояния при статическом и динамическом нагружении для исследуемых уменьшенных моделей Земли с большой добычей полезных ископаемых на полюсе и экваторе по сравнению с исходной моделью без такой добычи.

Список литературы

1. Бялко А.В. Парижское соглашение по климату: реальны ли цели? // Природа. 2016. №3. С.3–10.
2. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F.Stocker, D.Qin, G.K.Plattner et al. // IPCC 2013. Climate Change 2013. Cambridge; N.Y., 2013. Doi: 10.1017/CBO9781107415324.
3. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год. М., 2016.
4. Рамочная конвенция об изменении климата. 2015 (http://scientificrussia.ru/data/shared/2015/12/l09r.pdf).
5. Бережная М.С. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТКРЫТОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ //Материалы IV Молодежного экологического форума «Проблемы комплексного освоения природных ископаемых», 29-30 октября 2019, Кемерово

УДК 528.88:627.8
DOI 10.24412/cl-37460-2025-1-554-558

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ INSAR И АНАЛИЗА ВЛАЖНОСТИ ГРУНТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ДАМБ ИРЕЛЯХСКОГО ДРАЖНОГО ПОЛИГОНА

Шеин Н.С., Стручкова Г.П., Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Тарская Л.Е.
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
E-mail: shnnick@yandex.ru

Аннотация. *Открытая добыча полезных ископаемых – один из наиболее экологически неблагоприятных способов освоения недр, сопровождающийся значительным техногенным воздействием и риском деформаций земной поверхности. В условиях потепления климата и распространения многолетней мерзлоты в Арктике такие процессы особенно актуальны. В работе выполнен анализ смещений и влажности грунтов на территории Ireляхского дражного полигона по данным Sentinel-1 и Landsat. Разработанный подход позволяет оценивать состояние дамб, отслеживать их устойчивость и прогнозировать возможные разрушения с использованием спутниковой информации и геоинформационных технологий.*

Ключевые слова: *деформация земной поверхности, индекс влажности, InSAR, Sentinel-1, Landsat, мониторинг, геодинамические процессы.*

INTEGRATION OF INSAR METHODS AND SOIL MOISTURE ANALYSIS FOR ASSESSING THE STABILITY OF DAMS AT THE IRELYAKH DREDGING SITE

Shein N.S., Struchkova G.P., Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Tarskaya L.E.
V.P. Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS

Abstract. *Open-pit mining is one of the most environmentally unfavorable methods of mineral extraction, accompanied by significant anthropogenic impact and a high risk of ground surface deformations. Under conditions of climate warming and permafrost distribution in the Arctic, such processes are particularly relevant. This study analyzes ground displacement and moisture dynamics at the Irelyakh dredging site using Sentinel-1 and Landsat satellite data. The developed approach makes it possible to assess the condition of dams, monitor their stability, and predict potential failures using satellite information and geographic information technologies.*

Keywords: *ground surface deformation, moisture index, InSAR, Sentinel-1, Landsat, monitoring, geodynamic processes.*

Введение. В настоящее время развитие промышленного комплекса в значительной степени определяется деятельностью горнодобывающего сектора, обеспечивающего потребности экономики в минерально-сырьевых ресурсах. Однако эксплуатация месторождений неизбежно сопровождается техногенным воздействием на природную среду, что требует совершенствования технологий добычи, переработки и утилизации отходов, а также внедрения эффективных систем мониторинга состояния объектов горнопромышленной инфраструктуры и ранней диагностики потенциально аварийных ситуаций.

За последние десятилетия значительный прогресс в области дистанционного зондирования позволил существенно улучшить мониторинг деформаций земной поверхности [1, 2]. Технологии InSAR на спутниках Sentinel-1 позволяют получать высокоточные данные о движении поверхности с разрешением, достаточным для выявления как медленных, так и резких изменений.

Мониторинг влажности почвы важен для оценки состояния сельхозугодий, прогнозирования наводнений, контроля эрозии и анализа деформаций, вызванных природными и антропогенными факторами [3, 4].

Цель исследования – комплексный анализ деформаций и влажности поверхности для оценки состояния объектов горнопромышленной инфраструктуры с использованием данных Sentinel-1, Landsat и ГИС. Применение методов InSAR и ГИС-моделирования позволяет выявлять закономерности и аномалии, что способствует совершенствованию мониторинга и снижению риска природно-техногенных катастроф.

Дражные полигоны Ирелях. Добыча алмазов на Ireляхском месторождении Мирнинского ГОКа АК АЛРОСА осуществляется в виде водохранилища, созданного на участке реки Ирелях.

Участки реки перекрываются временными дамбами и заливаются водой, что вызывает естественную оттайку мерзлых грунтов. Обогащение алмазоносных отложений производится драгой – плавучей фабрикой; пустая порода сбрасывается обратно, формируя отвалы.

19 августа 2018 года на участке «Иреляхская россыпь» произошёл прорыв четырёх дамб, вызвавший значительное загрязнение водотока и превышение предельно допустимых концентраций взвешенных веществ и металлов [5].

Данные и метод. Для интерферометрической обработки были использованы радиолокационные снимки, полученные спутником Sentinel-1 при VV поляризации за май-август 2017–2018 гг. в режиме интерферометрического широкополосного обзора (IW).

Настоящее исследование состояло из нескольких этапов, таких как сбор и предварительная обработка спутниковых данных, а также их анализ. В исследовании использовались три различных типа данных (данные Landsat, Sentinel-1, климатические данные), полученные из разных источников.

Интерферометрический анализ данных. Для анализа деформаций построены карты смещений на основе снимков Sentinel-1 и ЦМР ASTER GDEM в ПО SNAP. Обработка включала орбитальное выравнивание, генерацию интерферограммы, вычитание топографической фазы, фильтрацию методом Голдштейна и развёртывание фазы в SNAPHU [6].

Для интерферометрического анализа деформаций использованы серии снимков Sentinel-1 за 2017–2019 гг. Даты съёмок подбирались с минимальным временным базисом для повышения когерентности, необходимой для достоверной оценки деформационной активности.

Индекс влажности. Для расчета индексов были использованы космические снимки со спутника Landsat-8/9. Обработка выполнена в ArcMap 10.6.1. Даты снимков для территории Иреляхского дражного полигона были взяты с июня по август 2017–2019 гг.

Модифицированный водный индекс рассчитывается по формуле (1):

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR2}{GREEN + SWIR2} \quad (1),$$

где:

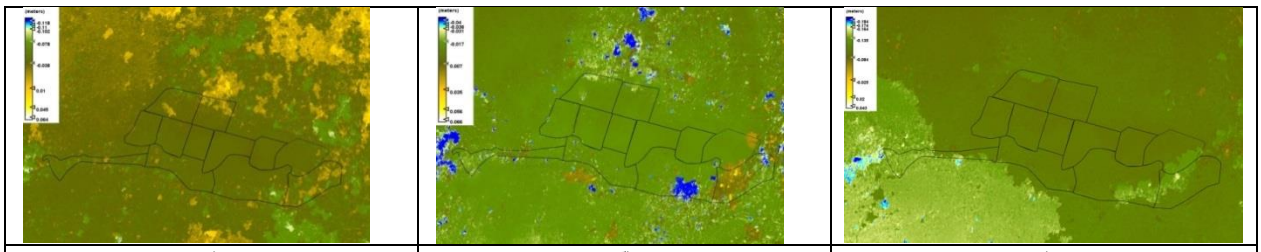
Green – зелёный спектральный канал,

SWIR – средний ИК диапазон.

Выбор точек исследования на дамбах полигонов, по которым осуществлялся анализ деформационных и влажностных процессов, представлен на рисунке 1.

Рис. 1. Схема расположения точек 1,2,3 анализа деформаций и влажности на дамбах дражного полигона на космоснимке

Результаты. Для проведения интерферометрического анализа деформаций земной поверхности на выбранном участке были использованы серии радарных изображений спутника Sentinel-1. На рисунке 2 показаны визуализации изменений земной поверхности на данной территории за период июль-август 2018 г.



а)	б)	в)

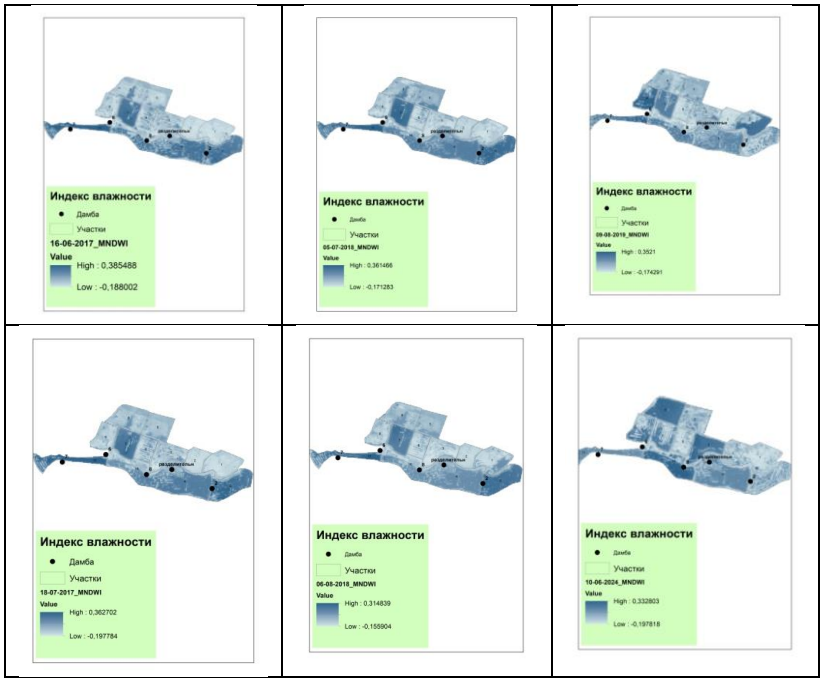
Рис. 2. Визуализация динамики деформаций земной поверхности до аварии на территории дражного полигона Ирелях (а, б, в_14 июля, 26 июля, 7 августа 2018 г.)

Поверхность отвала в пределах дамбы со временем деформируется. Выделяют два типа деформаций: безопасные – из-за изменения объёма при росте или удалении отвалов, и опасные – вызванные осадками, повышающими влажность, массу и снижающими прочность грунта. Ежегодно в мире фиксируются аварии примерно 15 % плотин, из них 70–75 % – на грунтовых, где основная причина – гидрометеорологические явления [7]. Частота разрушений может расти на фоне антропогенного изменения климата.

Нестабильные деформации делают дамбу уязвимой к разрушению, в отличие от стабильных. InSAR фиксирует смещения, однако для оценки опасного состояния важно выявить момент перехода от стабильности к нестабильности, что может сопровождаться ростом деформаций и увлажнённости грунта. Было проанализировано 17 наблюдений; построен график деформаций (май-август 2017–2019 гг.) на основе усреднённых значений когерентных точек в 5-метровой буферной зоне (рис. 5). Максимальные оседания отмечены в июле 2017 (–0,26 м) и августе 2018 (–0,14 м).

Чтобы учесть влияние влажности грунта были проанализированы распределения модифицированного водного индекса, используя данные спутника Landsat в период 2017–2019 года. (рис. 4). Максимальные летние значения водного индекса 0,26 (2018 г.).

Временные ряды визуализации индекса влажности для изучаемой территории показаны на рисунке 3.



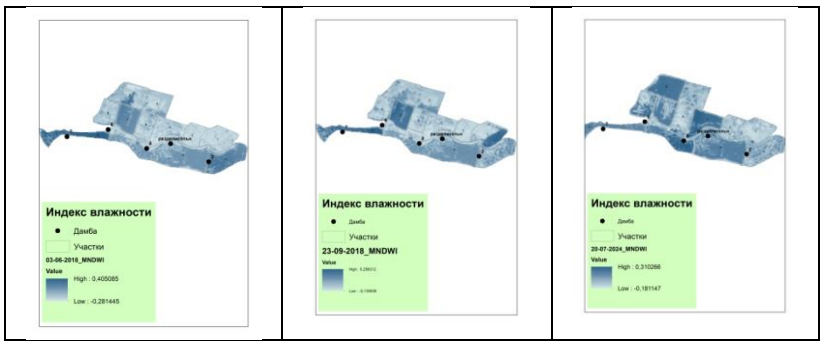


Рис. 3. Временные ряды индекса влажности MNDWI за 2017–2024 годы

График значений индекса MNDWI представлен на рисунке 4. Кривые временных рядов построены по усреднённым значениям в 5-метровой буферной зоне вокруг исследуемых точек (16.06.2017 – 09.08.2019). Наибольшие значения MNDWI зафиксированы в августе 2018 года, что указывает на переувлажнение грунта. В этот же период наблюдаются пиковые оседания поверхности, что свидетельствует о возможной взаимосвязи между ростом влажности и деформациями (рис. 4, 5).

	16.06.2017	18.07.2017	03.06.2018	05.07.2018	06.08.2018	23.09.2018	09.08.2019
1	0,19	0,11	0,16	0,2	0,11	0,04	0,09
2	-0,15	-0,12	-0,13	-0,08	-0,1	-0,04	-0,13
3	0,22	0,22	0,23	0,26	0,25	0,02	-0,03

Рис. 4. График временных рядов индекса влажности MNDWI в исследуемых точках дамб дражного полигона Ирелях по данным Landsat за 2017–2019 гг.

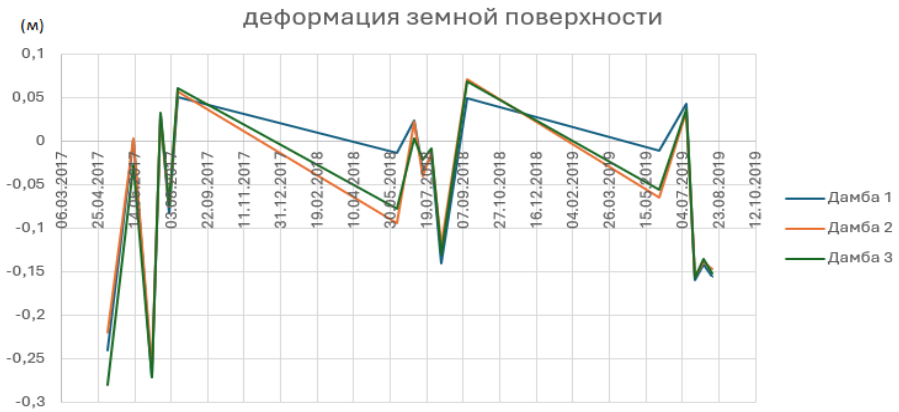


Рис. 5. Кривые временных рядов деформаций в исследуемых точках дамб дражного полигона Ирелях по данным InSAR за 2017–2019 гг.

В то же время анализ графика деформаций показывает, что оседания фиксировались не только в августе 2018 года, но и в другие периоды. Однако в указанные периоды значения индекса влажности оставались на низком уровне. Это может свидетельствовать о том, что сами по себе деформации не всегда ведут к аварийным последствиям, если они не сопровождаются насыщением грунта влагой. Отсутствие признаков переувлажнения в указанные периоды, несмотря на наличие деформаций, может объяснять, почему разрушительные процессы, аналогичные событиям августа 2018 года, не повторились.

Вывод. В работе реализован комплексный подход к дистанционной диагностике состояния природно-технических систем, основанный на интеграции спутниковых методов анализа деформаций земной поверхности и параметров влажности грунтов. Интерферометрическая обработка радиолокационных данных Sentinel-1 (InSAR) позволила выделить зоны вертикальных смещений в пределах дамб Иреляхского дражного полигона, потенциально указывающие на снижение их устойчивости. Совмещение этих данных с результатами мультиспектрального анализа снимков Landsat-8/9 и расчётом модифицированного водного индекса (MNDWI) обеспечило возможность отслеживания пространственно-временной динамики увлажнения и выявления аномальных участков.

Разработанный подход демонстрирует эффективность использования спутниковых наблюдений Sentinel-1 и Landsat для комплексной оценки геодинамической активности и гидрогеологических условий в зоне горнопромышленных объектов. Он представляет собой начальный этап формирования системы интегрированного геотехнического мониторинга, ориентированной на раннее выявление признаков дестабилизации инженерных сооружений. В условиях многолетней мерзлоты, характеризующейся высокой чувствительностью к антропогенным и климатическим воздействиям, устойчивое функционирование таких объектов требует непрерывных наблюдений, адаптивного управления техногенными нагрузками и оперативного применения инженерных решений, направленных на предупреждение и минимизацию последствий развивающихся деформационных процессов.

Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1023030900073-8-2.3.3, научная тема FWRS -2024-0032) и Российского научного фонда, проект: 24-27-20095.

Список литературы

1. Ширшова В.Ю. Опыт мониторинга оседаний земной поверхности в урбанизированных районах методом радиолокационной спутниковой интерферометрии на примере города Санкт-Петербург // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2020. Т.64. №4. С.399–408. DOI:10.30533/0536-101X-2020-64-4-399-408
2. Муродов С.Д., Чермошенцев А.Ю. Методика мониторинга смещений зданий и сооружений по данным космической радиолокационной съемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т.6. С.36-40. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-6-2-36-40
3. Родионова Н. В. Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии // Исследование Земли из космоса. 2023. №5. С.13-22. DOI 10.31857/S0205961423050068.
4. Корниенко С.Г. Информативность космических снимков сверхвысокого разрешения в задачах мониторинга влажности тундрового покрова // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. Вып. 2(29). С.82–95. https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2020-29.art7
5. Иванова Т. С., Сивцева Д. К. Об экологической ответственности недропользователей на примере АК «АЛРОСА» (ПАО) // Арктика XXI век. Гуманитарные науки. 2021. №4 (26). С.25–33.
6. Andreas Braun, Luis Veci. Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial. URL: https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox
7. Салямова К. Д., Ахмедов М. А. Статистический анализ повреждений и разрушений грунтовых плотин // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. Ч. I. Белгород, 2018. С.106–113.

СПИСОК АВТОРОВ

Адамов Р.Г.
Акимова М.П.
Аковецкий В.Г.
Александров А.Р.
Александров В.М.
Алексеев А.А.
Алексеева А.В.
Алексеев Н.В.
Алексеева П.А.
Альхименко А.А.
Аммосов Г.С.
Аммосова Л.С.
Андреев А.С.
Андреев Я.М.
Андреева А.В.
Антонов А.А.
Аргунова А.А.
Аргунова А.Г.
Афанасьев А.В.
Афанасьева Н.Н.
Ачикасова В.С.
Барсуков А.Р.
Большев К.Н.
Борисова М.З.
Ботвин Г.В.
Бурнашев А.В.
Бурнашев Е.А.
Бытыров А.П.
Варламов С.П.
Васильева М.И.
Васильев П.Ф.
Винокуров Г.Г.
Вит А.А.
Волотовский Е. С.
Гаврильева А.А.
Глуховеря Е. Г.
Гоголева О.В.
Голиков Н.И.
Голых Р.Н.
Григорьев А.В.
Гусев Е.Л.
Давыдов А.Д.
Давыдов Г.И.
Далбаева Е.А.
Дамдинжав М.
Данилов А.Д.
Данилова Е.Н.
Дмитриев, П.С.
Дроздова Е.А.
Макарова Л.К.
Максимов А.А.
Максимова Е.М.
Максимов Т.Х.
Малышев А.В.
Манусов В.З.
Дьяконов А.А.
Дьячковский И.И.
Егорова А.Д.
Ермаков С.Б.
Ермаков Б.С.
Ерофеевская Л.А.
Ефремов В.Н.
Жужгина Т.А.
Закиров Н.Н.
Захаров В.Е.
Захарова М.И.
Иванов А.Р.
Иванов Д.С.
Иванова И.К.
Иванов М.А.
Иванов С.А.
Иванов Т. Д.
Иванова И.В.
Ильин Г.Ю.
Исакова Т.А.
Калачева Л.П.
Капитонова Т.А.
Капитонова Ю.В.
Карпов И.Д.
Кириллин А.Р.
Клименов В.А.
Климова А.М.
Клопотов А.А.
Клочков Ю.С.
Кондратьев С.Ю.
Копырин М.М.
Корнилова В.В.
Корнилова З.Г.
Коротеев А.О.
Корякина В.В.
Кропотин О.В.
Копырин М.М.
Красильников Д.А.
Кузнецов С.В.
Кузьмин С.А.
Курган К.А.
Кычкин А.К.
Кычкина Ю.В.
Лавренчук В.А.
Лебедев М.П.
Лепов В.В.
Лепова К.Я.
Ли-Фир-Су Р.П.
Лукачевская И.Г
Лукин Е.С.
Сивцев С.И.
Сивцева-Гладкина Н.П.
Сидоров М.М.
Сильвестров С.А.
Скрябин Т.Н.

Маняхин И.А.
Марков А.Е.
Махарова С.Н.
Местников Н.П.
Михайлов А.Ю.
Мордовской П.Г.
Москвитина Л.В.
Нечаев А.А.
Нечаев Д.В.
Низин Д.Р.
Николаев А.С.
Николаева Л.А.
Ноев И.И.
Охлопкова А.А.
Павлов М.Р.
Павлов Н.В.
Паршин С.Г.
Пермяков П.П.
Петров А.М.
Петров В.В.
Петров Д.Д.
Петров П.П.
Петрова П.Н.
Петрова Т.Н.
Петухова Е.С.
Платонов Б.Р.
Попов Г.Г.
Попов С.Н.
Прокопьев Л.А.
Протопопов Ф.Ф.
Прохоров Д.В.
Прохоров В.А.
Реев В.Г.
Решетникова В.Р.
Сабынин В.В.
Саввинова М.Е.
Саввинова Н.А.
Салтыкова А.А.
Салтыкова А.Л.
Санников И.И.
Сараев Ю.Н.
Сафонова М.Н.
Семенов С.В.
Семенов С.О.
Сибиряков М.М.
Сивцева А.В.
Скутин В.С.
Слепцов Г.Н.
Слепцов О.И.
Солдатов К.В.
Соловьев Т.М.
Спиридонов А.М.
Ставров Д.А.
Стручкова Г.П.
Соколов Д.В.
Соловьев Т.М.
Старостин Н.П.
Старцев В.О.
Старцев О.В.
Степанов В.Е.,
Степанова К.В.
Стрелкова И.Л.
Стручков Н.Ф.
Сыромятников Д. И.
Сыромятникова А.С.
Тарасов П.П.
Тарасова П.Н.
Тарская Л.Е.
Терешкин А.Л.
Тихонов Р.П.,
Тихонов Р.С.
Тихонова С.А.
Туисов А.Г.
Унжаков А.С.
Федоров А.Л.
Федоров Ю.Ю.
Федотов А.А.
Федотова М.А.
Филиппов Д.В.
Хмелёв В.Н.
Хоютанов А.М.
Черных В.Д.
Чириков А.А.
Шабуневич В.И.
Шарин П.П.
Швецов О.В.
Шеин Н.С.
Эверстова Д.Г.
Яковлев Ю.А.
Яковлева С.П.
Ялыгин С.А.

Оформление и верстка *Ю. Болдырева*

Дата подписания к использованию: 05.12.2025
Объем издания: 24,1 Мб. Комплектация: 1 электрон. опт. диск (CD-R)
Тираж 7 экз.

Издательство АНО ДПО «Межрегиональный центр
инновационных технологий в образовании»
610047, г. Киров, ул. Свердлова, 32а, пом. 1003
Тел.: 8(8332) 32-47-48
https://mcito.ru/publishing; E-mail: book@mcito.ru

ISBN 978-5-908117-15-9