



ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Сборник материалов и докладов Всероссийской конференции,
приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН
(19–23 сентября 2024 г., г. Якутск)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ЯКУТСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН»
обособленное подразделение
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук

ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Сборник материалов и докладов Всероссийской конференции,
приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН
(19–23 сентября 2024 г., г. Якутск)

© АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2024
© Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 2024
© Коллектив авторов, 2024

УДК 62
ББК 30.3
Ц34

Ответственный редактор –
Лебедев М.П., чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:
Лукин Е.С., Протоद्याконова Н.А., Сидоров М.М., Борисова М.З., Пинигин Д.Д.

Ц34 Целостность и ресурс в экстремальных условиях [Электронный ресурс]: сборник материалов и докладов Всероссийской конференции, приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН (19–23 сентября 2024 г., г. Якутск). – Электрон. текст. дан. (19,5 Мб). – Киров: Изд-во МЦИТО, 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – Систем. требования: PC, Intel 1 ГГц, 512 Мб RAM, 19,5 Мб свобод. диск. пространства; CD-привод; ОС Windows XP и выше, ПО для чтения pdf-файлов. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-907851-71-9

Научное электронное издание

Представлены материалы и доклады Всероссийской конференции «Целостность и ресурс в экстремальных условиях» (ЦРЭУ-2024), приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН.

В материалах конференции рассматриваются вопросы надёжности, безопасности и целостности технических систем, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики, перспективные технологии и материалы для экстремальных условий, топливно-энергетический баланс Республики Саха (Якутия) и северных регионов, вопросы развития энергетики транспорта энергоресурсов и нефтегазового комплексов на Севере и в Российской Арктике, тепломассопереноса и термомеханики дисперсных сред.

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

ISBN 978-5-907851-71-9

УДК 62
ББК 30.3

© АНО ДПО «Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании», 2024
© Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 2024
© Коллектив авторов, 2024

Содержание

Обращение к участникам конференции (М.П. Лебедев)	11
Обращение к участникам конференции (Е.С. Лукин)	12
Открытие мемориальной доски памяти профессора Николая Александровича Петрова	13
Научная секция, посвященная 70-летию и памяти Егора Гаврильевича Старостина	15

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Аковецкий В.Г., Лавренчук В.А.	
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ	17
Блазнов А.Н., Медведев П.А., Сакошев З.Г., Фирсов В.В., Сакошев Е.Г., Савин Д.А.	
ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН	25
Ермаков Б.С., Швецов О.В., Голиков Н.И., Карпов И.Д.	
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПКМ В ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РФ	30
Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Лебедев М.П., Сидоров М.М.	
НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА	33
Петров М.Г., Старцев О.В., Лебедев М.П., Копырин М.М.	
АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ УСЛОВИЯХ И ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ	36
Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М., Максимова Е.М., Непомнящий А.С.	
РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ИНЖЕНЕРИИ ПОКРЫТИЙ С НИЗКОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДАМИ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЕМ ЗА СЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УДАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	40
Старцев В.О.	
ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПКМ	44

СЕКЦИЯ 1. ПРОЧНОСТЬ И ЦЕЛОСТНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Анахов С.В., Гузанов Б.Н., Матушкин А.В., Мичуров Н.С.	
О ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	48
Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С.	
СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ	52
Алексеев А.А., Иванов А.Р.	
РАЗРУШЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ	54
Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Антонов А.А., Терешкин А.Л., Яковлев Ю.А., Большев К.Н.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ	58
Антонов А.А., Корнилова З.Г., Яковлев Ю.А., Корнилова В.В.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЕЙСТВУЮЩЕГО НАДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА	62

Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Петров Д.Д. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ЭЛЕКТРОМУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ.....	66
Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С., Исакова Т.А., Павлова В.В., Соловьев Т.М., Хабаров Д.Р.	
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ СУВЕНИРНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ БИВНЕЙ МАМОНТА.....	69
Буслаева И.И., Яковлева С.П.	
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЯКУТИИ НА НАДЕЖНОСТЬ РЕССОР ГРУЗОВОГО АВТОТРАНСПОРТА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА ОТКАЗОВ.....	72
Волохов Г.М., Князев Д.А., Чунин В.В., Тимаков М.В., Ваулин П.В.	
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОСЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ОСЕВОЙ СТАЛИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ	76
Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Шардаков И.Н.	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	81
Казанцев А.Г., Абрамов В.В., Петров О.М., Радченко М.В.	
ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ВНЕШНИХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	84
Корнилова З.Г., Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Антонов А.А., Корнилова В.В.	
О ВОЗДЕЙСТВИИ МОРОЗНЫХ ПУЧЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЙ ТРУБОПРОВОД В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	88
Коссов В.С., Оганьян Э.С., Шабуневич В.И.	
К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ДЛИН УРАВНИТЕЛЬНЫХ РЕЛЬСОВ И РЕМОНТНЫХ РУБОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	91
Михайлов В.Е.	
РАСЧЕТ НАГРУЖЕННОСТИ РАМЫ АВТОСАМОСВАЛА БЕЛАЗ-7555В И ПРИМЕР РЕМОНТА СВАРКОЙ.....	98
Москвитин С.Г., Москвитина Л.В.	
ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ МАГНИЕВЫХ СИЛИКАТОВ НА КОЛЛОИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА	101
Паршин С.Г., Гао Ю., Никулин В.Е., Левченко А.М., Иванова И.В.	
ТЕХНОЛОГИИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ОХЛАЖДЕНИЯ	105
Петров В.Н.	
ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ	107
Петухова Е.С., Ерофеевская Л.А., Исакова Т.А., Ботвин Г.В., Соловьев Т.М., Павлова В.В., Чириков А.А., Петров В.В., Хабаров Д.Р.	
БИОЗАРАЖЕНИЕ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ СОРТНОСТИ БИВНЕЙ МАМОНТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ.....	111
Санников И.И., Голиков Н.И., Семёнов С.В.	
ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 10ХСНД ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР	114
Сидоров М.М., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н.	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА УДАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ	115
Сильвестров А.С., Шегуров Э.А.	
АНАЛИЗ ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ ПО ТРАССЕ ЛИНЕЙНОГО СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ	117

Слепцов Г.Н., Слепцов О.И., Ноев И.И., Солдатов К.В. РЕНОВАЦИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ НОЖА СРЕДНЕГО ОТВАЛА ТЯЖЕЛОЙ ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИЙСЯ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ	121
Степанов В.Е., Степанова К.В., Ноев И.И. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗРЫВА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБРАЗЦОВ.....	125
Степанова К.В., Степанов В.Е., Слепцов О.И., Слепцов Г.Н., Петров П.П., Эверстов М.М. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО МЕТАЛЛА ШВА ПОД ВЛИЯНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	127
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.....	130
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.....	138

СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Ерофеевская Л.А., Соколова М.Д. МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ И ГРУНТОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ БУХТЫ «ТИКСИ».....	143
Ефремов В.Н. ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	146
Каймонов М.В. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМОВ ШТАБЕЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА ...	149
Калачева Л.П., Иванова И.К., Портнягин А.С., Иванов В.К., Бубнова А.Р., Аргунова К.К. ОСОБЕННОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В КРИОЛИТОЗОНЕ	151
Кузьмин Г.П., Куваев В.А. ТЕПЛОТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВОДЫ КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ....	155
Лифшиц С.Х., Глазнецова Ю.С., Чалая О.Н., Зуева И.Н. ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ПОЧВ ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕКОЛЫМСКОЙ НЕФТЕБАЗЫ	158
Местников Н.П., Васильев П.Ф., Корякин А.К., Реев В.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЫЛЬНОЙ СТОРОНЫ ДВУХСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ	162
Ноговицын Д.Д., Сергеева Л.П., Шейна З.М. , Пинигин Д.Д., Никулин К.В. УСТАНОВЛЕНИЕ ВОДООХРАННЫХ ЗОН ДЛЯ РЕК, ПЕРЕСЕКАЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАССОЙ НА ТЕРРИТОРИИ РС (Я) (НА ПРИМЕРЕ Ж/Д ПУТИ «УЛАК-ЭЛЬГА»).....	165
Павлов Н.В., Иванова А.Е., Старостина А.Е. ЭНЕРГЕТИКА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ): РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ.....	169
Пермяков П.П., Варламов С.П., Винокурова Т.А., Попов Г.Г. ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС ДОРОГ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СУБАРКТИКИ	172
Прохоров Д.В., Прохоров В.А., Кушнарева К.И. АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	175

Рожин И.И., Иванов Г.И. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НАГНЕТАНИИ ПРИРОДНОГО И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗОВ В ПОДМЕРЗЛОТНЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР	179
Семенов С.О., Малышев А.В., Большев К.Н., Саввинова Н.А., Андреев А.С. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВЛАГИ В ДИСПЕРСНОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ	183
Скачков Ю.Б. ДИНАМИКА МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В Г. ЯКУТСКЕ	185
Таппырова Н.И., Протодяконова Н.А., Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н. ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОРОВОГО РАСТВОРА И НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ	188
Захаров В.Е., Петрова Т.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ С. НАМЫ БУЛУНСКОГО УЛУСА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	192

СЕКЦИЯ 3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Борисова М.З. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛОМОВ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В НАНОСТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИСПЫТАНИЯМ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	196
Васильева А.А. РАЗРАБОТКА ЗАМАСЛИВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ	198
Гаврильева А.А., Старцев О.В., Кычкин А.К., Лебедев М.П., Кротов А.С., Лукачевская И.Г. РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ	202
Гайдукова Л.В., Маслацова А.А., Котелкова Е.О., Возняковский А.П. ПАТЕНТНЫЙ ЛАНДШАФТ: МОРОЗОСТОЙКИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	206
Гусев Е.Л., Петрова П.Н., Гоголева О.В., Колесова Е.С. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ	209
Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ	213
Злобина И. В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О., Пасечная А.А. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИАМИДА 6 В СОСТАВЕ ПКМ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ	217
Исакова Т.А., Петрова П.Н., Маркова М.А. ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ СМЕШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН	219
Кычкин А.А., Кычкин А.К., Сивцев С.И., Гаврильева А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПОСЛЕ НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	223
Кычкин А.К., Лукачевская И.Г., Кычкин А.А., Салтыкова А.Л., Далбаева Е.А., Габышев А.А., Терешкин А.Л. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ПРОВОКАЦИОННОМ БИОЗАРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ	227

Мишигдоржийн У.Л., Улаханов Н.С., Гуляшинов П.А., Тихонов А.Г., Нгуен Ван Вин,
Балановский А.Е.

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА ШТАМПОВЫХ СТАЛЯХ.....230

Москвичев Е.В., Еремин Н.В., Фесик С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНОКОМПОЗИЦИОННОГО
МАТЕРИАЛА, ДЕГРАДИРОВАННОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ.....234

Низина Т.А., Низин Д.Р., Спирын И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А.

ВЛИЯНИЕ НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА КИНЕТИКУ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ238

Низин Д.Р., Низина Т.А., Спирын И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А.

ДОСТОВЕРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ
НЕНАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ.....242

Петров П.П., Тарасов П.П., Степанова К.В., Данилов А.Д.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РАСПЛАВОВ ЛИТЫХ СПЛАВОВ, МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ
КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ245

Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПЭНД НА ПОЛИГОНЕ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ «ЯКУТСК».....249

Федоров А.Л.

РАЗРАБОТКА МАШИНЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ251

Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОЛИЭТИЛЕНА253

Федотова М.А., Эверстова Д.Г., Иванов М.А.

ПРИМЕСНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДАМИ НРНТ
И БАРС АЛМАЗОВ256

Шадрин Н.В.

РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКИХ
ПОЛИМЕРЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....260

Махарова С.Н., Яковлева С.П., Васильева М.И.

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ОЧАГОВОЙ
УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ, ПОВЛЕКШЕЙ КВАЗИДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ
СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.....261

МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ 4. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Белослюдцева Д.Я., Федорова А.Ф.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КАУЧУКОВ НЕПОЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ
ХЛОРОПРЕНОВЫХ РЕЗИН.....266

Васильев А.П., Дьяконов А.А., Данилова С.Н., Макаров И.С., Оконешникова А.В.,
Охлопкова А.А.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО 2-МЕРКАПТОБЕНЗТИАЗОЛОМ И ОКСИДОМ МЕДИ268

Далбаева Е.А., Ерофеевская Л.А., Салтыкова А.А., Вит А.А.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МИКРОБОЦЕНОЗА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ
ПОСЛЕ БИОРЕМЕДИАЦИИ.....272

Данилова С.Н., Иванова Н.Н., Лазарева Н.Н., Васильев А.П., Охлопкова А.А.

ВЛИЯНИЕ СТЕКЛОВОЛКНА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО
ПОЛИЭТИЛЕНА274

Двирная Е.В., Старцев О.В., Корниенко Г.В., Коваль Т.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДОВ.....	277
Демин К.А., Агнаев С.С., Дондуков С.Д., Хаглеев А.Н. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ.....	281
Дондуков С.Д., Агнаев С.С., Демин К.А., Хаглеев А.Н. ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ВОЛОКНА ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ.....	284
Иванов Т.Д., Аммосов Г.С., Аммосова Л.С. РЕСУРСЫ СЕВЕРА: ХОЛОД КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ	287
Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ БИВНЕЙ МАМОНТА РАЗНЫХ СОРТОВ	290
Киселев А.Ю., Васильев П.Ф. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЛЭП, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	293
Климова А.М., Васильева М.И., Стручков Н.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ ТЕХНИКИ	296
Ковалев М.А., Москвичев В.В. НАДЕЖНОСТЬ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ КУЗБАССА	300
Коваль Т.В., Старцев О.В., Двирная Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛКП ПОСЛЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ 8 И 13 ЛЕТ	303
Коган А.М., Старцев В.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭКСПОНИРОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ	307
Копырин М.М., Старцев О.В., Лебедев М.П. ПРОЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЯКУТСКЕ	311
Корниенко Г.В., Старцев О.В., Гладких А.В. ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МОДУЛЬ СДВИГА В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА ОБРАЗЦОВ ПКМ	314
Кычкин А.А., Кычкин А.К. ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С НАПОЛНИТЕЛЕМ КАРБИДОМ КРЕМНИЯ ЭКСПОНИРОВАННЫХ В ТЕЧЕНИЕ 12 МЕСЯЦЕВ В УСЛОВИЯХ ОЧЕНЬ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА.....	318
Кычкин А.К., Лукачевская И.Г., Лебедев М.П., Дьяконов А.А., Стручков Н.Ф., Кычкин А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДЕСТРУКЦИИ СТЕКЛО- И БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ.....	320
Лоскин Н.Н., Прокопьев А.Р., Попов Д.Н., Васильев П.Ф. АКТИВАЦИЯ УГЛЕРОДНОГО НАНОМАТЕРИАЛА МЕТОДОМ БЫСТРОГО ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ.....	324
Марков А.Е., Кычкин А.К., Копырин М.М. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФИБРОАРМИРОВАНИЕМ	327
Никулин К.В., Ноговицын Д.Д., Сергеева Л.П. ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ БАССЕЙНА РЕКИ ИНДИГИРКА	329
Никулин К.В., Ноговицын Д.Д., Сергеева Л.П. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ ПАВОДКОВЫХ ВОЛН ДЛЯ МНОГОВОДНОГО И МАЛОВОДНОГО ГОДА НА ПРИМЕРЕ РЕКИ АДЫЧА	333

Попов Д.Н., Васильева Е.Д., Попов А.С., Лепов В.В. НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ДОБАВКИ В БЕТОНЕ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ	337
Реев В.Г., Васильев П.Ф. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В СИСТЕМУ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ АРКТИКИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)	340
Садыков Р.Х., Стаценко В.Н., Гридасов А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ СВАРКИ	343
Салтыкова А.А., Вит А.А., Далбаева Е.А. МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ДОБАВОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	350
Салтыкова А.А., Вит А.А., Ерофеевская Л.А. ИСПЫТАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ БИОПРЕПАРАТОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ	354
Слепцов А.А., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Тимофеева В.В., Тарская Л.Е. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕМОНТНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ ПРИ ОТКАЗАХ И АВАРИЯХ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	357
Стручков А.Н., Прохоров В.А. ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА В Г. ЯКУТСКЕ	360
Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Тарская Л.Е. КАРТИРОВАНИЕ УРОВНЯ ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА ГАЗОПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ, ДАННЫХ ДЗЗ И ГИС	363
Хоютанов А.М. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИРИСТОРНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НА ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	366
Хоютанов А.М., Ачикасов Р.Р. ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЭС НА ОСНОВЕ ГИДРОГРАВИТАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	369
Хоютанов А.М., Давыдов Г.И., Васильев П.Ф., Местников Н.П., Реев В.Г., Ачикасов Р.Р. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕВЕРНЫХ И АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ).....	372
Шигаров Г.И., Мещерякова А.В., Новокупцев Н.В., Ревин В.В. ПОЛУЧЕНИЕ БИОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ И ПОЛИСАХАРИДОВ МИКРОБНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ.....	377
Эверстова Д.Г. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТОИМОСТНОЙ ОЦЕНКИ БРИЛЛИАНТОВ ФАНТАЗИЙНОГО ЦВЕТА	379

ПРИЛОЖЕНИЯ

Решение Всероссийской конференции «Целостность и ресурс в экстремальных условиях», приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН.....	383
Программный комитет	387
организационный комитет.....	388
Наши партнеры	388
Авторы.....	390

ОБРАЩЕНИЕ К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ

Уважаемые участники, коллеги и гости!

Всероссийская конференция «Целостность и ресурс в экстремальных условиях», ставшей сегодня одним из традиционных научных мероприятий Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) обособленного подразделения ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» (ЯНЦ СО РАН) была посвящена 75-летию ЯНЦ СО РАН и проводилась в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН и II Арктического конгресса «Арктика – территория стратегических научных исследований».

За 75 лет ЯНЦ СО РАН стал одним из ведущих научных центров в Сибирском отделении, где сосредоточено более половины научного потенциала Республики Саха (Якутия). Учитывая суровые климатические условия региона и наличие многолетней мерзлоты, специфические условия жизни населения, особое внимание всегда уделялось исследованиям в области целостности и ресурса технических систем в экстремальных условиях Севера и Арктики, а также решению задач, способствующих социально-экономическому развитию республики. Конференция ЦРЭУ-2024 призвана подчеркнуть важность этих исследований и способствовать обмену опытом между учёными и специалистами из разных областей науки и техники.

Как своё время подчеркивал академик Владимир Петрович Ларионов проведение серьёзных фундаментальных и прикладных исследований институтами ЯНЦ СО РАН стало возможным, благодаря тому, что до наступления периода системного кризиса в стране в каждом академическом институте республики имелись необходимые научные кадры для выполнения основных направлений, создана соответствующая материально-техническая база – лабораторные корпуса, оснащенные на достаточно высоком уровне установками и приборами для проведения научных исследований.

Среди них ученые из ИФТПС СО РАН профессор Н.А. Петров и доктор наук Е.Г. Старостин внесли значительный вклад в развитие фундаментальных научных исследований ЯНЦ СО РАН за последние 75 лет. В их честь и в память о выдающихся учёных ИФТПС СО РАН на конференции состоялось открытие почётной мемориальной доски выдающемуся советскому и российскому учёному в области комплексных проблем энергетики, заслуженному энергетик РФ, почётному гражданину РС(Я), лауреату премии им. Г.М. Кржижановского РАН, участнику Великой Отечественной войны, доктору технических наук, профессору Н.А. Петрову. Также была организована научная секция, посвящённая 70-летию со дня рождения ведущего учёного в области тепломассообменных процессов при низких температурах, доктора технических наук Е.Г. Старостина и открытие ему почётной мемориальной доски.

Надеемся, что результаты конференции будут способствовать развитию науки и технологий, а также укреплению межрегионального и междисциплинарного сотрудничества научных коллективов.

*Генеральный директор ЯНЦ СО РАН,
член-корреспондент РАН
председатель программного комитета конференции
М.П. Лебедев*

ОБРАЩЕНИЕ К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ

Уважаемые участники, коллеги и гости!

От имени оргкомитета ЦРЭУ-2024 позвольте выразить благодарность всем, кто принял участие в работе конференции и поделился своими исследованиями, опытом и достижениями.

Во время проведения конференции мы обсудили широкий круг вопросов, связанных с целостностью и ресурсом технических систем, функционирующих в экстремальных условиях. Мы рассмотрели актуальные проблемы обеспечения надёжности и безопасной эксплуатации машин и конструкций, фундаментальные и прикладные аспекты физики прочности и механики разрушения при низких температурах, применение новых материалов и технологий для экстремальных условий, развитие энергетики, транспорта энергоресурсов и нефтегазового комплекса на Севере и в Арктике, тепломассоперенос и термомеханику дисперсных сред.

Участники конференции обменялись опытом и результатами своих исследований, а также обсудили возможности дальнейшего развития и сотрудничества в области науки и технологий.

Желаем вам дальнейших успехов в вашей научной деятельности и благодарим за активное участие в работе конференции!

*И.о. директора ИФТПС СО РАН,
кандидат технических наук,
председатель организационного комитета конференции
Е.С. Лукин*

ОТКРЫТИЕ МЕМОРИАЛЬНОЙ ДОСКИ ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА НИКОЛАЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА ПЕТРОВА



19 сентября 2024 года в ИФТПС СО РАН в рамках мероприятий, посвященных 300-летию Российской академии наук и Всероссийской конференции «Целостность и ресурс в экстремальных условиях», приуроченной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, состоялось мероприятие по открытию мемориальной доски памяти выдающегося советского и российского учёного в области комплексных проблем энергетики, заслуженного энергетика Российской Федерации, почетного гражданина Республики Саха (Якутия), лауреата премии им. Г.М. Кржижановского Российской академии наук, участника Великой Отечественной войны, доктора технических наук, **профессора Н.А. Петрова**. В мероприятии приняли участие Генеральный директор ЯНЦ СО РАН, член-корреспондент РАН Лебедев М.П., и.о. директора ИФТПС СО РАН, к.т.н. Лукин Е.С., заместитель министра ЖКХ и энергетики РС(Я) Киров С.В., заместитель генерального директора ПАО «Якутскэнерго» Куртуяхов С.Н., родные, друзья, участники конференции, ведущие ученые и сотрудники ИФТПС СО РАН, институтов ФИЦ ЯНЦ СО РАН. В рамках открытия мемориальной доски была организована **выставка** научных трудов Петрова Николая Александровича.

гетика Российской Федерации, почетного гражданина Республики Саха (Якутия), лауреата премии им. Г.М. Кржижановского Российской академии наук, участника Великой Отечественной войны, доктора технических наук, **профессора Н.А. Петрова**. В мероприятии приняли участие Генеральный директор ЯНЦ СО РАН, член-корреспондент РАН Лебедев М.П., и.о. директора ИФТПС СО РАН, к.т.н. Лукин Е.С., заместитель министра ЖКХ и энергетики РС(Я) Киров С.В., заместитель генерального директора ПАО «Якутскэнерго» Куртуяхов С.Н., родные, друзья, участники конференции, ведущие ученые и сотрудники ИФТПС СО РАН, институтов ФИЦ ЯНЦ СО РАН. В рамках открытия мемориальной доски была организована **выставка** научных трудов Петрова Николая Александровича.



Петров Николай Александрович (17.05.1926–03.02.2022) – доктор технических наук, профессор, заслуженный энергетик РФ, почетный работник науки и техники РФ, почетный гражданин Республики Саха (Якутия), лауреат премии им. Г.М. Кржижановского РАН, ветеран-участник Великой отечественной войны, известный в стране и за рубежом специалист в области комплексных проблем энергетики, автор и соавтор более чем 250 научных работ, в том числе 8 монографий.

В 1960 г. Николай Александрович поступил на работу в Отдел энергетики Якутского филиала СО АН СССР. В 1970 году отдел энергетики становится одной из основных структур созданного Института физико-технических проблем Севера, с 1970 по 1986 год Петров Н.А. заведующий лабораторией общей энергетики, с 1986 по 2017 годы – заведующий Отделом энергетики, с 2017 по 2022 г. – главный научный сотрудник, научный руководитель направления «Комплексные проблемы формирования энергетической политики и научно-технологической стратегии энергетики Севера» ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» обособленное подразделение Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.

Исследования Н.А. Петрова позволили: впервые выявить тенденции развития энергетики Севера с учетом его природно-климатических, национальных и социальных особенностей; сформулировать принципы развития энергетики Севера, в новой социальной, политической и экономической обстановке, и установить основные определяющие факторы; адаптировать и модифицировать с учетом специфики Севера принятую в стране методологию разработки перспектив развития энергетики в новых условиях хозяйствования; разработать общие научные основы энергетической политики (выбор подхода к решению некоторой совокупности проблем) для районов Севера и в их рамках выполнить научные основания и рекомендации к разработке энергетической стратегии Республики Саха (Якутия); создать и внедрить информационно-аналитическую модель сводного топливно-энергетического баланса региона, как инструмент согласования проектов развития отраслевых систем.

Результаты научных исследований Н.А. Петрова нашли поддержку и широкое применение при разработке центральными и республиканскими органами власти проектов развития энергетики регионов Севера. Н.А. Петров вёл большую научно-общественную работу.

За заслуги в научной деятельности, за большой вклад в развитие науки, во внедрение научных разработок в народное хозяйство, подготовку высококвалифицированных научных кадров Н.А. Петрову были присвоены почетные звания и награды: Медаль «За победу над Японией», Почетная грамота Президиума Верховного Совета ЯАССР, Медаль «За строительство БАМ», Заслуженный работник народного хозяйства ЯАССР, Заслуженный ветеран СО РАН, Заслуженный энергетик Российской Федерации, Знак отличия «Гражданская доблесть», Лауреат премии Республики Саха (Якутия) в области науки и техники, Медаль «Н.В. Черского», Грамота Президента Республики Саха (Якутия), Почетный работник науки и техники Российской Федерации, Медаль «380 лет Якутия с Россией», Почетная грамота Государственного собрания (Ил Тумэн) Республики Саха (Якутия), Почетный гражданин Республики Саха (Якутия), Лауреат премии им. Г.М. Кржижановского РАН, Лауреат премии им. В.П. Ларионова в области науки и техники для молодых ученых Государственного собрания Ил Тумэн Республики Саха (Якутия) – научный руководитель авторского коллектива, Почетная грамота Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Благодарность Главы Республики Саха (Якутия) и др.

Н.А. Петров внес неоценимый вклад в развитие Института, а его научная работа, ее прикладные аспекты – в дело социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) и Дальнего Востока Российской Федерации.

Отдел проблем энергетики ИФТПС СО РАН

НАУЧНАЯ СЕКЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ 70-ЛЕТИЮ И ПАМЯТИ ЕГОРА ГАВРИЛЬЕВИЧА СТАРОСТИНА



20 сентября 2024 года в ИФТПС СО РАН в рамках мероприятий, приуроченных к 300-летию Российской академии наук и Всероссийской конференции «Целостность и ресурс в экстремальных условиях», приобщенной к 75-летию ЯНЦ СО РАН, была проведена секция «Энергетика и теплофизика в экстремальных условиях», посвященная памяти и 70-летию со дня рождения ведущего учёного в области теплообменных процессов при низких температурах, доктора технических наук, профессора **Егора Гаврильевича Старостина**.



23 сентября 2024 г. состоялось **открытие мемориальной доски памяти Старостина Е.Г.** В мероприятии приняли участие Генеральный директор ЯНЦ СО РАН, член-корреспондент РАН М.П. Лебедев, и.о. директора ИФТПС СО РАН, к.т.н. Лукин Е.С., директор ИГДС СО РАН, д.т.н. Ткач С.М., заведующий кафедрой «Теплофизика и теплоэнергетика» СВФУ, д.ф.-м.н. Саввинова Н.А., ученый секретарь ЯНИИСХ СО РАН, к.с.-х.н. Аммосова Т.В., заместитель председателя Союза писателей РС(Я), гл. редактор журнала «Полярная звезда» Доллонов В.С., супруга Старостина Л.П., дочери Анна и Мария, родные, однокурсники, одноклассники, друзья, ведущие ученые и сотрудники ИФТПС СО РАН. В рамках открытия мемориальной доски была организована **выставка** научных трудов, патентов и свидетельств на изобретения, сборников стихотворений и рассказов Егора Гаврильевича – БайаБантай.



Старостин Егор Гаврильевич – доктор технических наук, профессор, директор ИФТПС СО РАН (2015–2018 гг.), один из ведущих ученых в области теплофизики и термодинамики неравновесных процессов, геокриологии, теплоэнергетики, поэт, член союза писателей Республики Саха (Якутия).

В Институте физико-технических проблем Севера СО РАН Егор Гаврильевич начал работу в 1991 году ведущим инженером. Работал в должности заведующего лабораторий (с 2001 г.), ведущего научного сотрудника (с 2005 г.), заместителя директора по научной работе (с 2012 г.) пройдя путь до директора института (с 2015 г.). Параллельно занимался преподавательской деятельностью в должности профессора кафедры теплофизики Физико-технического института СВФУ им. М. К. Аммосова. Разработал и вел спецкурсы, осуществлял научное руководство студентами и аспирантами, много времени уделял работе с молодыми научными сотрудниками.

Егором Гаврильевичем были теоретически обоснованы и разработаны новые методы исследования фазового состояния поровой влаги в грунтах и строительных материалах в диапазоне естественного изменения температур в условиях экстремального климата Севера, были получены новые фундаментальные результаты в термодинамике фазового равновесия воды в горных породах, строительных материалах и других дисперсных средах при отрицательных температурах, исследованы свойства широкого класса дисперсных материалов: мерзлых грунтов, строительных материалов.

Полученные Е.Г. Старостиним результаты находят практическое применение в геокриологии, строительной и горной теплофизике, используются в теплотехнических расчетах при проектировании инженерных сооружений и зданий в условиях криолитозоны, на их основе были разработаны Территориальные строительные нормы (ТСН 23-343-2002 РС(Я)) «Теплозащита и энергопотребление жилых и общественных зданий» и «Нормы расхода тепла на отопление и горячее водоснабжение».

Егор Гаврильевич также известен как поэт БайаБантай, член правления Союза писателей Республики Саха (Якутия), член Международного сообщества писательских союзов, автор четырех сборников стихотворений и одного сборника рассказов.

Научная, культурная, организаторская и общественная деятельность Егора Гаврильевича была отмечена многочисленными наградами: Заслуженный ветеран СО РАН, нагрудный знак «Изобретатель СССР», нагрудный знак ВДНХ СССР, благодарность Якутской городской думы, юбилейный знак РС(Я) «380 лет Якутия с Россией», знак отличия «Гражданская доблесть», Почетный знак Министерства культуры и духовного развития РС(Я) «За вклад в развитие народного художественного творчества РС(Я), звание «Почетный гражданин Баягантайского наслега Томпонского улуса», Почетная грамота Президиума СО РАН, Почетная грамота Госкомитета РС(Я) по инновационной политике и науке, Почетная грамота Министерства науки и профессионального образования РС(Я), Большая серебряная медаль Николая Гумилева Союза писателей России и др.

Е. Г. Старостин внес неоценимый вклад не только в научно-техническое развитие, но и в культурную и духовную сферу Республики Саха (Якутия) как ученый, поэт и философ.

Отдел теплообменных процессов ИФТПС СО РАН

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-17-24

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

Аковецкий В.Г., Лавренчук В.А.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

geoinforisk@mail.ru

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 оценке состояния ликвидированных скважин на промыслах. Рассмотрены дистанционные методы их локализации и паспортизации.

Важным элементом устойчивого развития нефтегазового комплекса (НГК) является учет влияния происходящих изменений параметров климатической системы Земли (КСЗ) на промышленную безопасность его объектов. Данная ситуация предполагает разработку адаптационных стратегий развития отраслей климатозависимых территорий Арктической зоны (КТАЗ), к которым относится НГК. Возникновение геоэкологических рисков на объектах НГК, в ходе реализации проектов, связано с их продолжительностью, которая достигает 60–100 лет. За это время изменяются природные условия проектных решений, происходит износ оборудования и снижается его коррозионная устойчивость. Это приводит к авариям, которые оказывают значительное воздействие на геосферные планетарные оболочки.

Особую актуальность в настоящее время приобретают проблемы, связанные с выводом из эксплуатации устаревшего оборудования, в частности, ликвидированных и бесхозных скважин, трубопроводных систем. По данным Госгортехнадзора России в 2015 году в Тюменской области, Ханты-Мансийском и Ямало-Ненецком автономных округах (ЯНАО) находилось более 330 заброшенных скважин, в которых были выбросы нефти и газа. Говоря о приоритетах работы Министерства природных ресурсов и экологии РФ Александр Козлов в 2021 году отметил, что в стране находится более 20 000 тыс. заброшенных скважин. Многие из них взрывоопасны, что требует проведения их инвентаризации и установления опасности для окружающей среды (ОС).

Для решение данного класса задач получают распространение системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и специализированные геопорталы мониторинговых наблюдений. Они позволяют существенно дополнить, а в ряде задач заменить, натурные полевые измерения бесконтактными дистанционными методами наблюдений динамики изменения индикаторов опасных природных и техногенных процессов.

Целью работы является разработка методов локализации и зонирования опасных воздействий природных и техногенных процессов при оценке геоэкологических рисков реализации проектов НГК посредством систем дистанционного мониторинга.

Для ее достижения в работе должна быть осуществлена:

оценка воздействия опасных источников возникновения ЧС на территории НГК;

апробация методов зонирования источников активизации опасных природных и техногенных процессов, инициирующих возникновение ЧС.

апробация методов локализации эмиссии ПГ на основе методов ДЗЗ и искусственного интеллекта в рамках, существующих геопорталов.

Модели и методы исследований. Для локализации участков проявления опасных природных и техногенных процессов на объектах НГК необходимо контролировать показатели деформации горных пород, загрязнения почвенного покрова, водных объектов и атмосферного воздуха.

Деформация горных пород прямо связана с геодинамикой и геокриологией.

Источники природных геодинамических воздействий разделяют на эндогенные и экзогенные. Характер эндогенных процессов определяется динамикой изменения параметров состояния литосферы на планетарном, федеральном и региональном уровнях.

На локальном и детальном уровнях основными источниками воздействия на состояние недр, приводящим к возникновению ЧС на промыслах, являются геодинамические подвижки горных пород, вызванные разработкой залежей. Они вызывают:

- техногенные (антропогенные) деформации горных пород различной направленности, что приводит к нарушению процесса бурения скважин и слому их колонн;
- изменение давления в пласте, которое инициирует газовые выбросы, разрыв пласта, деформацию обсадных колонн скважин.

Для локализации и контроля деформационных процессов в настоящее время используют системы геодинамического мониторинга на основе геодезических методов глобального спутникового позиционирования. Их применяют для определения динамики горизонтальных и вертикальных подвижек литосферных плит. Для дистанционного контроля геодинамики на локальных участках промыслов, вызванные техногенной разработкой залежей, используются методы радиолокационной интерферометрии.

В задачах локализации участков активных геодинамических процессов также может быть рассмотрен метод линеamentного анализа территории по материалам ДЗЗ.

Наряду с геодинамическими факторами активным источником деформационных подвижек на объектах НГК являются *геокриологические процессы*. Показатели деградации криолитозоны (площадь, глубина, температура), зависят от уровня климатических и техногенных воздействий. Сезонные климатические изменения температуры приземного слоя атмосферы и горных пород приводят к разрушению и миграции границ мерзлых грунтов, что вызывает их просадки и выпучивание на значительных площадях. Для их локализации и контроля деформаций используют поверхностные и глубинные марки и реперы, а также термометрические трубки, позволяющие определять глубинные деформации. Поверхностные деформационные процессы, связанные с сезонным промерзанием и техногенным воздействием, происходят при нарушении почвенно-растительного покрова в ходе бурения скважин. Они приводят к оттаиванию мерзлых пород вокруг приустьевой части скважин и образованию термокарстовых воронок глубиной до 1,5 м, активизации геокриологических процессов (термокарста, термоэрозии, пучения, растрескивания, солифлюкции) на расстоянии до 200 м от устья скважин.

Бурение скважин также сопровождается образованием шламовых амбаров, В результате в 2018 году площадь нарушенных земель составила 567 905 га, а рекультивированных только 54 314 га. Для локализации их участков и контроля состояния почвенного покрова, успешно используются методы аэрокосмического мониторинга.

В настоящее время в России большая часть трубопроводов была построена в 1950–1970-х годах, поэтому в проектах не было прогноза возможности потепления климата. Активизации русловых деформаций, связанная с увеличением опасных природных процессов, приводит к уменьшению расчетного срока эксплуатации переходов. По данным Министерства энергетики РФ в 2022 г. на магистральных трубопроводах было зарегистрировано 26311 порывов, что в 2,6 раза больше, чем в 2021 г., в том числе из них 12985 случаев были зафиксированы на промысловых нефтепроводах, где 94% случаев произошли из-за коррозии [1].

В ЯНАО в 2022 г. было зарегистрировано 35 случаев высокого уровня загрязнения на 12 водных объектах и 19 случаев экстремально высокий уровень – на 8 водных объектах, что связано с разведкой, обустройством и эксплуатацией месторождений.

Старение оборудования определяет необходимость его замены и ликвидации. Особо остро эта проблема возникает на промыслах, где наличие негерметичности заколонного

пространства нефтяных и газовых скважин на поздних стадиях разработки месторождений увеличивает геоэкологические риски вследствие высокой обводненности продукции, применения различных химических реагентов для интенсификации добычи углеводородов и повышения нефтегазоотдачи. Эти риски также возникают на уже ликвидированных скважинах проектная безопасность, которых составляет 20 лет, что связано с низким уровнем извлечения нефти и газа, когда до 50% нефти и 30% газа остаются в недрах из-за несовершенства технологий добычи.

За рубежом, в частности в США, особую озабоченность вызывает эмиссия парниковых газов (ПГ) из заброшенных нефтяных и газовых скважин. Выбросы углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) в США приведены в таблице 1 [2]. Данная ситуация повлекла необходимость их включения в 2019 г. в Кадастр выбросов ПГ в США.

Таблица 1. Выбросы ПГ (CO₂, CH₄) из заброшенных нефтяных и газовых скважин

Деятельность	1990	2005	2017	2018	2019	2020	2021
1. Выбросы CO ₂ из заброшенных нефтяных и газовых скважин (тыс. тонн)							
Заброшенные нефтяные скважины	5	5	5	5	5	5	5
Заброшенные газовые скважины	2	2	3	3	3	3	3
Всего	7	7	8	8	8	8	8
2. Выбросы CH ₄ из заброшенных нефтяных и газовых скважин (тыс. тонн)							
Заброшенные нефтяные скважины	223	232	232	232	233	231	231
Заброшенные газовые скважины	51	57	63	63	64	63	63
Всего	274	289	295	296	297	295	295

Результаты и обсуждения. Все полномочия по контролю за ликвидацией заброшенных скважин имеет Росприроднадзор. Его специалисты в 2022 году провели работы по инвентаризации ликвидированных и законсервированных буровых скважин. Установлено точное местоположение 17014 объектов, проведено 7258 обследований, во время которых осмотрено 4027 буровых скважин. Состояние 366 объектов оценено как экологически опасное. При этом 151 опасная скважина находится в границах населённых пунктов, 17 – вблизи водных объектов, 78 – на землях сельскохозяйственного значения, 61 – на территории лесного фонда. Установлено, что 1537 скважин законсервированы или ликвидированы с нарушениями. Состояние 2124 объектов оценено как удовлетворительное.

Апробация методов локализации и зонирования воздействия опасных процессов была рассмотрена на примере Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения, расположенного в Пуровском районе ЯНАО, в центре Надым-Пур-Тазовской нефтегазоносной области между 65 и 68 параллелями северной широты. Оно введено в эксплуатацию в 1978 году. Здесь в 2021 году выполнено обследование фонда скважин силами филиала «СВЧ» ООО «Газпром газобезопасность» в рамках основного договора с ПАО «Газпром». В результате было установлено наличие следующих категорий скважин: эксплуатационных – 8 482 ед.; наблюдательных – 720 ед.; поглощающих – 84 ед.; законсервированных – 571 ед.; ожидающих ликвидации – 213 ед.; ликвидированных – 170 ед.

Для локализации и контроля воздействия опасных процессов на объекте используются: геодинамической, геокриологической и экологической мониторинг. В рамках данной работы были рассмотрены методы локализации и зонирования участков месторождений, вызванных

В ходе апробации методов геодинамического мониторинга в работе рассмотрено три метода локализации зон деформации горных пород, основанные на использовании:

- геодезических измерений положения постоянно действующих базовых станций (ПДБС) посредством глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС);
- методов радиолокационной интерферометрии (РЛИ);
- линеamentного анализа зон геодинамической активности.

В качестве опорных данных была использована карта «Сопоставление новейшей тектоники с элементами глубинного строения земной коры», (рис. 1. схема 1-1. Тектоника). На

ней красным квадратом выделена территория Уренгойского месторождения, где были расположены пункты ПДБС, используемые при оценке динамики литосферных плит. По результатам измерений на ПДБС (рис. 1, схема 1-2) проведена оценка остаточных скоростей их движения относительно неподвижной Евразийской литосферной плиты, определяемой пунктами IGS (Международной геодезической сети) (рис. 1. схема 1-3). Остаточные скорости здесь имеют юго-западное направление и, в основном, не превосходят по величине 1 мм/год, что свидетельствует о несущественных горизонтальных смещениях территории размещения ПДБС относительно литосферной плиты.

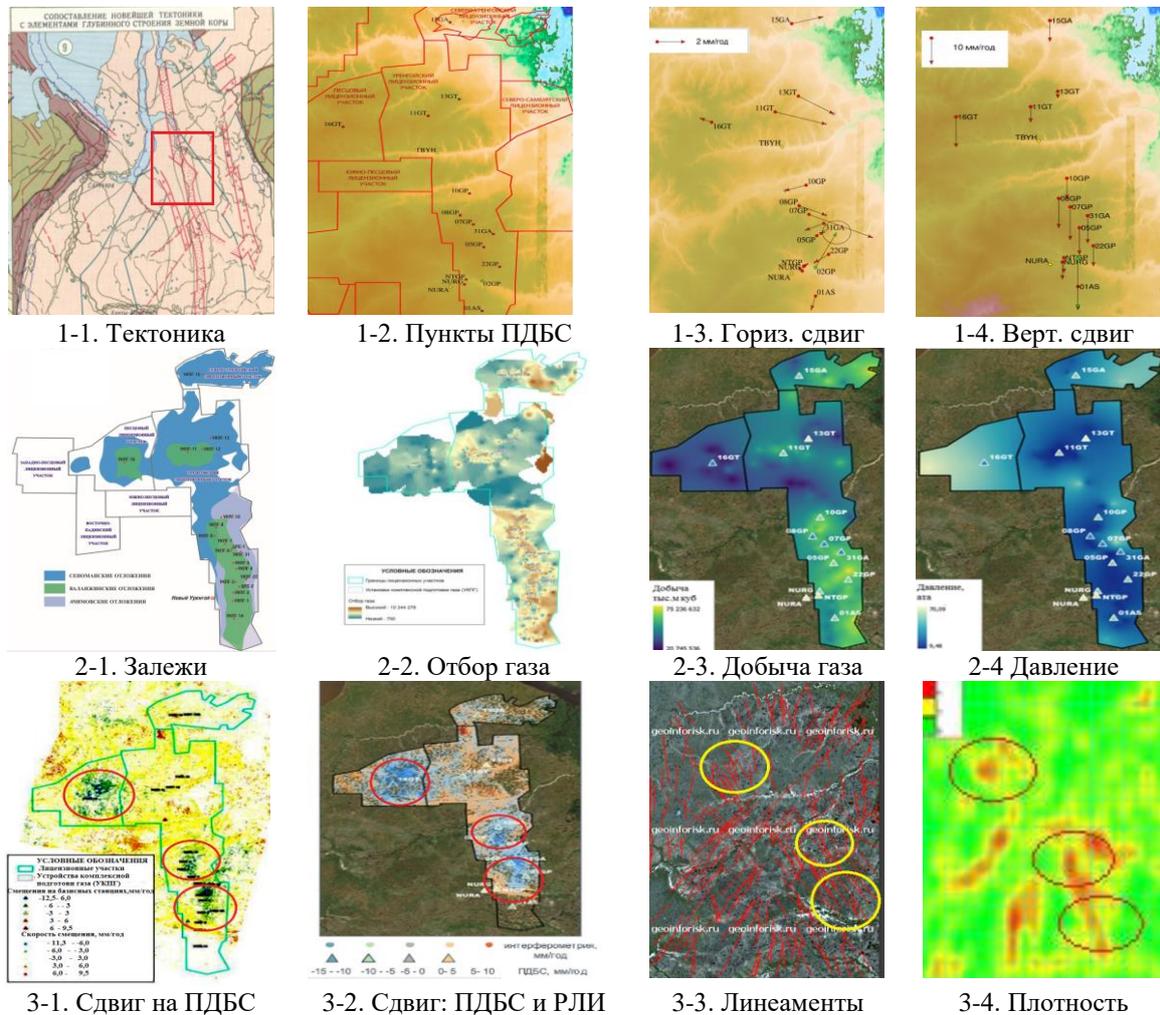


Рис. 1. Геодинамические методы локализации опасных процессов на месторождении

Наряду с этим, вертикальный сдвиг ПДБС относительно ближайших пунктов сети IGS выявил существенное систематическое опускание точек земной поверхности со скоростями преимущественно 7–13 мм/год (рис. 1 схема 1–4). Наличие таких скоростей смещений на станциях ПДБС существенно отличается от данных, полученных между пунктами IGS, что позволяет предположить, что наблюдаемое опускание происходит в верхних слоях осадочного чехла и обусловлено местной хозяйственной деятельностью, то есть носит техногенный характер [3].

Для локализации участков техногенной деформации горных пород были использованы технологические параметры разработки и эксплуатации месторождений. 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 самостоятельные месторождения: Уренгойское, Ен-

Яхинское, Северо-Уренгойское и Песцовое. Они относятся к валанжинским отложениям, 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. Эксплуатация сеноманских, валанжинских и ачимовских залежей осуществляется с 1978, 1985 и 2008 годов, соответственно. Наличие технологических параметров данных залежей позволило выполнить их пространственную локализацию на картосхемах и фотосхемах, показанных на рисунке 1: схема 2-1 – границы лицензионных участков и положение залежей; схема 2-2 – объемы отбора газа; фотосхема 2-3 – объемы добычи газа; фотосхема 2-4, значения пластового давления в залежи [4].

Данные картосхемы отображают уровни техногенного воздействия, имеющие место в ходе эксплуатации залежей, а также их индикаторы на «дневной» поверхности. В качестве таких индикаторов на рисунке 1 представлены: вертикальный сдвиг и скорость изменения превышений точек на ПДБС, полученные методами геодезических измерений – схема 3-1; вертикальный сдвиг и скорость изменения превышений точек на ПДБС (опорные данные) и эти же параметры, измеренные на площади месторождений методами радиолокационной интерферометрии – фотосхема 3-2; положение линеаментов (разломов) на участках месторождений, определенное по материалам ДЗЗ – фотосхема 3-3; зоны геодинамической активности (плотность линеаментов) – схема 3-4.

Проведенный анализ подтверждает взаимосвязь между параметрами эксплуатации месторождений и динамикой вариаций точек на дневной поверхности, определенной по результатам геодезических измерений на опорных точках ПДБС (схема 3-1).

Другой важный вывод следует из высокого уровня корреляции результатов определения скорости изменения вертикального сдвига по результатам измерений на опорных точках методами геодезии и радиолокационной интерферометрии (схема 3-2). Это позволяет существенно увеличить плотность наблюдаемых точек методами космической радиолокационной интерферометрии и повысить точность локализации участков с опасным уровнем деформации горных пород при эксплуатации залежей.

Исследования, проведенные на кафедре геоэкологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в рамках данной работы, были направлены на оценку возможности локализации зон активной геодинамики посредством линеаментного анализа [5]. Результаты выделения таких зон, представленные на фотосхеме 3-3 и схеме 3-4, показали высокую степень их корреляции, с участками на схеме 3-1 и фотосхеме 3-2. Это позволяет рассматривать возможность использовать данный метод в задачах локализации границ участков повышенной геодинамики на месторождениях.

Наряду с эндогенными факторами на изменение высот земной поверхности оказывают и экзогенные источники. Увеличение среднегодовой температуры в приземном слое тропосферы, зарегистрированное на севере Западной Сибири [6], приводит к протаиванию многолетних мерзлых грунтов (ММГ) и вариациям рельефа земной поверхности. Индикатором их состояния служит мощность сезонно-талого слоя (СТС), измерения которой проводят с 1990 года по стандартной методике в рамках Международной программы мониторинга CALM (Circum Polar Active-Layer Monitoring). В ее реализации участвуют несколько десятков стран, в том числе и Россия. В настоящее время на территории криолитозоны РФ, действующими является около 58 площадок. В 2022 году данные о толщине СТС поступили с 41 площадки, в число которых входили 2 площадки, расположенные в Новом Уренгое (Таблица 2, R50A, R50B). Карта тренда мощности 15-летнего периода наблюдений СТС (2008–2022 г.), представлена на рис. 2.

Таблица 2. Мощность СТС (см), средние значения (СР, см) и тренды (см/10 лет) за период с начала наблюдений по 2021 г. (TP1) на площадках CALM

Год	200	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	202	202	202	С	TP1	
Код	Западная Сибирь (Новый Уренгой)																
R50	84	65	77	72	87	70	76	85	74	69	11	10	120	114	120	86	31
R50	84	65	80	82	95	92	84	93	96	93	10	10		107	112	90	24



Рис. 2. Тренд мощности СТС (2007–2021 гг.)

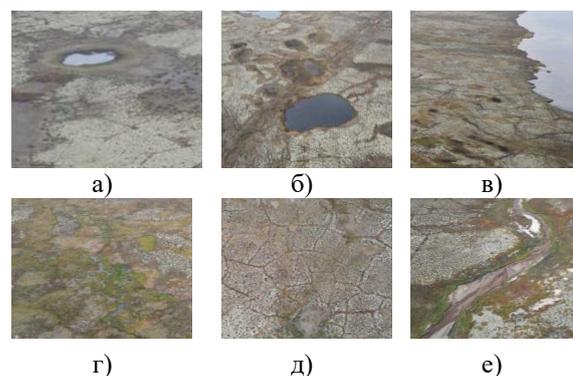


Рис. 3. Индикаторы экзогенных процессов

В ходе проведения работ по локальному экологическому мониторингу было установлено наличие активных экзогенных процессов (рис.3) [7], где представлены примеры индикаторов изображений этих процессов и площади, которые они занимают на Уренгойском лицензионном участке): а) термокарст, $S_a = 498,3$ га; б) термоэрозия, $S_b = 8,8$ га; в) термоабразия, $S = 5,5$ га; г) пучение грунтов, $S = 94,5$ га; д) морозобойное растрескивание, $S = 4385,7$ га; е) дефляция $S = 339,7$ га.

Анализ представленных результатов исследований показал, что практически все отмеченные экзогенные геологические процессы на территории имеют природный генезис, которые в ходе эксплуатации залежей подвергаются дополнительному техногенному воздействию. Их расположение в зоне расположения объектов требует постоянного контроля как уровня сезонного промерзания ММГ, так и изменения СТС, вызванного изменением параметров КСЗ.

Наряду с наблюдениями за геодинамическими деформационными процессами горных пород, в настоящее время в рамках локального экологического мониторинга (ЛЭМ) выполняется контроль эмиссии ПГ на действующих объектах месторождений, согласно методикам [8]. Они включают методы учета: стационарного сжигания топлива (CO_2), сжигания в факелах (CO_2 , CH_4), фугитивные выбросы, сжигание топлива в транспорте (CO_2). Здесь фугитивные выбросы включают организованные и неорганизованные выбросы CH_4 и CO_2 в атмосферу, возникающие в ходе технологических операций.

Таблица 2 Динамика выбросов ПГ в CO_2 -эквиваленте на лицензионных участках ООО «Газпром добыча Уренгой» с 2019 по 2023 гг.

№ п/п	Категория источников выбросов ПГ	Выбросы ПГ в CO_2 -эквиваленте (т)				
		2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
1	Стационарное сжигание топлива	4100847,1	372 5964,1	4545312,1	3 401 885,9	2 908 150,7
2	Сжигание в факелах	252 308,7	223257,4	247584,6	224328,8	289 866,5
3	Фугитивные выбросы	474 206,7	410 637,4	548136,9	113 6535, 4	833 732,5
4	Сжигание топлива в транспорте	-	-	-	36622,0	35 679,4
5	Итого по организации	4 827 362,5	4359858,9	5341033,6	4799372,1	4 067

Здесь основное внимание уделено расчетным методам учета выбросов ПГ от действующих технологических объектов НГК предприятия, то есть реализован подход «снизу-вверх». Он не предусматривают контроля и учета выбросов от ПГ при возникновении аварийных ЧС действующих объектов, а также ликвидированных скважин. Для решения данного класса задач целесообразно использовать методы мониторинга на основе систем ДЗЗ, где реализован подход локализации объектов «сверху вниз». Он использует переход от обобщенных показателей к частным характеристикам, от систем низкого разрешения к системам высокого разрешения (рис. 3).

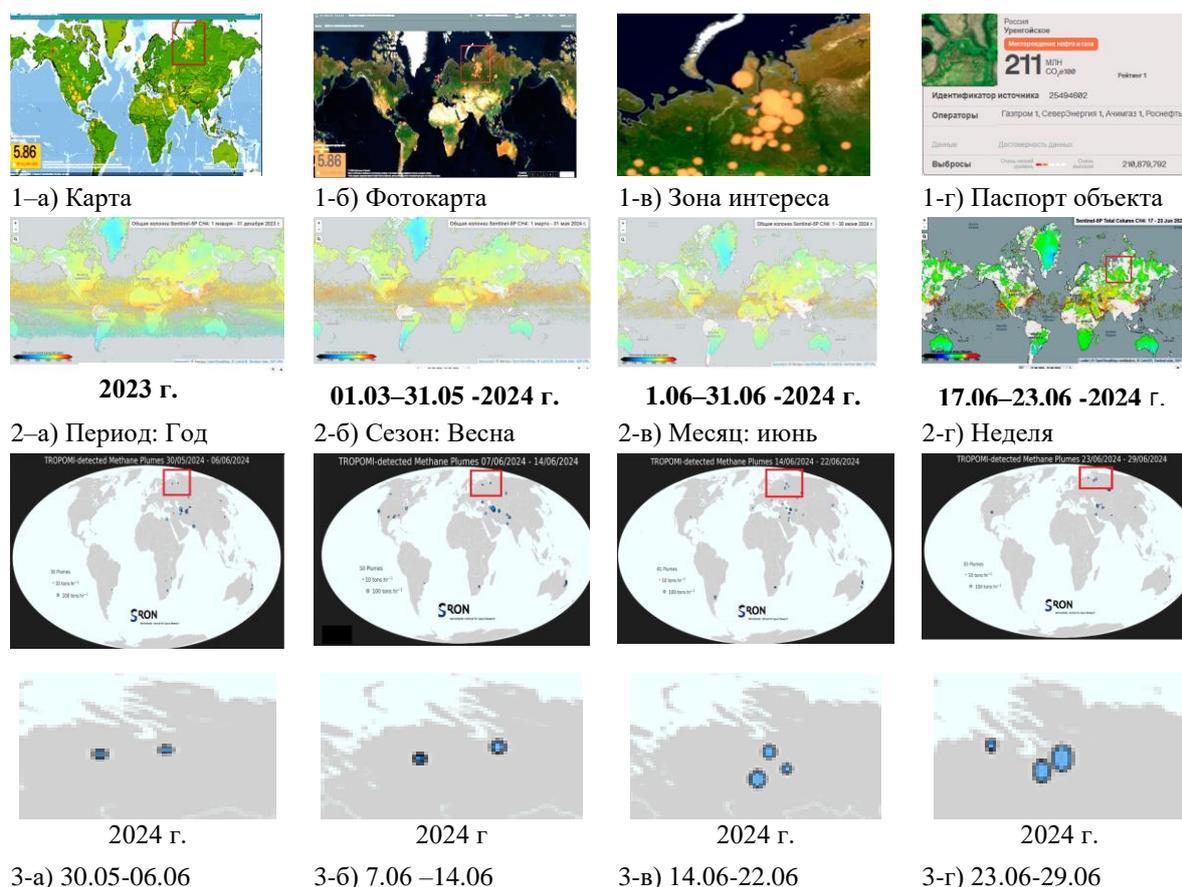


Рис. 3. Примеры локализация источников эмиссии ПГ на основе геоportалов и ДЗЗ

В ходе исследований рассмотрены три типа локализации данных об эмиссии ПГ на объектах Уренгойского месторождения на основе:

положения источников эмиссии эквивалента CO_2 – геоportал Climate Trace (США) (рис. 3.1- а, б, в, г) [9];

периода продолжительности времени эмиссии CH_4 (год, сезон, месяц, неделя) – геоportал Copernicus Sentinel-5P Mapping Portal (Европейское космическое агентство, ЕКА) (рис. 3.2 – а, б, в, г) [10];

уровня эмиссии CH_4 на источниках эмиссии ПГ – геоportал Methane Plume Maps (Нидерландский институт космических исследований, SRON) (рис.3.3 – а, б, в, г) [11].

При разработке данных геоportалов были использованы методы и технологии ДЗЗ, искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволило выделять источники эмиссии ПГ в различных сферах деятельности, включая объекты НГК. Здесь в верхнем ряду (рис. 3.3) показаны источники эмиссии CH_4 на уровне планеты, а в нижнем- участки интереса (территория Уренгойского месторождения). Маленьким синим кружком показана эмиссия более 10 т/ час, а большим кружком – превосходящем 100 т/час.

Заключение. В ходе выполнения работы было установлено, что на фоне изменения параметров КСЗ, связанное с повышением температуры приземного слоя атмосферы, усиливается воздействие опасных природных и техногенных процессов. Особо остро эта проблема возникает на объектах НГК, расположенных в КТАЗ России, где сосредоточено значительное число промыслов и магистральных трубопроводов, срок эксплуатации которых более 40–50 лет. На основе оценки текущего состояния объектов НГК было предложено для локализации источников активизации ЧС использовать методы ДЗЗ, обеспечивающие контроль геодинамических, геокриологических процессов, а также эмиссии ПГ. Были представлены результаты исследований практической апробации методов локализации опасных процессов на объектах

ООО «Газпром добыча Уренгой». Результаты апробации показали эффективность используемых методов для объектов эксплуатации, но не обеспечивают контроль за состоянием законсервированных, ликвидированных и «бесхозных» скважин. Данная ситуация может серьезно снизить уровень экологической и промышленной безопасности объектов НГК, особенно расположенных в КТАЗ РФ. Для устранения отмеченных ограничений используемых регламентов требуется выполнить инвентаризацию и паспортизацию состояния объектов НГК, выведенных из эксплуатации. На основе полученных результатов обосновать требования к регламентам мониторинга в системах управления экологической и промышленной безопасностью при разработке адаптационных стратегий развития НГК в КТАЗ РФ.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году».
2. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2021. Main Report <https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-04/US-GHG-Inventory-2023-Main-Text.pdf>.
3. Материалы технического отчета «Обработка и интерпретация спутниковых геодезических наблюдений базовых станций Уренгойского НГКМ за период 2022–2024 гг.» за II-й этап, подготовленного в соответствии с Договором № 4322227356 от 30 декабря 2022 г.
4. Материалы технического отчета «Обработка и интерпретация спутниковых геодезических наблюдений с целью выявления смещений земной поверхности и геодинамический мониторинг состояния недр в процессе эксплуатации УНГКМ», за II-й этап, подготовленного в соответствии с Договором № 34-2023-3 от 26.04.2022.
5. Аковецкий В.Г. Геофизические аспекты интерпретации дистанционных наблюдений в задачах геологических и геоэкологических исследований геодинамических процессов. Геофизика. 2019, № 6, стр. с.2–10.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва, 2023. 104 стр.
7. Материалы «Итогового отчета о результатах мониторинга состояния окружающей природной среды территории Уренгойского лицензионного участка за 2023 год. ООО «Газпром добыча Уренгой». Новый Уренгой. 2024 г.
8. Пояснительная записка к сведениям (отчету) о выбросах парниковых газов в атмосферу за 2023 год. ООО «Газпром добыча Уренгой».
9. Explore Map – Climate TRACE. <https://www.climatetrace.org/explore>.
10. Copernicus Sentinel-5P Mapping Portal. <https://maps.s5p-pal.com/ch4/week/>
11. Methane Plume Maps – SRON Earth. <https://earth.sron.nl/methane-emissions>

ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН

Блазнов А.Н., Медведев П.А., Сакошев З.Г., Фирсов В.В., Сакошев Е.Г., Савин Д.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем химико-энергетических технологий
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Бийск

blaznov74@mail.ru

Предложен подход к созданию композитов с применением растительных волокон, основанный на теории и практике создания классических «композитов». Применена теория монолитности для оценки критической длины растительных волокон и предложена классификация по их длине для ориентированных и хаотично армированных композитов. Применены методы входного контроля и получены результаты сравнительных испытаний минеральных, химических и растительных волокон. Созданы однонаправленные композиты на основе различных видов волокон и определены их физико-механические свойства

Каждый год в мире производится более 400 млн тонн пластика, значительная часть этого объема трудно перерабатывается и угрожает экологии. Пути решения этой проблемы можно разделить на две большие группы:

- 1) разработка способов утилизации и вторичной переработки отходов уже выпущенных полимеров и композитов [1];
- 2) создание новых биоразлагаемых материалов на основе растительного возобновляемого сырья [2–4].

Второй подход позволяет одновременно с решением проблемы создать цепочки ресурсо- и энергосберегающих химико-технологических процессов, обеспечивающие минимизацию отходов, что повлияет и на снижение нагрузки на окружающую среду и человека.

В работах [5–7] отмечено, что биокompозиты, армированные натуральными волокнами, получают применение в различных областях промышленности, таких как автомобилестроение, экологичная упаковка, строительство, и постепенно вытесняют синтетические полимерные материалы на коммерческих рынках.

Вместе с тем, методы исследований и подходы к конструированию и моделированию композитов из природного растительного сырья отстают от быстро развивающихся сфер применения. В настоящей работе авторы предлагают применять классические методы для исследования свойств и классические теории к растительным композитам – эти методы и подходы уже апробированы десятилетиями на практике для «классических» полимерных композитов.

Классические композиционные материалы принято разделять на три класса – с дисперсными частицами (отношение длины к диаметру $l/d \approx 1$), с непрерывными волокнами (отношение $l/d \approx \infty$) и с короткими волокнами (отношение l/d от 10 до 1000). Композиты с короткими волокнами занимают промежуточное положение между материалами с дисперсным наполнителем и с непрерывными волокнами [8, 9].

Для прогнозной оценки целесообразности использования растительных волокон в композиционных материалах можно опираться на классический подход, основанный на теории монолитности [8].

При конструировании однонаправленных композитов, растягиваемых вдоль волокон, необходимым условием использования механических свойств волокон является условие $l > l_{кр}$, то есть фактическая длина волокон должна быть не меньше критической длины $l_{кр}$.

Для оценки критической длины волокна необходимо учитывать:

– растягивающее усилие в волокне:

$$F_{\text{раст}} = \sigma_v \cdot \pi d^2 / 4; \quad (1)$$

– сдвиговое усилие на границе раздела:

$$F_{\text{сдв}} = \tau \cdot \pi d l_{кр} / 2. \quad (2)$$

Приравнявая эти два уравнения, получаем выражение для критической длины волокна:

$$l_{кр} = \frac{\sigma_B \cdot d}{2\tau}. \quad (3)$$

Из выражения (3) вытекает следующая формула для расчета $l_{кр}$ [8]:

$$l_{кр} = \frac{\sigma_B \cdot d \sqrt{3}}{2\sigma_T} \quad (4)$$

или

$$\frac{l_{кр}}{d} \approx 1,15 \frac{1 - \varphi_B^{0,5}}{\varphi_B^{0,5}} \left(\frac{E_B}{E_{сд}} \right)^{0,5} \quad (5)$$

где d – диаметр волокна; τ – напряжение сдвига на границе волокно-матрица; φ_B – содержание волокна; E_B – модуль упругости волокна; σ_B – нормальное растягивающее напряжение в волокне; σ_T и $E_{сд}$ – предел текучести и модуль сдвига матрицы соответственно.

Для расчета критической длины значения модуля упругости и прочности при растяжении технических растительных волокон льна, конопли и крапивы определяли экспериментально, с помощью нагружения одиночных выделенных волокон на приборе ТМА-60. Средние значения модуля Юнга составили: для крапивы – 12,6 ГПа, для конопли – 24,4 ГПа, для льна – 44,2 ГПа. Средние значения прочности одиночного волокна на растяжение составили: для крапивы – 306 МПа, для конопли – 366 МПа, для льна – 486 МПа.

В качестве связующего для примера расчета примем наиболее распространенное эпоксидное связующее с известными свойствами: $E_{сд}=1,2$ ГПа, $G_T = 37$ МПа. Подставив значение для волокон и связующего при содержании волокна $\varphi_B=0,5$, получим $l_{кр}$ при среднем диаметре лубяных волокон 24 мкм, по выражениям (4) и (5), соответственно, для волокон крапивы 172 мкм и 31 мкм, для волокон конопли 205 мкм и 51 мкм, для волокон льна 273 и 69 мкм.

Чем ниже модуль упругости и прочность волокна, следовательно, свойства волокон приближаются к свойствам матрицы, тем меньше расчетное значение $l_{кр}$. Это означает, что для удержания таких волокон в матрице за счет сдвиговых сил адгезии на границе раздела волокно-матрица нужна меньшая длина у растительных, и большая – у высокопрочных волокон, таких как стеклянные и углеродные. Например, для стеклянных волокон в эпоксидной матрице значение $l_{кр}=500$ мкм. На практике рекомендуется длина волокна $l \geq 100 \cdot l_{кр}$ [8].

Аналогично классическим композиционным материалам, предложена классификация по длине растительных волокон [10]:

- длинные – технические лубяные волокна льна, конопли, крапивы, их длина всегда ограничена высотой растения и составляет от 400 до 1500 мм. Эти волокна можно использовать для ориентированных композитов;

- средние – травяные волокна, такие как солома злаковых, мискантус, отходы производства лубяных волокон – костра льна, конопли, крапивы имеют всегда меньшую длину, чем лубяные. Например, длина исходных измельченных частей мискантуса от 20 до 60 мм, длина волокон после варки – до 20 мм. Длина волокон костры льна перед обработкой составляет до 15 мм. Хотя длина таких волокон превышает критическую длину, рассчитанную теоретически, придать ориентацию им при формировании композитов довольно проблематично. Поэтому целесообразно формировать из таких «средних» волокон хаотично армированные композиты.

- короткие – семенные волокна плодовых оболочек овса, гречки, подсолнечника. Их длина в исходном состоянии от 7 до 10 мм при ширине от 1,0 до 1,5 мм, после варки длина не более 5 мм, ширина – до 1 мм. Здесь практические выводы и теоретические расчеты совпадают – длина волокон меньше критической и формирование ориентированных композитов не рационально с точки зрения расчетов и невозможно с точки зрения технологии. Примером могут быть также хаотично армированные наполненные композиционные материалы.

Входной контроль волокон является важной задачей при проектировании композиционного материала. С этой целью были проведены сравнительные испытания волокон различной природы (минеральных, углеродных, химических и растительных) в одинаковых условиях.

К основным параметрам входного контроля ровингов относятся следующие: диаметр элементарного волокна (мкм), линейная плотность (текс), разрывная нагрузка ровинга (Н),

разрывная нагрузка микропластика (H) и коэффициент усиления. Определение этих характеристик проводили общепринятыми методами для минеральных и химических волокон, применив эти методы также для растительных лубяных волокон [11]. Результаты сравнительных испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнительных испытаний минеральных, химических и растительных волокон

Марка Ровинга	Линейная плотность, текс (г/км)	Разрывная нагрузка ровинга, Р, Н	Удельная разрывная нагрузка P_0 ровинга, мН/текс	Разрывная нагрузка микропластика, Р, Н	Удельная разрывная нагрузка P_0 микропластика, мН/текс	Коэффициент усиления $K_u = P_0$ (мпл)/ P_0 (ров)
Стеклоровинг ЕС17-1200-350	1200	317	264	675,8	563	2,16
Базальтовый ровинг ВСF17-2520-КВ12	2520	607	241	1271	504	2,12
Углеродная нить УКН-П/5000	378	226	597	505,4	1337	2,25
Вискозная нить (ВН)	182	17	92	9	48	0,55
Полиакрилонитрильная нить (ПАН)	826	233	282	181	219	0,78
Поликапроамидная нить (ПКАН)	183	59	323,7	59,27	323	0,91
Лубяные волокна конопли	447	46	102,04	93	158,92	1,60
Лубяные волокна льна	607	52	93	206	317,69	4,39
Лубяные волокна крапивы	636	24	39	8	67,56	0,64

По данным таблицы 1, минеральные волокна имеют наибольшую линейную плотность 1200–2500 текс, удельная разрывная нагрузка для стеклоровингов и базальтовых ровингов сопоставима 240–280 мН/текс, коэффициент усиления около 2. Наибольшую удельную прочность имеет углеродная нить 597 мН/текс при линейной плотности 378 текс, коэффициент усиления 2,25.

Химические волокна имеют низкую линейную плотность – 183 текс (кроме ПАН – 826 текс), наиболее низкая удельная разрывная нагрузка у вискозных волокон 92 мН/текс, у полиакрилонитрильных и поликапроамидных волокон удельная нагрузка на уровне стеклянных и базальтовых – 282–323 мН/текс, но коэффициент усиления у всех 0,5–0,9.

Лубяные растительные волокна имеют линейную плотность 440–630 текс, наиболее высокая разрывная нагрузка у волокон льна и конопли 93–102 мН/текс, превышает вискозную нить, коэффициент усиления 1,6 у конопли и 4,39 у льна. У волокон крапивы результаты более низкие среди растительных волокон.

Диаметр волокна и морфологию в продольном и поперечном направлении исследовали с помощью электронного микроскопа. Для исследований поперечного сечения волокон их предварительно поместили в эпоксидное связующее в форе лопаток, после отверждения разрушили в жидком азоте с помощью поперечного изгиба. Полученные микрофотографии для примера приведены на рисунках 1 и 2 для лубяных волокон конопли (пеньки).

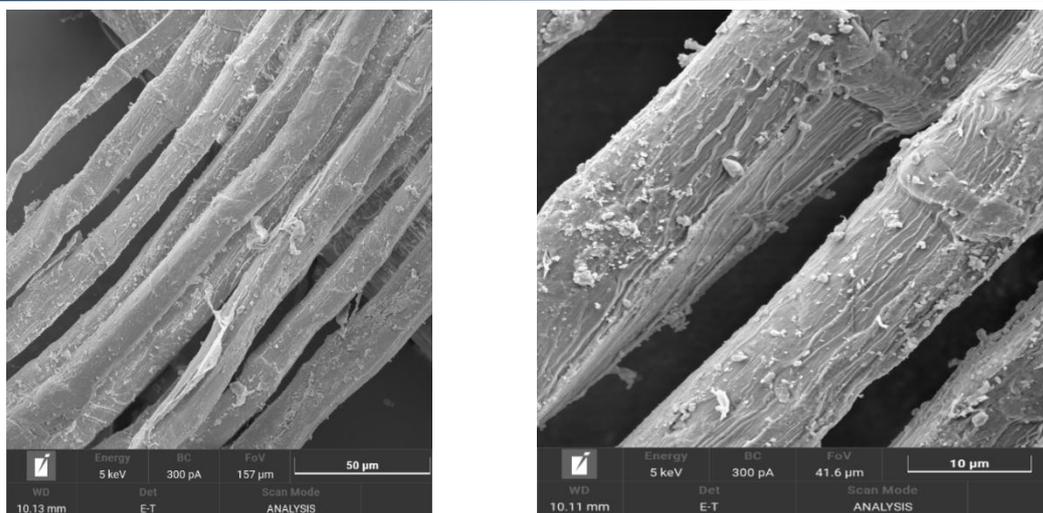


Рис. 1. Фотографии выделенных лубяных волокон технической конопли под электронным микроскопом при различном увеличении

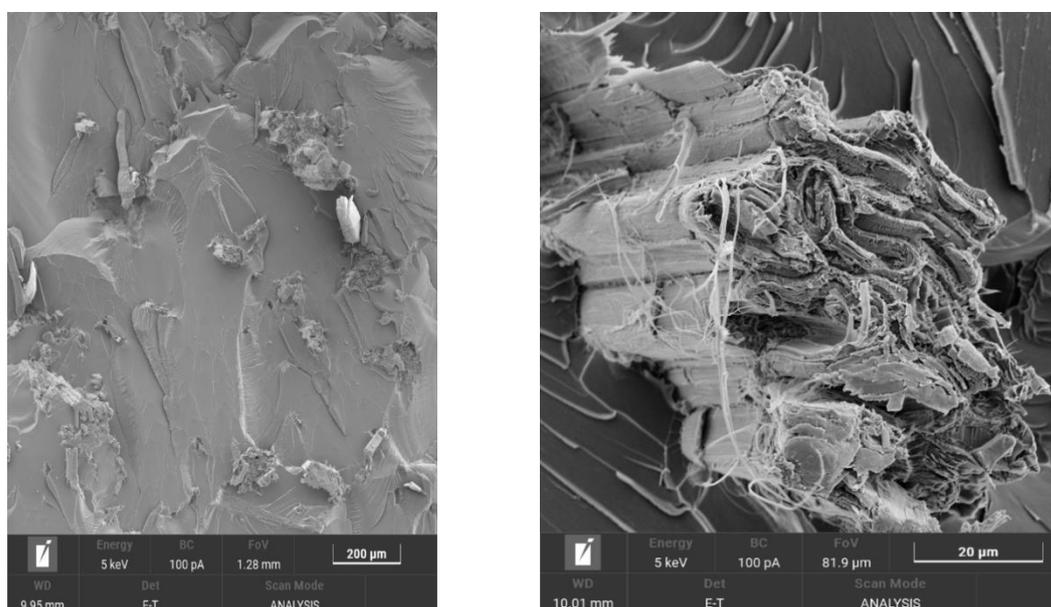


Рис. 2. Фотографии места разрушения в поперечном направлении волокон конопли в эпоксидном связующем при различном увеличении

На фотографиях вдоль волокон (рис. 1) видно, что растительные волокна имеют непостоянное сечение по длине волокна. Видны остатки лигноцеллюлозной матрицы, которые создают дополнительную шероховатость и благоприятно сказываются на сцеплении волокна с матрицей за счет увеличения мехфазной поверхности. В поперечном сечении (рис. 2) растительные волокна имеют некруглую форму, слоистое фибриллярное строение и воздушные полости. Это характерно для всех исследованных растительных волокон. В работе [12] приведены микрофотографии минеральных, углеродных, химических волокон в сравнении с растительными. Показано, что базальтовые и стеклянные волокна имеют круглое постоянное сечение, а вискозные – некруглое и имеют развитую поверхность. Разрушение химических волокон в матрице происходит с вытягиванием волокон и пластической деформацией, разрушение минеральных – хрупкое.

На основе выбранных и исследованных волокон различной природы были изготовлены образцы однонаправленных композитов и определены их физико-механические свойства [13].

Исследования выполнены в рамках госзадания (код научной темы FUFЕ-2024-0008, № госрегистрации темы 124021200031-4) при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск)

Литература

1. Krauklis, A.E.; Karl, C.W.; Gagani, A.I.; Jørgensen, J.K. Composite Material Recycling Technology–State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. // *J. Compos. Sci.* 2021, 5, 28. <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>.
2. Peças P., Carvalho H., Salman H., Leite M. Natural fibre composites and their applications: a review // *Journal of composites science.* 2018, 2, 66/ doi:10.3390/jsc2040066.
3. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ.* 2015. № 2. С.50–55.
4. Чашилов Д.В., Атясова Е.В., Блазнов А.Н. Растительные волокна и применение полимерных композиционных материалов на их основе. Обзор // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2021. № 12. С. 18–27.
5. Bijlwan P.P., Prasad L., Sharma A. Recent advancement in the fabrication and characterization of natural fiber reinforced composite: A review // *Materials Today: Proceedings.* 2021. Vol. 44, Part 1. P. 1718–1722. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.878>.
6. Birniwa A.H.; Abdullahi S.S.; Ali M.; Mohammad R.E.A.; Jagaba A.H.; Amran M.; Avudaiappan S.; Maureira-Carsalade N.; Flores E.I.S. Recent Trends in Treatment and Fabrication of Plant-Based Fiber-Reinforced Epoxy Composite: A Review // *Journal of Composites Science.* – 2023, 7, 120. <https://doi.org/10.3390/jcs7030120>
7. Priyadarsini M, Biswal T, Acharya S.K. Study of mechanical properties of reinforced polypropylene (PP)/nettle fibers biocomposites and its application in automobile industry // *Materials Today: Proceedings.* 2023. Vol. 74, Part 4. P. 980–984. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.349>.
8. Панова Л.Г. Наполнители для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 68 с.
9. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. – М.: Химия, 1981. 232 с.
10. Блазнов А.Н., Медведев П.А., Головина Е.А., Фирсов В.В. [и др.] Выбор растительных волокон для композиционных материалов // *Южно-Сибирский научный вестник.* 2022. № 6 (46). С. 268–274.
11. Медведев П.А., Блазнов А.Н., Черемухина И.В., Сакошев З.Г. [и др.] Исследование свойств минеральных, химических и растительных волокон // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2023. № 5. С. 35–39.
12. Sakoshev Z.G., Blaznov A.N., Bychin N.V., Medvedev P. A., Zadvornyykh G.S., Sakoshev E.G., Firsov V.V., Cheremukhina I.V. Morphological and physico-mechanical characterization of synthetic and natural fibers // *Journal of Polymer Research,* 31, 86 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10965-024-03938-0>.
13. Медведев П.А., Блазнов А.Н., Задворных Г.С., Сакошев Е.Г., Сакошев З.Г., Фирсов В.В. Изготовление и исследование свойств композиционных материалов на основе волокон различной природы // *Труды XX Международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение»: сборник статей / под ред. В. Б. Маркина; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2023. – С. 148–155; ил. – URL : https://journal.altstu.ru/konf_2023/2023_1/124/ – Текст : электронный. ISBN 978-5-7568-1468-2. DOI 10.25712/8949-8898-1821.*

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПКМ В ОБОРУДОВАНИИ ДЛЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РФ

Ермаков Б.С.¹, Швецов О.В.¹, Голиков Н.И.², Карпов И.Д.¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

ermakov55@bk.ru

Выполнена оценка надежности и работоспособности наиболее широко распространенных в строительной отрасли полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях эксплуатации изделий из ПКМ при обустройстве месторождений нефти и газа в Арктическом регионе страны. Приведены результаты исследований влияния на свойства и структуру ПКМ таких факторов как низкие температуры, влажность, соляной туман, циклические перемены температуры через ноль и соляной туман. Проведен анализ влияния защитных покрытий на повышение работоспособности изделий из ПКМ. 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).

Особенностью развития нефте- и газодобычи на современном этапе заключается в постепенной миграции основных добывающих мощностей в наиболее удаленные северные регионы РФ. Отсутствие транспортных путей доставки грузов на новые участки добычи, крайне низкие температуры в зимние месяцы и высокий уровень кислотности заторфованных почв требует пересмотра проектных решений и выбора используемых для таких месторождений материалов. К таким материалам предъявляется ряд весьма жестких требований – это срок службы, который должен достигать 30 и более лет, высокая надежность и работоспособность при экстремально низких температурах, ремонтпригодность, высокая коррозионная стойкость в условиях добычи коррозионно-агрессивного нефтяного флюида и агрессивного воздействия внешних сред, минимизация массы доставляемых сборочных единиц. Одним из наиболее перспективных путей обустройства новых месторождений в северных регионах страны является постепенная замена традиционных металлических материалов на перспективные полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе стекло- и базальтопластов. Эти материалы уже находят применение в строительстве зданий и сооружений, расположенных в средней полосе и юге страны, где применяются в качестве балок, мачт, ферм, арматуры, свай и других элементов фундаментов и несущих конструкций. Однако, общепринятой практикой обоснования сроков безопасной эксплуатации различных групп материалов для северных широт является метод климатической квалификации, состоящий в комплексном исследовании материалов в лабораторных условиях и на полигонах, расположенных в тех климатических зонах, где планируется их эксплуатация. Такие исследования должны включать в себя анализ механических свойств, внешних, климатических воздействий – влаги, низких и повышенных температур, коррозионно-агрессивных сред и т. п. В случае использования труб из ПКМ в качестве промысловых трубопроводов должны быть исследования влияния на свойства ПКМ агрессивных воздействий добываемых сред.

В качестве материалов для исследования были выбраны образцы из широко распространенных полимерных композитных материалов на основе стеклоткани, изготовленных методом RTM-формования и намотки, обеспечивающие наивысшее качество получаемых изделий. В настоящей работе приведены результаты лабораторных исследований стабильности структуры и свойств образцов после испытаний в диапазоне температур 20 – минус 60 °С. Были испытаны статические механические свойства образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 56785-2015 и ударной вязкости по Шарпи (ГОСТ 4647-2015) как в состоянии поставки, так и после ряда климатических воздействий – старения при температурах минус 60 °С ими-

тирующего длительное температурное воздействие на материал холодного климата; нахождения в воде, термоциклирования, которое заключалось в воздействии быстроменяющихся максимального и минимального значения температуры (20 – минус 60 °С) имитирующих «ночные» и «дневные» температурные воздействия внешней среды (переходы через 0 °С в весенний и осенний периоды), влияние морского климата было смоделировано испытаниями образцов после воздействия соляного тумана. Воздействие климатических факторов на образцы осуществлялось как в исходном состоянии – без защитных покрытий и после нанесения на рабочие части образцов водоотталкивающего лака.

В табл. 1 приведены данные о механических свойствах образцов ПКМ в диапазоне температур от 20 до минус 60 °С в исходном состоянии и после длительного (1000 час) пребывания в камере холода при температуре минус 60 °С. Представленные в таблице результаты являются средними значениями от результатов испытаний серии из пяти образцов. Отклонение результатов испытаний внутри одной серии не превышало 8–10%.

Таблица 1. Механические свойства образцов ПКМ без защитного покрытия в состоянии поставки после длительного вымораживания

Время выдержки, час	Температура испытания Т, °С	Способ производства					
		RTM-формования			намотка		
		БВ	δ	KCV	БВ	δ	KCV
		МПа	%	Дж/см ²	МПа	%	Дж/см ²
0	20	139	8,0	12,3	131	7,4	10,6
	-60	172	8,8	11,4	169	7,7	8,9
1000	20	131	7,4	11,7	121	6,6	9,7
	-60	160	7,6	10,7	149	7,1	8,0

Как видно, механическая прочность образцов без защитного покрытия ПКМ обоих способов формования растет при понижении температуры, а длительная выдержка в камере холода приводит к некоторому снижению их прочностных характеристик и ударной вязкости. Так, отношение предела прочности стеклопластика RTM-формования после 1000 часов холодного старения и в исходном состоянии составили 0,94 при нормальной температуре и 0,93 при минус 60 °С; после намотки – 0,92 и 0,88 соответственно, что подтверждает данные других авторов, в том числе [9]. Механические свойства образцов с нанесенным защитным покрытием оказались практически идентичными. Дальнейшее увеличение времени нахождения образцов ПКМ в камере холода (2–5 тыс. час) и построение кривых деградации механических свойств показало, что на базе 100 тыс. час падение прочности и ударной вязкости ПКМ составит около 20–25%. То есть длительное нахождение исследуемых ПКМ в зоне низких температур не критически сказывается на их прочностных свойствах, достаточно легко прогнозируется и, может быть, с высокой степенью достоверности учтено при проведении прочностных расчетах и проектировании конструкций, эксплуатация которых планируется в условиях Северных регионов РФ.

Анализ изломов всех образцов ПКМ, вне зависимости от вида изготовления и нагружения подтвердил единство механизма разрушения и позволил уточнить, что поверхности разрушения образцов отличаются глубоко проработанным рельефом с четко очерченными участками зарождения и развития трещины и жгутами нитей стеклоткани с нарушенной упорядоченностью, присущей исходной ткани, и пустотами между жгутами нитей, что связано с выкрашиванием смолы при движении трещины. Поверхность нитей покрыта слоем мелкодисперсных частиц смолы с хорошей адгезией к поверхности и значительным количеством мелких осколков стекла.

Известно, что все ПКМ в той или иной степени склонны к водопоглощению при нахождении во влажных средах, поэтому были проведены испытания образцов после длительного (1000 час, 20 °С) нахождения в воде. При этом прирост массы образца (объем поглощенной жидкости) составил 0,174% для RTM образцов и 0,197% для образцов, вырезанных из труб, полученных методом намотки. Так как процесс водопоглощения связан с летними месяцами эксплуатации в работе были проведены исследования влияния тепловлажностного воздей-

ствия и воздействия морского соленого воздуха на свойства ПКМ. Показано, что при насыщении всех образцов влагой происходит постепенная деградация всех механических свойств, в первую очередь при испытаниях в области отрицательных температур. Было определено, что насыщение образцов влагой неравномерно и наибольшему воздействию подвергаются их контактные с внешней средой поверхности. Фрактографический анализ наружных поверхностей образцов до испытаний и изломов образцов, разрушенных при температуре минус 60 °С показал, что в поверхностных слоях таких образцов вокруг нитей стеклопластика возникают микрообъемы воды, которые при понижении температуры кристаллизуются в мелкие кластеры льда. Образование ледяных кластеров приводит к появлению внутренних напряжений в матрице ПКМ, отслоению полимерной составляющей от нитей стеклоткани, при увеличении объема поглощенной воды происходит разрушение полимерной матрицы с разрывом стеклянных нитей и образование в поверхностном слое пор округлой формы.

В первую очередь насыщение образцов влагой проявляется в условиях термоциклического воздействия на материал – после многократных изменений температуры в область положительных и отрицательных значений – при образовании на поверхности материалов слоя льда – инея, образующегося в ночные часы и росы – капель воды, возникающих на поверхности оборудования при таянии ледовой корки. Число циклов перехода через ноль зависит от климатической зоны и в условиях Арктического и Субарктического климатических поясов может достигать 50 и более. Так, например, в Якутске число годовых переходов через ноль достигает 54 [1]. Результаты испытаний механических свойств образцов после водопоглощения и воздействия соляного тумана приведены в табл. 2. Для испытаний были использованы образцы, вырезанные из заранее изготовленных пластин после РТМ-формования и трубной заготовки, изготовленной намоткой. Поверхности образцов после механического воздействия не были защищены. Это позволило имитировать условия монтажа оборудования из ПКМ, когда при сборке конструкций используются обрезка заготовок «в размер», подгонка, сверление и другие вычитающие механические операции.

Анализ табл. 2 показывает, что природные факторы могут значимо влиять на механические свойства полимерных материалов, незащищенных влагоотталкивающими покрытиями. Однако воздействие этих факторов неравнозначно. Если после насыщения поверхности образцов влагой прочность ПКМ снижалась на 4–5%, то после 250-кратного термоциклического воздействия уже ~ 20%, а после пребывания в среде соляного тумана в течение 720 часов примерно на четверть.

Также были проведены подобные испытания образцов после покрытия зон резов влагоотталкивающим лаком. Наличие защитного покрытия позволило значительно ослабить воздействие климатических факторов, однако полностью устранить их влияние не удалось. Так предел прочности образцов двух технологий производства ПКМ после термоциклического воздействия снизился на 4–6%, после соляного тумана =- в первые 100 часов испытаний – на 5–7% и на 6–9% после 720 часов выдержки.

Таблица 2. Влияние влажностного воздействия на механические свойства ПКМ

Время в среде час			Темпера- тура испы- тания °С	Способ производства					
				РТМ-формования			намотка		
вода	Соль	циклы		Б _В , МПа	δ, %	КСВ, Дж/см ²	Б _В , МПа	δ, %	КСВ, Дж/см ²
0	0	0	20	139	8,0	12,3	131	7,4	10,6
			-60	172	8,8	11,4	169	7,7	8,9
2160	0	0	20	134	7,7	11,5	127	7,0	9,9
			-60	166	7,9	10,8	154	6,7	7,3
0	720	0	20	107	6,0	10,1	100	5,3	5,1
			-60	136	5,1	8,9	131	4,8	4,5
2160	720	0	20	101	5,3	9,1	98	4,2	4,0
			-60	127	4,4	7,1	121	3,9	3,6
0	0	250	20	119	6,2	9,9	118	6,2	9,8
			-60	153	6,0	9,7	151	6,0	9,6
2160	0	250	20	116	5,7	8,6	114	5,7	9,6
			-60	150	5,0	7,9	149	5,5	9,4

На основании проведенных исследований была показана принципиальная возможность использования полимерных композиционных материалов при производстве и эксплуатации различных групп изделий для обустройства нефтегазовых месторождений, расположенных в Арктическом и Субарктическом климатических поясах. Установлено, что длительное пребывание этих материалов в условиях низких климатических температур в зимний период и насыщение образцов влагой в теплое время года незначительно изменяют механические свойства ПКМ, и достаточно надежно прогнозируются при проектировании и прочностных расчетах конструкций, эксплуатация которых планируется в условиях экстремально низких температур. Воздействие переходов через ноль и морского воздуха могут привести к снижению механических свойств ПКМ при их длительной эксплуатации и должны быть нейтрализованы путем повышения качества поверхности изделий и дополнительной обработкой влагоотталкивающими составами.

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)

Литература

1. Старцев О.В. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата / Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. // Известия АлтГУ. Физика, 2020, 3 (111). С.41–49.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-33-36

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ, ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Лебедев М.П., Сидоров М.М.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

n.i.golikov@mail.ru

На территории Якутии, которая относится к очень холодному и арктическому климатическим районам, проводятся натурные испытания материалов, элементов конструкций и изделий. Это связано с зависимостью физико-механических характеристик материалов от климатических факторов. Исследования проводятся с 1970-х годов в институтах ИФТПС СО РАН и ИПНГ СО РАН, и за это время были разработаны оригинальные методики и получены обширные данные по изменениям свойств материалов. В настоящее время испытания проводятся на полигоне в экспериментальной площадке ИФТПС СО РАН, где помимо материалов и элементов конструкций, также проводятся климатические натурные испытания сварочного оборудования и сварочных материалов отечественного производства в естественных условиях Якутии.

По климатическому районированию территория Якутии согласно ГОСТ 16350-80 относится к очень холодному району, с представительными пунктами: г. Якутск и с. Оймякон; а также к арктическому восточному с представительным пунктом – п. Тикси. Практически вся территория республики находится в пределах арктического и субарктического климатических поясов, а также характерна наличием многолетнемерзлых пород. Якутия самый холодный из обжитых регионов планеты. Температура воздуха здесь понижается ниже минус 60 °С, и отличается продолжительным зимним и коротким летним периодами. По результатам многолетних наблюдений среднегодовая температура в этих районах ниже минус 10 °С. Годовой размах колебаний температуры воздуха достигает около 100 °С, а суточный около 35 °С.

Широкое применение современных материалов в различных изделиях, в том числе ответственного назначения сдерживается зависимостью их ряда физико-механических характеристик от климатических факторов окружающей среды. Перед разработчиками материалов ставится задача обеспечения не только высоких значений исходных характеристик материалов, входящих в конструкционные узлы, но и сохранение их свойств в течение длительной эксплуатации изделий в различных климатических условиях. Таким образом, климатические испытания способствуют созданию надежных материалов и изделий.

Начиная с 1970-ых годов в институтах ИФТПС СО РАН и ИПНГ СО РАН ведется систематическое изучение устойчивости различных классов полимерных и композиционных материалов в условиях воздействия климатических факторов Якутии. Проводились натурные испытания труб, сосудов давления, техники специального назначения [1–3]. В результате многолетних исследований разработаны оригинальные методики и получены обширные фактические данные по изменениям деформационно-прочностных и специальных свойств материалов. Выявлены основные физико-химические процессы старения полимерных и композиционных материалов в условиях Севера. Создан банк данных, государственных и отраслевых стандартов и рекомендаций по оценке стойкости, прогнозированию сроков сохраняемости и применению материалов и конструкций в условиях Севера. Испытания позволяли определять наименее надежные узлы техники и элемента конструкции, и выдать рекомендации для заводов изготовителей продукции – определение предельного состояния, обоснование продления ресурса, разработка технологии сварки, оценка допустимых дефектов сварки и др.

В настоящее время испытания материалов и элементов конструкций проводятся на полигоне, расположенном в городской черте. Ведутся испытания образцов материалов на атмосферостойкость в свободном состоянии и под нагрузкой, а также испытания элементов конструкций, в том числе труб внутренним давлением. В 2023 году на полигоне была установлена новая метеостанция «Сокол-М1», приобретенная в рамках гранта ЦКП [4]. Метеостанция позволяет измерить значения температуры, влажности, осадков, ультрафиолетовое излучение, скорость и направление ветра. Кроме образцов на полигоне проходят испытания различные изделия и конструкции. К примеру, в данное время на базе полигона ведутся натурные испытания трубчатых стальных и композитных свай под нагрузкой, а также площадка обслуживания, изготовленная полностью из композиционного материала.

В условиях Севера и Арктики, сварочные работы часто вынуждены производить в условиях отрицательных температур окружающего воздуха. При этом в большинстве случаев невозможно или трудно обеспечить создание специальных условий для ведения сварки при естественном холоде. Процесс сварки в условиях низких климатических температур сопровождается повышенным отводом тепла от зоны сварки, что оказывает существенное влияние на структуру и механические свойства сварного соединения. С ростом скорости охлаждения увеличивается вероятность образования закалочных структур, что может привести к снижению сопротивляемости сварных соединений к хрупким разрушениям. Таким образом, для получения надежных монтажных и ремонтных сварных соединений, эксплуатирующихся в экстремально холодном климате необходимо применение адаптированных технологических способов, материалов и оборудования.

С введением санкций на поставку запасных частей для импортной техники, возникла необходимость разработки и усовершенствования ремонтно-восстановительных технологий и дополнительных мер упрочнения, адаптированных к суровым климатическим условиям. На предприятиях республики существенно увеличились объемы ремонтно-восстановительных работ с применением сварки и наплавки деталей машин. При этом производственные предприятия испытывают трудности с отсутствием или высокой ценой на рынке привычных импортных сварочных материалов и оборудования.

В этом направлении нами ведутся исследования перспективных сварочных материалов и оборудования на основе низкотемпературных натуральных климатических испытаний для повышения надёжности сварных соединений конструкций в северных регионах. Разработаны про-

граммы климатических испытаний сварочных материалов и оборудования в условиях экстремального холода [5, 6]. Испытания позволили обнаружить определенные проблемы сварочного оборудования при снижении температуры, такие как затвердевание регуляторов сварочного тока, потеря гибкости питающих и сварочных кабелей, нарушение работы индикаторов. Благодаря испытаниям разработчики сварочного оборудования АО «Электро-Интел» улучшили инверторные источники питания для ручной дуговой сварки NEON ВД-201 и NEON ВД-315, расширив диапазон рабочих температур и снизив нижний предел до минус 50 °С.

Выполнены испытания сварочных электродов отечественного производства с целью оценки качества и пригодности их применения в условиях низких климатических температур (до –45 °С). Исследования проводились на сталях марки СтЗсп, 09Г2С и 10ХСНД. Сварку образцов производили модулированным током частотой 1,67 Гц и 5 Гц, а также постоянным током. Результаты исследований после сварки при минус 45 °С сравнивались с результатами, полученными при +20 °С. Было показано, что покрытые электроды марки УОНИ 13/Мороз могут быть рекомендованы для сварки низколегированной стали марки 10ХСНД третьей категории в условиях отрицательных температур окружающего воздуха до минус 40 °С.

Заключение

1. Климатические особенности Республики Саха (Якутия), научный потенциал и инфраструктура ФИЦ ЯНЦ СО РАН имеют уникальную возможность проведения натурных испытаний в двух климатических зонах: очень холодного – с представительным пунктом в г. Якутске и восточно-арктическом – с представительным пунктом в п. Тикси для эффективного решения инженерных задач в самых разных отраслях экономики – энергетике, в нефтегазовой, химической и металлургической промышленности, строительстве, горном деле.

2. Разработаны методики климатических испытаний сварочных материалов и оборудования в экстремальных погодных условиях. Они включают создание программ испытаний, учитывающие специфические требования Северных и Арктических регионов, такие как низкие температуры. Эти новые методики обеспечивают объективную оценку надежности сварочных материалов и оборудования, а также качественные климатические испытания близких к реальным условиям эксплуатации. На основе полученных данных были предложены рекомендации по выбору и применению перспективных сварочных технологий, материалов и оборудования для проведения сварочных работ в условиях холода.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТПС СО РАН, шифр проекта FRWS-2024-0034, номер государственной регистрации 1023031300029-4-2.3.1

Литература

1. Сыромятникова А.С., Голиков Н.И., Кычкин А.К., Старостин Н.П. Использование климатического холода в научных исследованиях // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 9. С. 69–75.

2. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Тихонов Р.П. [и др.]. Натурные климатические испытания неметаллических материалов в условиях холодного климата Якутии // Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера: Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 120-летию открытия синтетического каучука И.Л. Кондаковым (08.10.1857-14.10.1931), уроженцем г. Вилюйска Якутской области. Киров, 2021. С. 140–144.

3. Лебедев М.П., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н. [и др.] Климатические испытания материалов, элементов конструкций и изделий в условиях экстремально холодного климата Якутии // 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. 329–334.

4. Голиков Н.И., Сидоров М.М., Санников И.И. Опыт реализации модели коллективного пользования научным оборудованием ЯНЦ СО РАН в интересах бизнеса // 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. 178–183.

5. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М. Климатические испытания сварочного оборудования при отрицательных температурах : Методические указания. Томск : Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2020. 12 с.

6. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М. Климатические испытания сварочных материалов при отрицательных температурах : Методические указания. Томск : Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2020. 18 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-36-39

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА В РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ УСЛОВИЯХ И ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Петров М.Г.¹, Старцев О.В.^{2,3}, Лебедев М.П.³, Копырин М.М.³

¹ ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск

² НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

³ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

mark-stein@list.ru

Изложен подход для определения долговечности полимерных композиционных материалов, основанный на рассмотрении внутренних термодинамических процессов, происходящих в материалах под нагрузкой с позиций теории скоростей реакций. Изложены результаты испытаний углепластиков авиационного назначения на растяжение, сжатие и межслоевой сдвиг при различных видах нагружения. Проведен анализ структуры углепластиков по их неупругим характеристикам. Рассмотрены методы прогнозирования их долговечности для заданной вероятности разрушения.

Экспериментальные и теоретические основы этого подхода изложены в работах [1, 2] со всеми ссылками на историю вопроса и экспериментально-теоретические доказательства его достоверности и применимости. Первым шагом в исследовании свойств любого твёрдого тела является нагружение образцов материала при нарастающих напряжениях с разными скоростями при различных температурах и применение термоактивационного анализа как основного метода обработки получаемых данных. Эта область условий нагружения связана с общим течением материала – ползучестью.

При переменных нагрузках, применяя те же законы разрушения к совокупности локальных процессов, распределённых в структурно неоднородном материале, требуются дополнительные методы испытаний и анализа получаемых результатов.

Настоящая работа демонстрирует этот подход применительно к разрушению углепластиков, подверженных кроме температурно-силовых воздействий влиянию внешней среды на состояние связующих. Анализ их прочностных свойств даёт возможность предвидения хода процесса разрушения в тех или иных условиях эксплуатации подобных конструкций.

Испытания на растяжение-сжатие со ступенчато нарастающей амплитудой нагружения были выполнены на образцах углепластика авиационного назначения на основе эпоксидного связующего Sусом 977-2 и углеродных волокон марки Tenax[®] IMS [3, 4] после 7 лет экспонирования под навесом и на открытом атмосферном стенде в условиях теплого влажного

климата Сочи. Сравнивали результаты этих воздействий с контрольной партией образцов, им не подвергавшимся.

Использовался симметричный цикл нагружения, при котором разрушение происходит в результате сжатия ввиду ползучести связующего. При растягивающих нагрузках прочностные свойства композита иные. Этот вид нагружения применяется с целью получения дополнительной информации о неупругих свойствах материала. Амплитудная зависимость неупругости характеризует структуру материала, ибо она является следствием неоднородности распределения внутренних напряжений по его объему. Именно они и определяют долговечность материала и используются в математических моделях, описывающих процессы усталостного разрушения.

Нагружение проводили по ступенчатой программе, и на каждой ступени выполнялось четыре цикла, по которым получалось три значения раскрытия петли неупругости. Оцифровка нагрузок и перемещений осуществлялась с частотой примерно на два порядка большей частоты нагружения.

Процесс разрушения характеризуется скоростью, зависящей от температуры и напряжений. Под скоростью разрушения понимается величина, обратная долговечности, которая определяется выражением

$$\dot{\omega} = v_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma(t)}{RT(t)}\right), \quad (1)$$

в котором абсолютная температура T и напряжения σ могут быть любыми функциями времени. Здесь U_0 – начальная энергия активации разрушения (ЭАР), γ – активационный объём, характеризующий в материале уровень внутренних напряжений, $R = 8,31441$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, $v_0 = 10^{13}$ с⁻¹ – характерная дебаевская частота [1, 2].

Интегрируя это выражение по времени в соответствии с траекторией нагружения до момента полного разрушения образца, получаем условную повреждённость $\omega = 1$. Из этого условия находится коэффициент γ , характеризующий прочность данного материала. То же значение $\omega = 1$ получим, полагая, что при постоянно действующих напряжениях, равных максимальным, образец разрушился в течение времени τ_{eq} .

Исходя из условий равенства повреждённости для данной температуры, получаем соотношение

$$\int_0^{t_*} \dot{\omega}(t, \sigma) dt = \tau_{eq} v_0 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma|\sigma_{\max}|}{RT}\right), \quad (2)$$

где t_* – момент времени окончания процесса разрушения. Под напряжением $|\sigma_{\max}|$ здесь следует понимать те напряжения (растягивающие, сжимающие, касательные и пр.), которые приводят к разрушению. В результате все случаи нагружения по различным траекториям во времени можно привести к единой системе координат и выполнить их анализ. Анализ заключается в определении силовой зависимости ЭАР, представленной в числителе экспоненты (1). В результате получаем зависимости по совокупности значений

$$U(\sigma) \in RT \ln(v_0 \tau_{eq}) = U_0 - \gamma|\sigma_{\max}|$$

и по методу наименьших квадратов находится величина U_0 .

Силовые зависимости ЭАР образцов, испытанных по программам с нарастающими амплитудами напряжений, представлены на Рис. 1 [4]. Поскольку объём испытаний был очень мал, термоактивационный анализ проводился при заданном значении U_0 , ранее определённом для углепластика (155,3 кДж/моль). «Прочность», переведённая здесь также в единицы времени, характеризуется тангенсом угла наклона прямых 1, 2 и 3 в этих координатах – коэффициентом γ .

Наименее прочными оказались образцы, не подвергавшиеся климатическим воздействиям (прямая 1). Температурно-влажностные условия экспозиции, исключая воздействия солнечной радиации, благоприятно сказались на их прочностных характеристиках (прямая 2). А воздействие солнечной радиации этот эффект практически устранило (прямая 3).

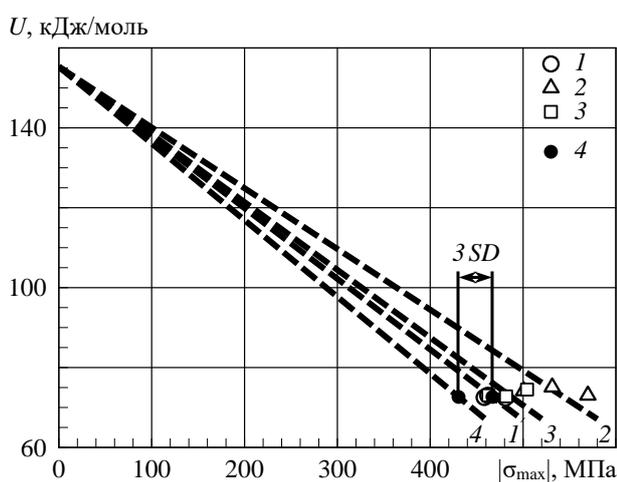


Рис. 1. Силовые зависимости ЭАР образцов углепластика, испытанных по программам, изображённых на рисунке 1: 1 – контрольные пластины, хранившиеся в лаборатории, 2 – пластины, находившиеся на стенде под навесом, 3 – пластины, экспонировавшиеся на открытом стенде, 4 – центры рассеяния ЭАР пластин 1 для вероятности разрушения 50% на прямой 1 и 0,14% на прямой 4

со ступенчато нарастающей амплитудой нагружения [4].

Неупругость любого материала начинается от напряжений равных нулю. При малых амплитудах всегда наблюдается релаксационный фон внутреннего трения, вызванный процессами вязких локальных течений в структуре материала. Скорость процессов вязкого течения в материалах во многих случаях пропорциональна напряжениям, и получается линейная зависимость раскрытия петель от амплитуды напряжений.

По мере увеличения амплитуды нагружения пропорциональность связи между усилиями и перемещениями нарушается, так как появляются пластические деформации, увеличивающие раскрытие (ширину) петель, называемые неупругостью гистерезисного типа [1]. Скорость пластической деформации экспоненциально зависит от напряжений, как и скорость разрушения (1). Связь пластической деформации с накоплением повреждений используется в математических моделях, вычисляющих процесс разрушения при усталости [5, 6]. Амплитудные зависимости неупругости углепластика различных марок приведены в работах [4–6].

При дальнейшем нарастании амплитуды появляются участки всё большего прироста раскрытия петель. Экстраполяция каждого из характерных участков прироста ширины петли показывает величину прироста для каждого интервала амплитуд нагружения. По нашим представлениям это связано с появлением новых локальных зон в структуре материала, где возникают пластические деформации. Это подтверждается испытаниями на остаточную долговечность образцов после выработки материалом в эксплуатации части ресурса его долговечности: минимум остаточной долговечности наблюдается только при определённых нагрузках, близких, по-видимому, к эксплуатационным [4]. Используя связь неупругости гистерезисного типа с выносливостью (повреждённостью материала за цикл нагружения), определяются параметры математической модели материала для расчёта долговечности с заданной вероятностью разрушения и при переменных напряжениях, учитывая разброс экспериментальных данных [6].

Испытания на межслойный сдвиг также демонстрируют основные законы разрушения. Рассмотрим пример испытаний углепластика ACM 102-C130UD, проведенных трёхточечным изгибом коротких балок по ГОСТ32659-2014. Величина максимального значения касательных напряжений вычисляется по формуле

$$\tau_{\max} = 3Q / 2F = 3P / 4F,$$

где Q – перерезывающая сила, F – площадь поперечного сечения образца.

Имея силовую зависимость ЭАР, можно рассчитать процесс разрушения материала при произвольных изменениях температуры и напряжений, учитывая изменение γ во времени [1], и определить его прочность – время разрушения t_* численным интегрированием (2) по временным шагам для заданной вероятности разрушения. Для этого из центра рассеяния ЭАР образцов, например, в исходном состоянии отложить три стандартных отклонения SD в сторону меньших напряжений и соединить эту точку со значением U_0 . Получим силовую зависимость ЭАР для данной вероятности, по которой и выполняется расчёт. Пример расчёта количества безопасных погружений на глубину 4000 м батискафа «Титан» приведён в докладе на конференции ICMAR 2024 [7].

Неупругие свойства материала определяются по амплитудной зависимости раскрытия петель, появляющегося при нагрузке–разгрузке. Для этого и проводятся испытания

Испытания на межслойный сдвиг проведены при монотонном нагружении образцов с постоянной скоростью перемещения в интервале времени разрушения, составляющем четыре порядка: от ~ 2 до ~ 20000 с. При этом выявляется распределение прочности образцов по группам, как это встречается и в металлических сплавах [1].

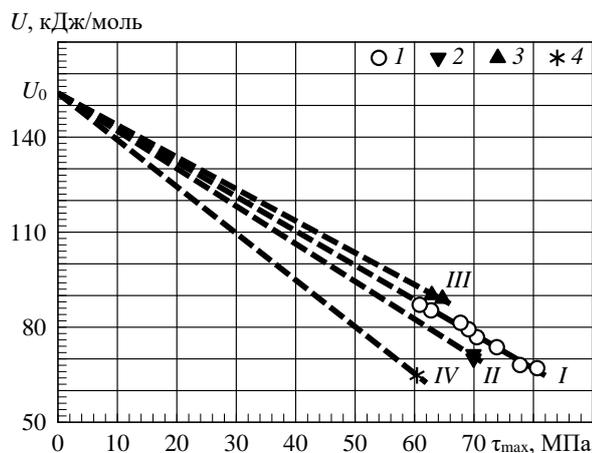


Рис. 2. Зависимости ЭАР от максимальных значений касательных напряжений при испытаниях на межслойный сдвиг с различными скоростями перемещений. Цифрами обозначены группы прочности испытанных образцов (I–IV) и соответствующие им силовые зависимости ЭАР (I–IV)

В заключение отметим, что разрушение углепластиков, как и других материалов, относится к числу междисциплинарных задач физики и механики ПКМ. Мерой прочности любого материала является время его разрушения при постоянных, нарастающих или переменных нагрузках. Представленные в работе результаты показывают перспективность подхода, рассматривающего внутренние термодинамические процессы нагруженных материалов с позиций теории скоростей реакций.

Финансирование работы: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24 19 00009, <https://rscf.ru/project/24-19-00009/>.

Литература

1. Петров М.Г. Прочность и долговечность элементов конструкций: подход на основе моделей материала как физической среды. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2015. 472 с.
2. Petrov M.G. Mathematical Modeling of Failure and Deformation Processes in Metal Alloys and Composites// American Journal of Physics and Applications. 2020. V. 8. P. 46–55.
3. Петров М.Г., Лебедев М.П., Старцев О.В., Копырин М.М. Влияние низких температур и влаги на прочностные свойства углепластика // Доклады РАН. Химия, науки о материалах. 2021. Т. 500. С. 62–68.
4. Petrov M.G., Startsev O.V., Lebedev M.P., Kopyrin M.M., Salnikov V.G. Strength characteristics of carbon fiber reinforced plastic in shear and cyclic extension–compression after 7 years of climate exposure // Universal Journal of Carbon Research. 2024. V. 2, Issue 1. P. 1–13.
5. Petrov M. Fracturing of Solids as a Thermodynamic Process // Alloys. 2023. V. 2. P. 122–139.
6. Петров М.Г. Долговечность и неупругость композиционных материалов // Композиты и наноструктуры. 2024. Т. 16, вып. 2. С. 121–134.
7. Petrov M.G. Science of the strength of materials or what is not taught in universities // 22th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2024): Abstracts. Part 1. P. 120–122.

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ИНЖЕНЕРИИ ПОКРЫТИЙ С НИЗКОРАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРОЙ МЕТОДАМИ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЕПЛОВЛОЖЕНИЕМ ЗА СЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ УДАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Сараев Ю.Н.¹, Голиков Н.И.¹, Сидоров М.М.¹, Максимова Е.М.¹, Непомнящий А.С.²

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

² АО «Газпром Добыча Томск», г. Томск

saraev.73@yandex.ru

В работа рассматриваются направления по физическому принципу инженерии покрытий с низкоразмерной структурой методами адаптивного импульсного управления и дополнительной ударно-механической обработки. Развиваемое направление исследований основано на применении технологий, в которых обеспечивается регулируемое тепловложение, за счет импульсного изменения энергетических параметров режима управления характеристиками тепломассопереноса при сварке и наплавке. 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.

Актуальность разработки и экспериментально-теоретического обоснования принципов инженерии покрытий на деталях и изделиях, эксплуатирующихся в условиях знакопеременных нагрузок и низких климатических температур Севера, связано с необходимостью совершенствования технологий монтажных, ремонтно-восстановительных и упрочняющих обработок быстроизнашивающихся деталей и изделий, работающих в условиях Крайнего Севера и Арктики [1]. Указанное совершенствование основывается на изыскании путей комплексного применения дисперсных тугоплавких соединений в исходных наплавочных композициях, режимов импульсных технологий наплавки, позволяющих обеспечивать регулируемое тепловложение в процессе внедрения в расплав, и определяющих структуру, физико-механические и служебные свойства покрытий из металлов и сплавов, а также методов физико-технической обработки структурно-неоднородных зон [2].

Задачей комплексного сочетания экспериментальных и теоретических исследований является обоснование показателей надежности и живучести крупногабаритных металлоконструкций на основе расчетных методик и современных исследовательских ресурсов по изучению быстропротекающих процессов тепломассопереноса, обоснование возможности управления структурой и свойствами неразъемных соединений, не только на этапах их производства, но и на этапах ремонтных работ в естественно-климатических производственных условиях [3]. Отмеченное сочетание может обеспечить повышение эксплуатационной надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях низких климатических температур Крайнего Севера и Арктики [4].

Цель исследований – поиск путей повышения надежности и живучести технических систем ответственного назначения, работающих в условиях низкочастотного термоциклирования в Северные и Арктические районы Российской Федерации.

Методологические подходы, реализуемые при выполнении исследований. За основу выполняемых исследований выбраны технологии электродуговой наплавки. Анализ факторов, влияющих на формирование наплавленного покрытия, показал, что их можно разделить на две группы.

Первая группа выражается показателем, который в процессе наплавки изменить нельзя, пространственным положением защищаемой покрытием поверхности [5].

Вторая группа связана с параметрами режима наплавки, которые можно изменять в ходе технологического процесса. При этом появляется возможность изменять геометрические размеры наплавляемого покрытия: его высоту и ширину, а также кривизну поверхности ванны расплава в поперечном сечении [6]. Перечисленные возможности по управлению параметрами второй группы факторов заложены в способе нанесения наплавляемого покрытия с использованием низкочастотной модуляции энергетических параметров режима [7]. В этом случае появляется больше возможностей управления изменением геометрических размеров наплавляемого покрытия, чем при наплавке на постоянном токе, где количество регулируемых параметров режима ограничено. Например, при нанесении покрытия на рельефные поверхности, где может изменяться пространственное положение ванны расплава от нижнего до потолочного. В этом случае ванна расплава обладает большой подвижностью, что, часто, приводит, из-за внезапных коротких замыканий, к нарушению стабильности технологического процесса наплавки.

В целом, проблема повышения прочности и эксплуатационной надежности сварных соединений из низколегированных сталей связана с необходимостью обеспечения комплекса физико-механических свойств и равнопрочности зон соединения, предотвращения образования холодных трещин, а также структур, снижающих сопротивляемость соединений замедленному и хрупкому разрушению, определяемой характером микрометаллургических процессов на этапе их формирования.

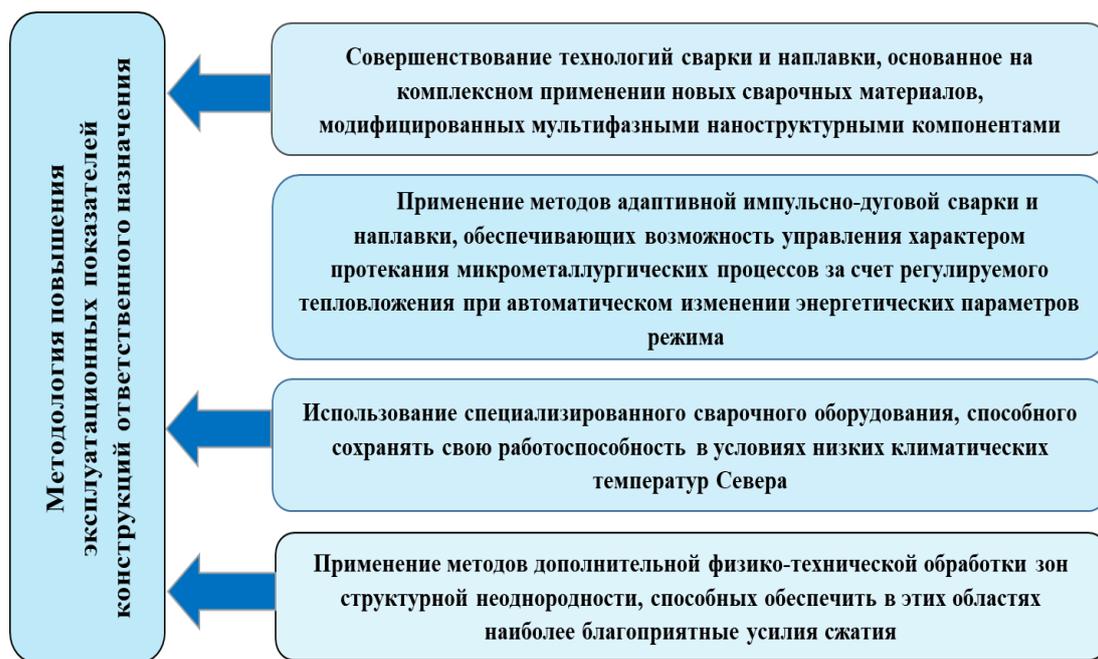


Рис. 1. Методология повышения эксплуатационных показателей конструкций ответственного назначения

Как показали выполненные исследования, помимо вышеуказанных факторов, физические принципы инженерии покрытий в условиях низких климатических температур, должны содержать дополнительные ресурсы управления структурным и напряженно-деформируемым состоянием упрочняемых поверхностей [8]. Например, дополнительной ударно-механической обработкой структурно-неоднородных областей, способных обеспечивать в них наиболее благоприятные усилия сжатия [9]. Основные составляющие такого комплексного подхода приведены на рисунке 1.

Опыт выполнения перечисленных исследований показал, что для предотвращения подобных нарушений процесса наплавки необходимо использовать дополнительное высоко-

энергетическое воздействие на расплав. Дополнительные регулировочные параметры: изменение амплитуды токов импульса и паузы, их длительностей, частоты следования, глубины модуляции тока, которые позволяют управлять размерами ванны расплава, изменять характер плавления и переноса металла в эту ванну. Это способствует повышению стабильности формирования наплавляемого покрытия независимо от пространственного положения обрабатываемой поверхности. Кроме того, увеличение ширины ванны расплава при наплавке в режиме импульсного изменения энергетических параметров приводит к уменьшению силы поверхностного натяжения, что способствует повышению жидкотекучести ванны расплава на интервале действия импульса тока, увеличению площади ее поверхности и радиуса кривизны поверхности расплавленного металла. На интервале тока паузы ширина ванны расплава уменьшается при снижении значения напряжения дуги. Это, способствует перемешиванию металла сварочной ванны за счет возвратно-поступательного движения расплавленного металла, что приводит к уменьшению его теплосодержания и увеличению скорости кристаллизации. Наиболее эффективно управлять движением металла в ванне расплава можно варьированием силой тока наплавки на интервале длительности импульса. С увеличением силы тока импульса увеличивается давление дуги, что способствует более активному движению металла в ванне расплава равномерному распределению легирующих элементов по объему наплавляемого металла.

Таким образом, одной из важнейших задач создания надежных и долговечных машин и конструкций северного исполнения является разработка рациональных технологий сварки и наплавки, как основных методов изготовления, восстановления и упрочнения наиболее высоконагруженных узлов и рабочих поверхностей конструкций ответственного назначения [10]. Помимо сказанного, сама проблема ремонта и повышения прочности крупногабаритных конструкций Севера является сложной многофакторной задачей, обусловленной их эксплуатацией в сложных климатических условиях, в частности, очень низких температур, что требует разработки и использования хладостойких материалов, новых технологических процессов изготовления неразъемных соединений и после сварочной обработки. Широко распространенные в отечественном и зарубежном производстве способы ремонтной сварки стационарной дугой исчерпали свои возможности повышения качества сварных соединений в сложных условиях решения технологических задач реального сварочного производства.

Отметим, что одним из наиболее эффективных направлений управления характером протекания микрометаллургических процессов путем применения новых присадочных материалов, модифицированных мультифазными наноструктурными композициями, обеспечивающими повышение ресурса металлоконструкций и изделий, функционирующих в условиях низких климатических температура, а также оборудования и технологий адаптивной импульсно-дуговой сварки и наплавки, которые позволяют через программируемый ввод тепла в зону сварного соединения, управление процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, создание в зонах сварных соединений технических систем мелкодисперсной структуры в металле шва и зоне термического влияния, существенно уменьшить степень остаточных деформаций сварных соединений, изготавливаемых из различных марок сталей, а также повысить их эксплуатационную надежность. **Такой подход является оригинальным и соответствует мировому уровню.**

Заключение. Выполняемые 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.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТПС СО РАН, шифр проекта FRWS-2024-0034, номер государственной регистрации 1023031300029-4-2.3.1

Литература

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145.

2. Ларионов В.П., Слепцов О.И., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // в сборнике трудов IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Пленарные доклады. Якутск. 2008. С. 26–30.

3. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Слепцов О.И., Сидоров М.М., Семенов С.В. Разработка концепции создания и функционирования региональных центров производства, восстановительного ремонта и упрочняющей обработки ресурсопределяющих деталей и изделий техники, работающей в условиях Крайнего Севера и Арктики // EURASTRENCOLD-2023 [Электронный ресурс]: 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 (11–15 сентября 2023 г., г. Якутск). Киров: Изд-во МЦИТО, 2023. С. 531–537.

4. Поисковые исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур / Сараев Ю.Н., Гладковский С.В., Голиков Н.И. и др. // В книге: Научно-технологические проекты РФ. Сибирь. Томск, 2017. С. 134–202.

5. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. 2010. № 8. С. 14–19.

6. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. 2005. Т 8. № 5. С. 137–140.

7. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Гладковский С.В., Голиков Н.И. Повышение надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения // Сварочное производство. 2016. № 9. С. 3–9.

8. Сараев Ю.Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. 2002. № 1. С. 4–11.

9. Сидоров М.М., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П. Управление уровнем остаточных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой // Тяжелое машиностроение. 2023. № 10. С. 23–28.

10. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Сидоров М.М., Максимова Е.М., Семёнов С.В., Перовская М.В. Поисковые исследования повышения надежности сварных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Севера // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 4 (77). С. 30–42.

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПКМ

Старцев В.О.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

vostartsev@viam.ru

В работе приведены результаты анализа изменения механических показателей более 4600 наборов ПКМ при экспонировании в 7 климатических зонах в течение 0,5–23 лет. Показано, что изменение относительного коэффициента сохраняемости адекватно описывается логнормальным распределением, а смещение центра распределения является информативной количественной оценкой для ранжирования агрессивности климатических зон, сравнения климатической стойкости различных классов ПКМ, выявления наиболее чувствительных к климатическому старению механических показателей.

Систематизированы результаты измерения механических свойств ПКМ после экспонирования в открытых условиях различных климатических зон [1–9]. Для рассмотрения выбраны композиционные материалы на основе полимерных матриц и стеклянных, углеродных, органических и гибридных волокнистых наполнителей с разнообразными схемами армирования. Рассмотрено 4600 наборов ПКМ, экспонированных в условиях 7 климатических зон в течение от 0,5 до 23 лет. В массиве данных больше всего сведений об углепластиках (42%) и стеклопластики (около 34%), органопластиках (около 16%). Сведений о боропластиках, базальтопластиках и гибридных ПКМ меньше (8%), однако это составляет более 350 наборов образцов, что является достаточным количеством для получения обобщающей информации.

ПКМ экспонировались в теплом, влажном (Батуми, Сочи), очень холодном (Якутск), умеренно холодном (Москва) и умеренно теплом (Геленджик) климате. На долю проверки климатического воздействия этих 4 зон приходится около 90% всех изученных ПКМ. Еще 10% значений составляют сведения по экспонированию образцов в условиях тропического, умеренного климата и в условиях высокогорья.

Для оценки климатического воздействия на механические свойства ПКМ определялись пределы прочности и модули упругости при изгибе, сжатии, растяжении, межслойном сдвиге. Более чем в 60% случаев механические показатели ПКМ после различного времени климатического воздействия определены при комнатной температуре, в 33% случаев – при повышенных температурах. Однако даже 5,1% измерений, выполненных при низких температурах, составляют 235 вариантов. Такого количества достаточно для выявления общих закономерностей изменения механических свойств ПКМ в широком интервале температур.

На рис. 1 показаны гистограммы распределения сохраняемости механических показателей 4600 наборов ПКМ после климатических испытаний без разделения на климатические зоны, продолжительность экспонирования и измеряемые характеристики. Использован обобщенный показатель (относительный коэффициент сохраняемости) $k_R = (R_t / R_0)$, где R_t – пределы прочности и модули упругости при растяжении (σ_t, E_t), сжатии (σ_c, E_c), изгибе (σ_b, E_b), межслойном сдвиге (τ, G), измеренные после различных сроков экспонирования; R_0 – исходные значения соответствующих показателей. Из 4600 наборов образцов почти в 30% случаев изменение показателя k_R находится в пределах 0,9–1, то есть, не превышает 10% от исходных значений. Вероятность более значительного снижения уровня механических показателей уменьшается по закону, близкому к закону нормального распределения. Вид гистограмм распределения изменения показателя k_R , измеренного при комнатной, повышенных и низких температурах изменяется несущественно (рис. 1).

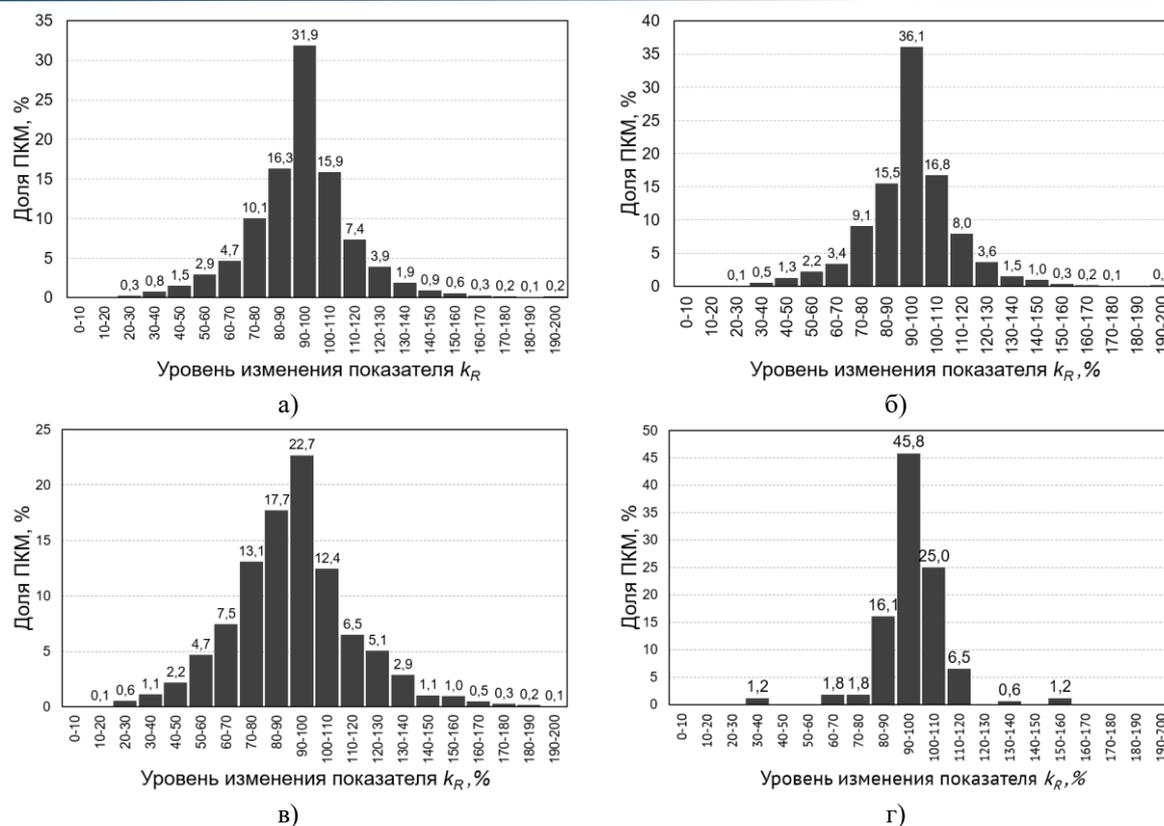


Рис. 1. Гистограммы распределения сохраняемости механических показателей ПКМ после климатических испытаний без разделения на климатические зоны, продолжительность экспонирования и измеряемые характеристики – для всех температур (а), при комнатной температуре (б), при повышенных температурах (в), при низких температурах (г) испытаний

Важным результатом анализа данных, представленных на рис. 1, является выявление более 30% случаев $k_R > 1$, то есть улучшения механических показателей после пребывания ПКМ в открытых климатических условиях. В большинстве случаев увеличение $k_R > 1$ объясняется эффектами доотверждения полимерной матрицы.

Гистограммы распределения сохраняемости обобщенного показателя k_R были проанализированы с использованием нормального и логнормального распределения.

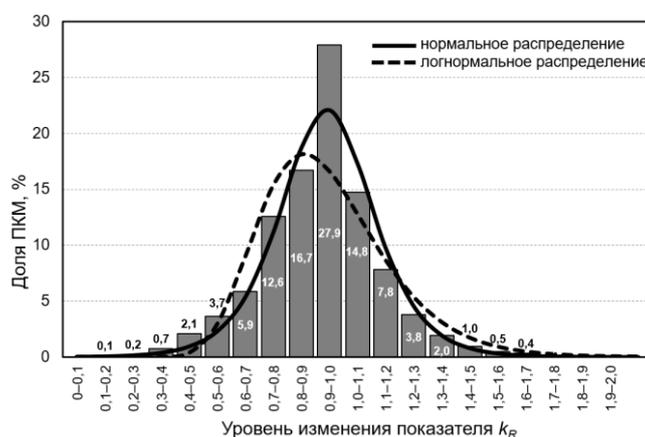


Рис. 2. Аппроксимация гистограмм распределения показателя k_R ПКМ после экспонирования в зоне теплого влажного климата функциями нормального и логнормального распределений

На рис. 2 показан пример гистограмм распределения показателя k_R для всех измеренных механических показателей ПКМ после экспонирования в зоне теплого влажного климата.

Нормальное распределение является распространенной моделью для описания процессов, при которых действует большое количество независимых случайных величин. Если считать, что климатические показатели изменяют механические показатели ПКМ без взаимного влияния, то плотность вероятности нормально распределенной величины $x=k_R$ с параметрами смещения μ и масштаба σ имеет вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Однако в ряде работ по исследованиям климатического старения ПКМ отмечено проявление синергизма, при котором воздействие температуры, влажности, интенсивности солнечной радиации и других значимых климатических факторов не является аддитивным. Поэтому целесообразно использовать представление о мультипликативном взаимодействии агрессивных факторов, при котором каждый новый элементарный эффект деструкции, пластификации, структурной релаксации, доотверждения зависит от состояния системы, сформированного переменными факторами. В этом случае при статистической обработке крупного массива данных по изменению показателя k_R от условий и продолжительности климатического экспонирования, типа материала, измеряемого прочностного показателя было предположено, что распределение сохраняемости механических показателей ПКМ правильнее характеризовать несимметричным логнормальным распределением

$$p(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

чтобы точнее оценить наиболее вероятные уровни сохраняемости механических показателей ПКМ после климатических воздействий. Центр симметричного распределения, который соответствует максимальной высоте функции (1) определяется параметром μ . При использовании (2) центр распределения определяется модой $\exp(\mu - \sigma^2)$.

Исследование смещения распределения позволяет проводить глубокий анализ закономерностей изменения механических показателей ПКМ при натурном экспонировании в различных аналитических срезах.

Например, общее число случаев изменения показателя k_R от 1,0 до 0,8 после экспонирования в открытых климатических условиях изменяется незначительно от 51% (очень холодный климат) до 49,2% (тропический климат). Однако существенные различия обнаруживаются для $k_R < 0,6$: после воздействия очень холодного климата имеется лишь 4,6% ПКМ, а после экспонирования в условиях тропиков – 15%. Для выбранного диапазона изменений k_R можно утверждать, что вероятность ухудшения механических показателей ПКМ в тропическом климате в 3,3 раза выше, чем после экспонирования в очень холодном климате. При этом смещение максимума плотности распределения (1) при переходе от очень холодного к тропическому климату оказалось несущественным (4%), но снизилось на 9% (от 89% до 80%) для логнормального распределения (2).

Аналогичный анализ чувствительности механических показателей выявил, что самым стабильным механическим показателем является модуль упругости при изгибе, наиболее вероятное значение которого остается на исходном уровне. Модуль упругости при растяжении также проявляет высокую стабильность к климатическим воздействиям, но распределение (2) дает оценку наиболее вероятного значения этого показателя для экспонированных ПКМ на уровне 91%. Наибольшие изменения обнаружены для пределов прочности при изгибе и сдвиге ПКМ на уровне 17–18%. Можно сделать вывод, что физико-химические эффекты климатического старения полимерных матриц ПКМ наилучшим образом выявляются при сдвиговых и изгибных нагрузках образцов.

Анализ влияния продолжительности экспонирования на распределение показателя k_R ПКМ при объединении результатов испытаний в различных климатических зонах дает очевидный результат, однако представляет интерес количественная оценка большого массива экспериментальных результатов. Наиболее вероятное значение показателя k_R ПКМ, определенное распределением (2), изменяется от 94% после 0,5 лет экспонирования до 77% после 10 лет испытаний.

Этот подход позволяет оценить климатическую стабильность основных классов ПКМ в зависимости от продолжительности экспонирования. После любых сроков испытаний (от 1 до 10 и более лет) углепластики демонстрируют наивысшую стабильность механических показателей. После 10 лет климатического воздействия наиболее вероятное значение показателя k_R углепластиков снизилось на 13%, тогда как для стеклопластиков аналогичное уменьшение составило 27%. Особенно заметно преимущество углепластиков проявилось при $k_R < 0,8$. После 10 лет экспонирования выявлен 21% случаев, при которых у углепластиков $k_R < 0,8$, а в стеклопластиках это происходит в 46% случаев.

Таким образом показано, что адекватной моделью изменения относительного коэффициента сохраняемости является смещенное (логнормальное) распределение, а смещение центра распределения является информативной количественной оценкой. Выявлено, что доля ПКМ с коэффициентом сохраняемости ниже 0,6 является объективной количественной характеристикой агрессивности климата. Если результаты измерений прочности или модуля упругости конкретного материала выпадают из общей закономерности, то это является основанием для более детального и внимательного анализа и дополнительных измерений. При постановке задач климатических испытаний ПКМ можно заранее учитывать, что наиболее изменяющимся показателем окажется предел прочности при изгибе, а самым стабильным показателем – модуль упругости при изгибе.

Литература

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. С. 47–58.
2. Vapirov Y.M., Krivonos V.V., Startsev O.V. Interpretation of the anomalous change in the properties of carbon-fiber-reinforced plastic KMU-1u during aging in different climatic regions // *Mechanics of Composite Materials*. 1994. Vol. 30, No 2. P. 190–194.
3. Baker D.J. Evaluation of Composite Components on the Bell 206L and Sikorsky S-76 Helicopters. NASA AVSCOM Technical Memorandum 4195. Hampton. Virginia, 1990. P. 35.
4. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т. Е., Коренькова Т.Г. Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства стеклопластиков // *Авиационная промышленность*. 2004. № 1. С. 45–48.
5. Sookay N.K., Klemperer C.J., Verijenko V.E. Environmental testing of advanced epoxy composites // *Composite Structures*. 2003. Vol. 62. P. 429–433.
6. Vodichka R., Nelson B., van der Berg J., Chester R. Long-term environmental durability of F/A-18 composite material. Melbourne, Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 1999. P. 18.
7. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fibre reinforced epoxy laminates // *Polymers and Polymer Composites*. 1998. Vol. 6, No 7. P. 481–488.
8. Baker D.J. Ten-year ground exposure of composite materials used on the Bell model 206L helicopter flight service program. NASA Technical Paper 3468. ARL Technical Report 480. Hampton. Virginia, 1994. P. 54.
9. Williams J.G. The effects of tropical weathering on glass-reinforced epoxy resins // *Composites*. 1977. Vol. 8, No 3. P. 121–200.

СЕКЦИЯ 1. ПРОЧНОСТЬ И ЦЕЛОСТНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-48-51

О ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Анахов С.В.¹, Гузанов Б.Н.¹, Матушкин А.В.², Мичуров Н.С.³

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет

² Уральский федеральный университет

³ Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,
Екатеринбург

sergej.anahov@rsvpu.ru

В работе представлены результаты сравнительного экспериментального исследования качества резки конструкционной стали под сварку с применением современных методов высокоэнергетической резки металлов – лазерной, плазменной, газопламенной и гидроабразивной технологий. Результаты работы свидетельствуют о высоком качестве резки металлов, достигаемом с использованием данных технологий. При этом наилучшее качество при разделке стали толщиной 16 мм было достигнуто при резке плазматроном ПМВР-5.3.

В современных заготовительных и ремонтных производствах существует достаточно широкий выбор технологий разделки металлов. Большинство из них можно отнести к высокоэнергетическим технологиям – лазерную, электронно-лучевую, плазменную, газоплазменную резку, хотя существенную долю в общем объеме применения технологий разделки играют также механическая и гидроабразивная резка [1, 2]. Зачастую, выбор наиболее эффективной технологии (при наличии определенных ресурсов) оказывается достаточно сложной задачей, поскольку приходится принимать во внимание широкий комплекс факторов – производительность, энергетическую эффективность, качество, себестоимость, безопасность, технологичность и т. д. В свою очередь, каждый из упомянутых факторов находится во взаимосвязи с остальными факторами, зависит от вида разрезаемого материала и типа оборудования и может варьироваться в достаточно широких пределах. В результате возникает задача оптимального выбора, которая, как правило, решается в зависимости от заданного приоритета в рейтинге вышеупомянутых критериев и часто сводится к учету рекомендаций, сформированных по результатам анализа известных технологических практик и достаточно разрозненных научных исследований в этой сфере.

Свою роль при выборе наиболее эффективной технологии играют и существующие регламентные нормы на качество резки. Как показано в ряде исследований, качество резки, зачастую, существенным образом влияет на параметры сварных соединений, получаемых в процессах их производства с применением различных методов разделительной резки металлов. Однако, как было показано авторами [3], не все упомянутые выше технологии резки стандартизованы по параметрам качества из-за чего данные требования, часто определяются заказчиком, либо используются стандарты предприятий и руководящая документация (например, в технологиях лазерной резки). Кроме того, современные регламентные нормы на качество резки с применением таких технологий в большей части опираются на выводы, полученные в конце XX века, и не всегда учитывают результаты, получаемые с использованием новых устройств и технологий, позволяющих производить резку с высоким качеством и эффективностью, включая последующее производство сварных соединений. Фактически, единственным универсальным регламентом в этой связи можно признать ГОСТ ИСО 9013-2022 (Резка термическая. Классификация резов. Геометрические характеристики изделий и допуски по качеству), в котором при оценке качества поверхности

реза термически разрезанных материалов обращают внимание на значения 2-х основных параметров – допуск перпендикулярности или наклона и средняя высота профиля Rz5 и несколько дополнительных – отставание реза; оплавление верхней кромки; возможное формирование грата или расплавленных капель на нижней кромке реза.

Более детализированными являются требования, предъявляемые к качеству плазменной и газовой резки в ГОСТ 14792-80 «Детали и заготовки, вырезаемые кислородной и плазменно-дуговой резкой. Точность, качество поверхности реза». Данный стандарт характеризует качество по четырем показателям – точности размеров; неперпендикулярности кромок; микрошероховатости поверхности реза; зоне термического влияния. Однако, при резке металла для последующего производства сварных соединений необходимо учитывать и отраслевые стандарты – например, СТО Газпром 2-2.2-136-2007 (Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов) и РД 153-006-02 ОАО «ТРАНС-НЕФТЬ» (Инструкция по технологии сварки при строительстве и капитальном ремонте магистральных нефтепроводов), устанавливающие требования на механическое удаление дефектов и механическую обработку резаных торцов труб при орбитальной газовой или воздушно-плазменной резке для последующей сварки. Данные ограничения существенно сказываются на конкурентоспособности упомянутых технологий, особенно при разделке и последующей сварке металлов малых толщин. Следует заметить, что упомянутые ограничения присутствуют и в ГОСТ ИСО 9013-2022, устанавливающем допуски на размеры деталей без финишной обработки (допуски перпендикулярности или наклона и нижнее предельное отклонение).

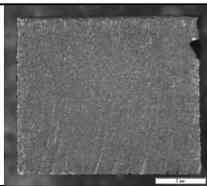
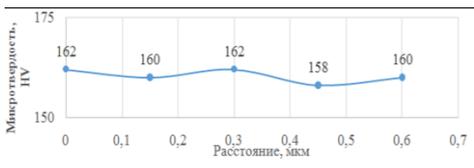
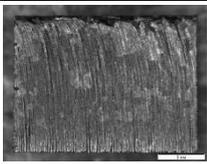
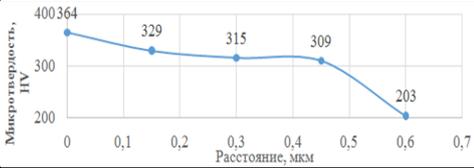
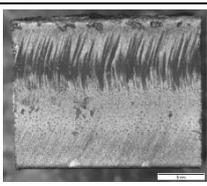
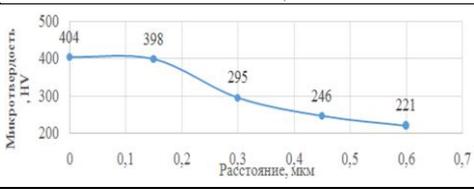
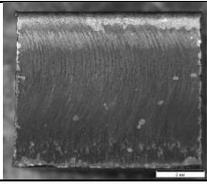
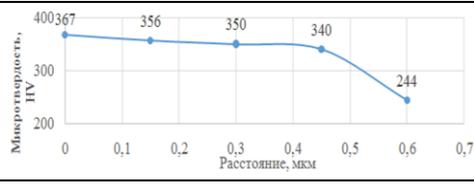
С учетом перечисленных обстоятельств авторами были произведены аналитические и экспериментальные исследования качества резки металлов, достигаемого с применением нескольких известных методов – лазерной, плазменной, газовой и гидроабразивной разделки. Одной из целей исследования было также обоснование предложения авторов о возможности замены дорогостоящих импортных плазмотронов на существенно менее дорогие плазмотроны авторской разработки, имеющие сопоставимые показатели эффективности работы. На взгляд авторов, применение новых отечественных плазморезательных технологий может дать существенный эффект при их внедрении в производство сварных работ на трубопроводном транспорте и сопутствующих производствах (в том числе, условиях Сибири, Арктики и Дальнего Востока). Последнее обстоятельство связано с существенными трудностями транспортировки газовых баллонов для производства газопламенных и сварочных работ в арктических условиях и большими возможностями применения технологий воздушной плазменной резки в данных условиях.

Предварительные результаты исследований позволили сделать вывод, что на малых толщинах металла (до 15 мм) предпочтительнее использовать лазерную и узкоструйную плазменную резку, а при больших толщинах (до 100 мм) приоритетной становится плазменная резка, так как она гораздо более экономична, чем лазерная и гидроабразивная, а в сравнении с газовой разделкой дает лучшее качество в сочетании с высокой производительностью. По этой причине для сравнительного экспериментального анализа качества разделки была выбрана широко применяемая сталь 09Г2С толщиной 16 мм. Гидроабразивная и лазерная резка были осуществлены в РЦЛТ (Региональном центре лазерных технологий), плазменная – в ООО НПО «Полигон» и РГППУ с применением плазмотронов ПМВР-5.3 (авторская разработка производства ООО НПО «Полигон» – одноконтурный узкоструйный плазмотрон 5-го поколения с новой системой газовыхревой стабилизации плазменной дуги [4] – рис. 1) и УК200Н (HUAUYUAN FLG-400HD, Китай). Режимы и фото полученных образцов резки приведены в таблице 1. Дополнительно в РГППУ была произведена газовая резка аналогичных стальных листов (рабочее давление кислорода – 5 атм, пропана – 0,5 атм, скорость резки – 1500 мм/мин).



Рис. 1. Плазмотрон ПМВР-5.3 для прецизионной воздушно-плазменной резки металлов

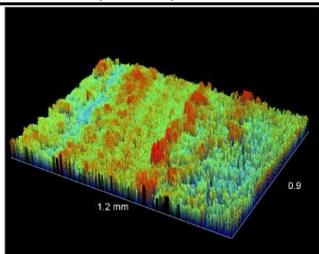
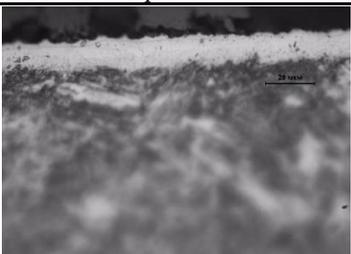
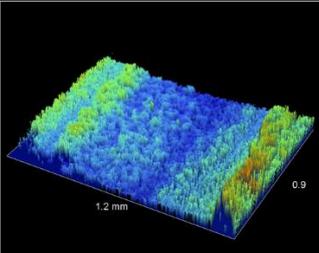
Таблица 1. Режимы и образцы резов, полученные различными видами резки

Вид резки	Режим резки	Образцы реза	Угол реза	Микротвердость
Гидро-абразивная (станок HEAD 3020BA-5AC)	V=130 мм/мин		4°	
Лазерная под сварку (Trumpf Trulaser 5030 Classic, 6 кВт, CO2)	N=1,7 кВт, f=2 кГц, V=600 мм/мин, P=0,6 бар		3°	
Воздушно-плазменная резка (ПМВР-5.3)	I=175 А, U=137 В, V=1500 мм/мин, D _{сопла} =1,9 мм P _{топ} =4,5 атм		4°	
Воздушно-плазменная резка (УК200Н)	I=175 А, U=155 В, V=1500 мм/мин, D _{сопла} =1,9 мм		9°	

Анализ представленных результатов свидетельствует о сопоставимости углов отклонения от перпендикулярности при гидроабразивной, лазерной и плазменной резке плазматроном ПМВР-5.3. Кроме того, наблюдаются более высокие отклонения от нормативных требований по микротвердости (не более 300 HV) при лазерной и плазменной резке плазматроном УК200Н, чем при гидроабразивной и плазменной резке плазматроном ПМВР-5.3. Результаты визуального и количественного анализа поверхности разделочных швов (наличие грата, осцилляций, капель, цветов побежалости) также позволили сделать вывод о наилучшем качестве реза, достигаемом при резке плазматроном ПМВР-5.3.

В таблице 2 представлены результаты измерения параметров микрорельефа поверхности, полученные с применением оптического интерферометра Veeco, а также микроструктурного анализа поверхностного слоя разделочных швов, полученных с применением плазматронов ПМВР-5.3 и УК200Н. Анализ результатов измерений параметров шероховатости показывает, что наилучшее качество поверхности реза (на уровне 1 класса по ГОСТ 14972-80) было также достигнуто с применением плазматрона ПМВР-5.3 (качество поверхности реза, полученное с применением других технологий также было достаточно высоким). Кроме того, можно обратить внимание на выявленное по результатам проведенного микроструктурного анализа наличие трещин и нарушений сплошности поверхностного слоя реза при лазерной и плазменной резке (УК200Н) в отличие от резки плазматроном ПМВР-5.3 (при однотипной внутренней структуре – белый слой у поверхности, далее крупно игольчатый мартенсит).

Таблица 2. Сравнение качества резки разными плазменными технологиями

Вид резки	Микрорельеф поверхности (Veeco)	Микроструктура после плазменной резки
Воздушно-плазменная (ПМВР-5.3М)	<p>Surface Stats: Ra: 2.53 um Rq: 3.28 um Rt: 28.40 um</p> <p>Measurement Info: Magnification: 5.33 Measurement Mode: VSI Sampling: 1.57 um Array Size: 736 X 480</p> 	
Воздушно-плазменная (УК200Н)	<p>Surface Stats: Ra: 4.07 um Rq: 5.16 um Rt: 41.23 um</p> <p>Measurement Info: Magnification: 5.33 Measurement Mode: VSI Sampling: 1.57 um Array Size: 736 X 480</p> 	

Результаты представленного анализа позволяют сделать вывод о высоком качестве реза, достигаемом с применением современных высокоэнергетических технологий (на уровне 1 класса по ГОСТ 14972-80). Как показали сравнительные исследования, наиболее высокие параметры качества были достигнуты при воздушно-плазменной резке плазматроном ПМВР-5.3, что подтверждает не только его высокую эффективность и прецизионность резки, но и его импортозамещающий потенциал, а также возможность «чистовой» резки с его применением при производстве сварных соединений в пределах толщин до 20 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00111.

Литература

1. Кайдалов А.А. Современные технологии термической и дистанционной резки конструкционных материалов / А.А. Кайдалов. – К.: Экотехнология, 2007. 456 с.
2. Аверьянова, И.О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки : учебное пособие / И.О. Аверьянова, В.В. Клепиков. – Москва : ФОРУМ, 2022. – 304 с.
3. Анахов С.В., Гузанов Б.Н., Матушкин А.В., Мичуров Н.С. О соблюдении регламентных норм на качество резки при производстве сварных соединений // Компетентность / Competency (Russia). – 2024. – № 5. – С.56–62.
4. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В. Патент на изобретение «Плазмотрон» № 2754817 от 07.09.2021.

СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИН В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск
spinor03@gmail.com

Одной из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения является ветвление трещины, которое наблюдается в материалах различной природы. 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.

Одной из малоизученных проблем современной механики и физики разрушения твердого тела является ветвление трещины, которое наблюдается в различных материалах [1–6]. На сегодняшний день нет общепринятого критерия ветвления трещины, до конца не установлен физический механизм перехода трещины от прямолинейного распространения к ветвлению. В ряде работ, проведены исследования, измерены скорости распространения и ветвления трещины в полимерных материалах [2–6]; в конструкционном материале – сталях, исследования проводились в единичных работах, в которых измерения скорости ветвления трещины не проводились [1, 7].

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». 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 температуре до разрушения.

Для определения скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос, создана установка на основе быстродействующей платы АЦП для шины PCI LA-n10M8-100 и прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон», соединенных с компьютером. Преобразователь «Теркон» использовался для измерения температуры поверхности трубы и окружающей среды, давления внутри сосудов. Система токопроводящих полос, резисторов использовалась для измерения скорости трещины.

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 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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).

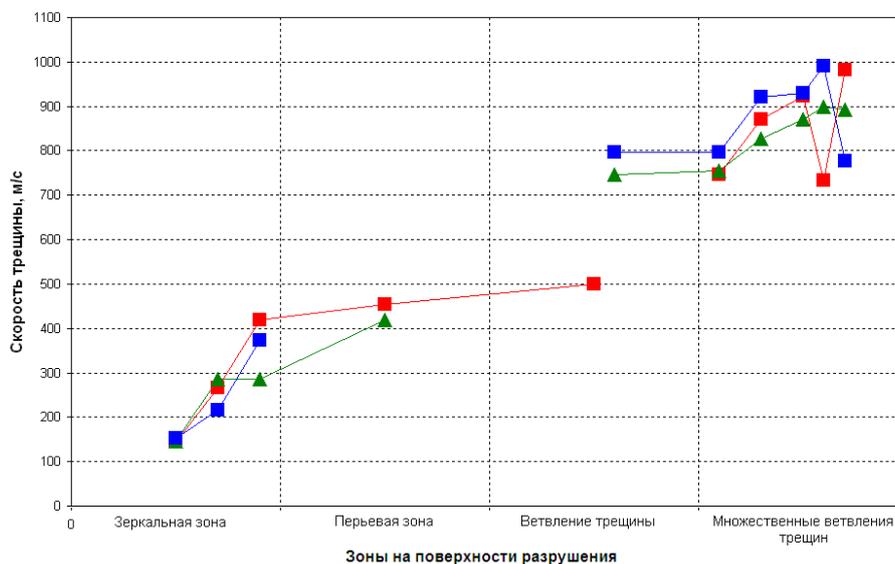


Рис. 1. Скорость трещины на различных этапах распространения, ветвления трещин в ПММА

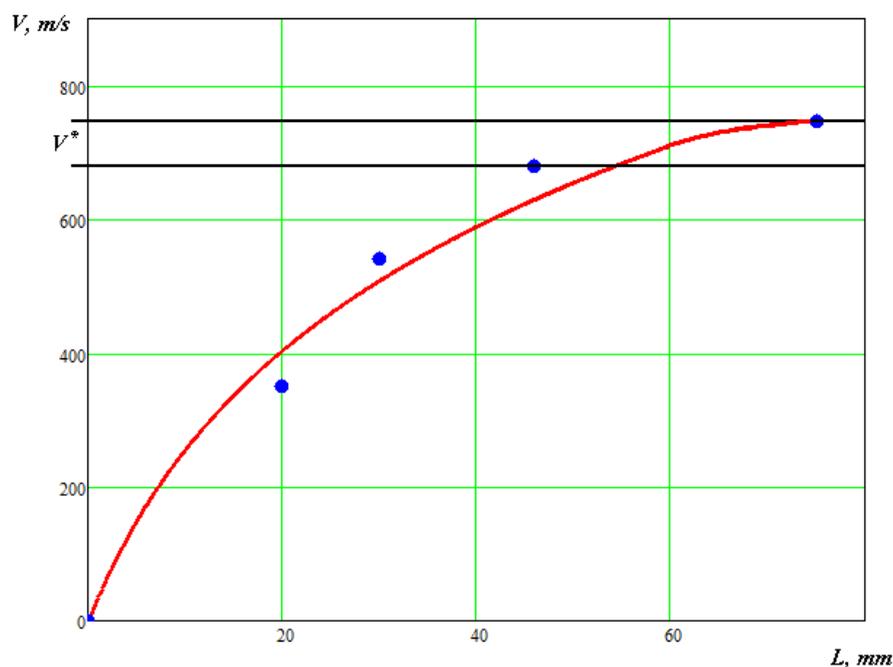


Рис. 2. Скорость трещины при прямолинейном распространении, ветвлении трещины в стали

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 $8-10^{\circ}$ к основной трещине, как до, так и после ветвления основной трещины, углы ветвления трещины составляют $40-60^{\circ}$, 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).

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

Литература

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. K. Ravi-Chandar, W.G. Knauss. 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. E. Sharon, J. Fineberg. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials. Physical Review B. 1996. V.54, № 10. P. 7128–7139.
5. Бедий И.Н. Исследование кинетики трещин в ПММА методом динамической фотоупругости // Проблемы прочности. 1991. № 9. С. 40–46.
6. О.Б. Наймарк, В.А. Баранников, М.М. Давыдова и др. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины // Письма в ЖТФ. 2000. Т.26, вып. 6. С. 67–77.
7. 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.: Машиностроение, 1977. С. 146–209.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-54-57

РАЗРУШЕНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Алексеев А.А., Иванов А.Р.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

spinor03@gmail.com

Объекты добычи, переработки нефти и газа, магистральные трубопроводы Республики Саха (Якутия) построены и функционируют в условиях Арктики, где ликвидация последствий аварий требует затрат значительных материальных и временных ресурсов. В работе рассмотрены разрушения магистральных трубопроводов при нарушении технологии изготовления труб (дефекты изготовления), при длительной эксплуатации (коррозионные дефекты), при деградации многолетнемерзлых грунтов с деформацией трубопровода и запорной арматуры. Показано, что причинами аварий на трубопроводах в Арктике, являются коррозионные повреждения, усталостные трещины на подземных трубопроводах, образование участков с непроектным положением трубопроводов, вследствие деградации многолетнемерзлых грунтов.

Надежность, безопасность трубопроводов, оборудования нефтяной и газовой промышленности особенно важна в условиях Арктики, где ликвидация аварий и катастроф требует значительных материальных и временных ресурсов [1, 2]. Климатические условия Арктики, отличается низкими климатическими температурами и резкой континентальностью. Период температур ниже 0 °С составляет около 210 суток, минимальная температура достигает 60 °С ниже нуля, разность средних температур составляет 100 °С. В зимний период обеспечение жизнедеятельности населенных пунктов с населением до 400 000 человек, промышленных и

горнодобывающих производств (нефть и газ, каменный уголь, алмазы, золото) полностью зависит от обеспечения энергоресурсами (газ, нефтепродукты, каменный уголь).

В работе рассмотрены причины аварий, разрушений на магистральных трубопроводах, металлоконструкциях, произошедших на территории Республики Саха (Якутия) с 2006 г. по 2020 г.

Одним из видов разрушений на трубопроводах, металлоконструкциях является коррозионное повреждение при длительной эксплуатации, характерное и частое для регионов центральной и сибирской части России, но редкое в полярных регионах России. Однако в последнее время участились аварии на магистральных газопроводах из-за коррозионного повреждения труб и в районах криолитозоны.

В 2006 г. на участке магистрального подземного газопровода Средневилюйское ГКМ – Матахское ГКМ – Якутск – Покровск произошел выброс газа, вследствие повреждения трубы 273*8 мм, эксплуатировавшейся с 1968 года с антикоррозионным покрытием из битумной мастики со стеклохолстом. При шурфовом обследовании по результатам визуально-измерительного контроля обнаружены коррозионные повреждения с наружной стороны газопровода на участке длиной 12 м в виде сквозных язв диаметром 10 и 12 мм, поверхностных язв диаметром 6–23 мм и глубиной 0,5–7 мм и питтингов (рис. 1), распределенных относительно равномерно по длине трубы. Фрактографическое исследование показало, что процессы коррозии характеризуются относительно равномерным проникновением коррозионного разрушения вглубь металла, происходили путем образования питтингов (рис. 1), характерны для процессов окисления при взаимодействии металла с коррозионной средой при электрохимическом механизме коррозии в почве из-за повреждения изолирующего слоя [3].

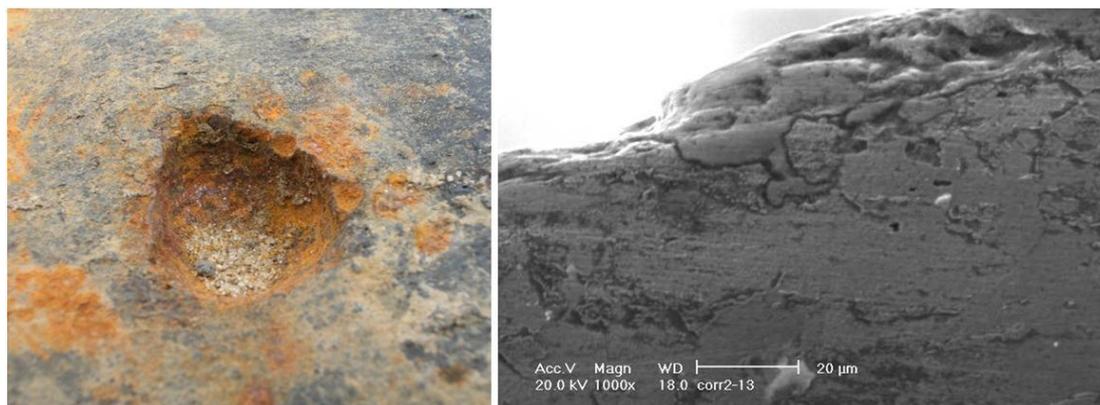


Рис. 1. Коррозионные язвы, разрушение путем образования питтингов

В 2018 г. произошла авария – выброс газа с воспламенением, образованием котлована 17*6 м глубиной 2,5 м, на 239 километре первой нитки магистрального газопровода «Таас-Тумус – Якутск» диаметром 530*8 мм, эксплуатировавшейся с 1967 года (рис. 2).



Рис. 2. Разрушенный участок 239 км 1 нитки МГ «Таас-Тумус – Якутск»

Визуально-измерительный контроль показал, что разрушение произошло по нижней части трубы на участке из 3 последовательно сваренных труб длинами 6 м, общая протяженность трещины и раскрытия составила 13430 мм, в котловане у очага разрушения были обнаружены фрагменты строительной арматуры. Фрактографическое исследование поверхности разрушения показало, что очагами разрушения явились коррозионные язвы, которые, являясь острыми концентраторами напряжений, послужили инициаторами зарождения многочисленных усталостных микротрещин; при слиянии усталостных микротрещин образовалась трещина критического размера, которая под давлением перекачиваемого продукта привела к распространению магистральной трещины по основному металлу в обе стороны к соседним трубам. Коррозионные повреждения возникли при контакте/нахождении в непосредственной близости металла трубы и арматуры по механизму гальванической/контактной коррозии [4].



Рис. 3. Общий вид разрушения газопровода

Другим видом разрушения является разрушения, вследствие нарушения технологии изготовления труб газо-нефтепроводов. В 2006 г. в РС (Я) произошло разрушение участка подземного магистрального газопровода из труб диаметром 530x7 мм, изготовленных методом контактной сварки токами высокой частоты, при производстве пневматических испытаний давлением $P_{исп}=5,6$ МПа при температуре -42 °С, которое сопровождалось выбросом грунта и раскрытием газопровода (рис. 3).

Разрушенный участок состоит из трех труб, сваренных двумя монтажными кольцевыми стыками, где средняя труба разрушилась путем движения магистральной трещины по оси продольного заводского сварного соединения прямолинейно с раскрытием по всей длине шва; разрушение первой и третьей по ходу газа труб – трещины с криволинейной траекторией, которые проходили по основному металлу и перед остановкой закольцевались – явилось продолжением разрушения средней трубы. По результатам микроструктурных, фрактографических исследований, установлено, что в зоне сварного соединения трубы сформирована мартенситная структура, которая вызывает в сварном соединении склонность к образованию хрупких закалочных трещин, очагами разрушения явились поверхностные трещиноподобные дефекты сварного соединения, образовавшиеся до полного охлаждения сварного соединения после сварки. К разрушению привело нарушение технологии сварки продольного сварного соединения разрушенной трубы, которая заключается в присутствии трещиноподобных дефектов в сварном соединении; нарушении режимов термообработки, что привело к формированию закалочных структур [5].

Следующий вид разрушения связан с деградацией многолетнемерзлых грунтов при эксплуатации конструкций: при оттайке участков мерзлых пород под фундаментами металлоконструкций и на участках подземной прокладки трубопроводов происходят просадки и перемещения грунтов, вследствие чего конструкции деформируются, переходят в непроектные пространственные положения.

В ноябре 2005 г. на скважине Мастахского ГКМ разрушилась коренная задвижка ЗМС 65х35 фонтанной арматуры при давлении в устье арматуры 10,5 МПа, температуре воздуха – 34 °С, после 25 лет эксплуатации. В ходе исследований установлено, что поверхность излома полностью покрыта продуктами окисления, а часть поверхности – слоем нефтепродуктов, что свидетельствует о стадийности процесса разрушения детали. Поверхность излома содержит два расположенных рядом очага разрушения, зону ускоренного развития трещины и зону долома; очаг разрушения, расположенный с внутренней стороны задвижки, состоит из слившихся многочисленных очагов усталостных микротрещин в виде характерных для малоцикловой усталости «язычков». Исследования показали, под влиянием внутреннего давления в области стыковки внутренних цилиндров с технологическим изменением толщины, создающим концентрацию напряжений, зародились источники многоочагового малоциклового усталостного разрушения; распространение усталостных микротрещин вызвало объединение двух близко расположенных зон усталостного разрушения, что вызвало раскрытие трещины, затем произошло катастрофическое хрупкое разрушение детали по всему сечению [6].

Таким образом, выполненный анализ показывает, что причинами возникновения аварий, разрушений трубопроводов, являются, ошибки в проектировании, нарушения технологии изготовления, условий и режимов эксплуатации, деградация свойств материалов при длительной эксплуатации.

Литература

1. С.Н. Мокроусов. Проблемы обеспечения безопасности магистральных и межпромысловых нефтегазопроводов. Организационные аспекты предупреждения несанкционированных врезок // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 9. С. 16–19.
2. Смирнов А.Н., Герике Б.Л., Муравьев В.В. Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов. Новосибирск: Наука. 2003. 244 с.
3. А.А. Алексеев, А.М. Большаков, А.С. Сыромятникова / Исследование коррозии газопровода в условиях Арктики // Территория Нефтегаз. 2018. № 11. С. 58–61.
4. A. Syromyatnikova, A. Bolshakov, A. Ivanov, A. Alexeev, K. Bolshev, Ya. Andreev. The corrosion damage mechanisms of the gas pipelines in the Republic of Sakha (Yakutia). *Structural Integrity Procedia*. 20. 2019. P. 259–264.
5. A.A. Alexeev, A.S. Syromyatnikova, A.M. Bolshakov, A.R. Ivanov. Fracture of a gas pipeline manufactured by high frequency current welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1023. 2021. 012003. P. 1–6.
6. Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности / Н.И. Голиков, А.С. Сыромятникова, А.А. Алексеев и др. // Газовая промышленность. 2007. № 7. С.87–89.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДЕЛИ ТРУБОПРОВОДА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

Аммосов Г.С., Иванов Д.С., Антонов А.А., Терешкин А.Л.,

Яковлев Ю.А., Большев К.Н.

Институт физико-технических проблем Севера им В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

ammosov.g@mail.ru

Подземные трубопроводы, проложенные в области криолитозоны, меняют свое положение в моменты замерзания и оттаивания грунта. На некоторых участках наблюдается неравномерная сложная деформация трубопровода, проявляющаяся в виде нескольких арок и без интервалов переходящих одна в другую. В статье представлен экспериментальный стенд для моделирования морозных пучений по разработанной ранее математической модели взаимодействия подземного трубопровода с грунтом.

Введение. Магистральные трубопроводы с большой протяженностью в районах многолетней мерзлоты подвергаются различным экзогенным процессам. Одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность, является их взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами.

Нами выявлен участок левого берегового склона на протоке Табагинская, где дважды в год происходят сезонные экзогенные процессы в виде морозного пучения и протаивания грунта, влияющие на НДС трубопровода. 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 плано-высотного положения (ПВП) трубопровода [1].

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 [2]. Вследствие этого в трубопроводе возникают непроектные воздействия, приводящие к изменению ПВП. В результате появляются участки изгиба от сжимающих напряжений в осевом направлении, также могут развиваться значительные растягивающие осевые напряжения. Это приводит к потере устойчивости, появлению дополнительных напряжений изгиба и вызвать разрушение. К настоящему времени разработаны модели, учитывающие развитие неравномерных подвижек трубы с вычислением характера распределения напряжений [3–8], авторы исследуют только участки с пучинистым грунтом и в результате получают деформации в виде одиночных арок.

Материалы и методы исследования. В отличие от исследованных случаев, на магистральном 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. Наиболее близка к реальным измеренным данным натурального объекта математическая модель, представленная в работе [9].

Для оценки пределов работоспособности математической модели, разработанной авторами [9], подготовили экспериментальный стенд по исследованию напряженно-деформированного состояния трубы при воздействии морозных пучений. На рисунке 1 показана схема стенда для моделирования воздействия морозных пучений на трубопровод. Испытуемая труба 1 опирается на верхние упоры 2 на ее краях. В середине трубы установлен винтовой домкрат 3.

В качестве испытуемой трубы была использована труба из стали марки Ст3кп с внешним диаметром 76 мм и толщиной стенки 3,2 мм. Расстояние между верхними упорами 2,26 м. Посередине между упорами установлен винтовой домкрат с шагом винта 2 мм на 1 оборот.

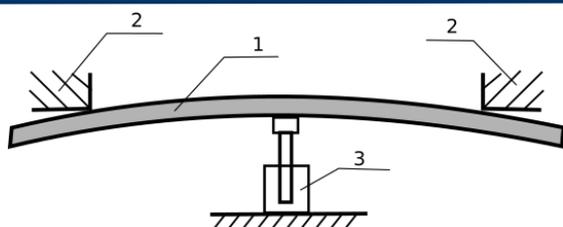


Рис. 1. Схема модели воздействия морозных пучений на трубопровод. 1 – испытываемая труба. 2 – верхние упоры. 3 – винтовой домкрат

Действие тензорезисторов основано на использовании эффекта изменения омического сопротивления датчика при изменении удельного сопротивления и геометрических размеров его чувствительного элемента [10, 11].

На экспериментальном стенде (рис. 2) для регистрации деформации использовали резистивные тензодатчики ВФ1К-3АА с сопротивлением $1000\Omega \pm 0,1$ и коэффициентом чувствительности $2,15 \pm 1\%$. Изменение омического сопротивления тензорезистора соответствует деформации в точке поверхности детали, на которую наклеен тензодатчик ВФ1К-3АА. Данные изменения сопротивления фиксировались преобразователем сигналов ТС и ТП «Теркон» и регистрировались через программное обеспечение «Теркон».

При исследовании деформации необходимо соблюдение технологического процесса подготовки, включающего последовательное выполнение основных операций [10, 11].

Монтаж тензорезисторов проводился на трубу диаметром D86 из стали марки СтЗкп, на верхней и боковой образующих. Длина трубы составляет 2942 мм, толщина 4 мм, от левого края на расстоянии 1610 мм находится место нагрузки (рис. 1). На расстоянии 130 и 545 мм от оси нагрузки P наклеены боковые тензодатчики, а на верхней образующей – на 145 и 530 мм. При измерениях необходимо учитывать изменения сопротивления тензорезисторов по истечении времени.

Измеряя сопротивления, полученные тензодатчиками, определяли удлинение трубы, далее вычисляли напряжение и сравнивали их с вычисленными по нашей математической модели. Цель эксперимента заключалась в определении максимальных значений напряжений, при которых модель демонстрировала приемлемые результаты.

Результаты измерений. Комплекс измерений проводили через два оборота винта домкрата. Таким образом, между измерениями труба деформировалась на 4 мм. На рис. 3–6 измеренные точки обозначены квадратами. Между этими точками проведена сплошная линия, которая интерполирует положения трубы. Пунктиром показана прямая, соединяющая концы трубы.

Начальное сопротивление тензорезистора перед деформацией было 100,338 Ом. Результаты первого измерения верхней образующей трубы после подъема домкрата на 4 мм показаны на рис. 3, а на рис. 4 – результаты вычисления напряжений.

Измерение сопротивления тензорезистора показало значение 1000,773 Ом, что соответствует относительному удлинению верхней образующей трубы посередине равному $2,17 \cdot 10^{-4}$. При таком удлинении механическое напряжение на поверхности трубы составляет 43 МПа.

После нагрузки, создаваемой домкратом, верхнюю образующую трубы измеряли в семи точках с помощью тахеометра модели СХ-106 геодезическим методом. В эксперименте измеренные координаты семи точек стали входными данными для нашей модели. Исходя из этих данных, модель вычисляла возникшие механические напряжения.

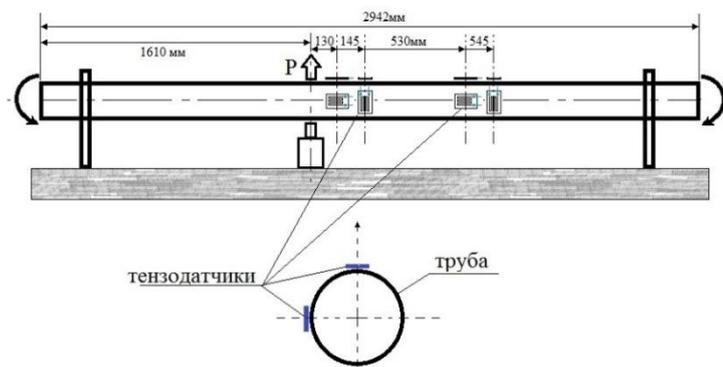


Рис. 2. Экспериментальный стенд по исследованию напряженно-деформированного состояния трубы для оценки пределов работоспособности математической модели

Данные изменения сопротивления фиксировались преобразователем сигналов ТС и ТП «Теркон» и регистрировались через программное обеспечение «Теркон».

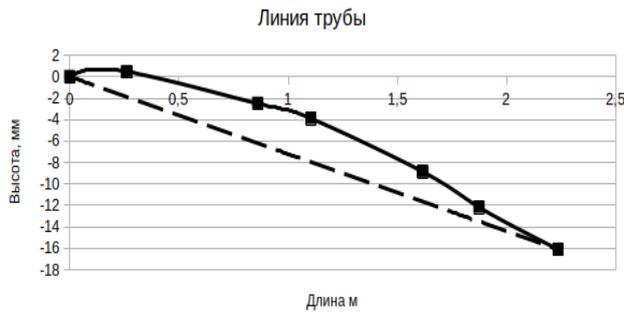


Рис. 3. Форма трубы после деформации на 4 мм

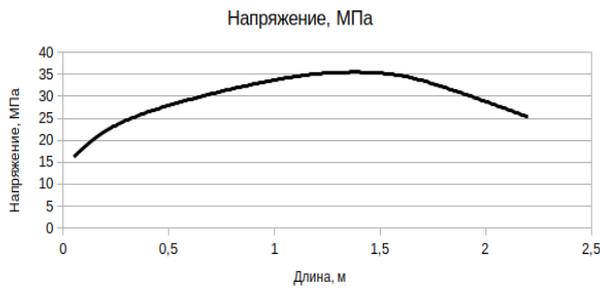


Рис. 4. Вычисленные напряжения после деформации на 4 мм



Рис. 6. Вычисленные напряжения после деформации на 8 мм

Результаты измерения формы трубы после двух оборотов домкрата, деформация на 8 мм, показаны на рис. 5. Результаты обработки математической модели – на рис. 6. Сопротивление тензорезистора 1000,980 Ом, что соответствует механическому напряжению посередине 64 МПа.

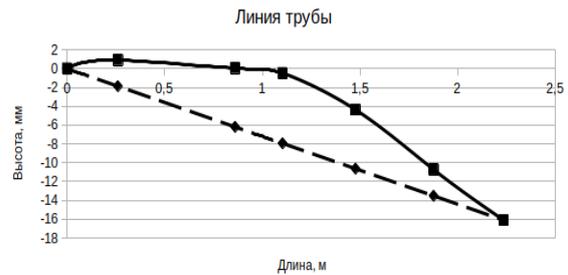


Рис. 5. Форма трубы после деформации на 8 мм

Форма трубы после деформации на 12 мм, представлена на рис. 7. Соответствующий этим данным результат обработки по математической модели – на рис. 8, сопротивление тензорезистора 1001,074 Ом, а механическое напряжение посередине 74 МПа.

Обсуждение. В таблице 1 сведены механические напряжения, вычисленные с помощью нашей математической модели и полученные измерением сопротивления тензорезистора.

Оценки напряжений по данным математической модели и из показаний тензорезистора совпадают в пределах до 40 МПа. Показания 35 МПа и 43 МПа можно считать сопоставимыми, так как они не представляют точные значения, а являются оценочными. При напряжениях, оцененных из показаний тензорезистора ~60 МПа, математическая модель начинает выдавать неустойчивые решения (рис. 6). При более высоких напряжениях решения нашей математической модели существенно расходятся (рис. 8).

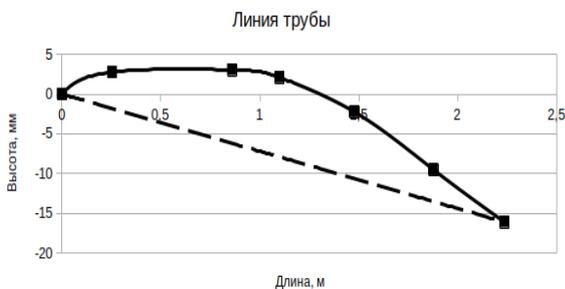


Рис. 7. Форма трубы после деформации на 12 мм

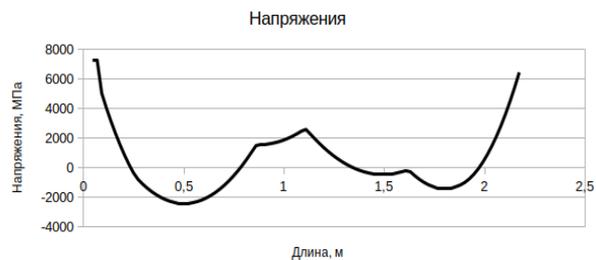


Рис. 8. Вычисленные напряжения после деформации на 12 мм

Таблица 1. Механические напряжения на середине верхней образующей трубы в зависимости от деформации

Деформация, мм	Математическая модель, МПа	Тензорезистор, МПа
4	35	43
8	80	64
12	–	74

Выводы. Разработанная математическая модель взаимодействия подземного трубопровода с грунтом предоставляет возможность оценить механические напряжения в трубопроводе на основе измерений планово-высотных положений трубопровода и демонстрирует удовлетворительные результаты и точность оценки напряжений в пределах 40 МПа.

Для расширения верхнего предела применимости нашей модели в возможности оценки при более высоких значениях напряжений в подземных трубопроводах необходимо проведение дальнейшей работы.

Литература

1. Antonov A.A., Yakovlev Yu.A., Kornilova Z.G., Tereshkin A.L. Monitoring of spatial position of the underwater crossing of MGL across the Lena river by instrumental methods // *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 30. P. 11–16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.003>
2. Permyakov P.P., Kornilova Z.G., Ammosov G.S. Concerning the Bottom Ero-sion 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.
3. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: Учеб. Пособие / Л.И. Быков [и др.]. СПб.: Недра, 2006. 824 с.
4. Эксплуатационная долговечность нефтепроводов / В.В. Курочкин, Н.А. Малюшин, О.А. Степанов, А.А. Мороз. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 231 с.
5. Айнбиндер, А. Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.
6. Бородавкин, П. П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1986. 224 с.
7. Горковенко А. И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов: дис. док. техн. наук: 25.00.19: утв. 13.10.2006. Тюмень, 2006. 305 с.
8. Иванов И.А., Кушнир С.Я. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов. СПб.: Недра, 2010. 174 с.
9. Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Корнилова З.Г. 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.
10. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие / В.А. Мехеда. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
11. Денисенко В.В. Датчики на основе тензорезисторов и принципы их применения в измерениях // *Современные технологии автоматизации*. 2013. № 4. С. 88–92.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЕЙСТВУЮЩЕГО НАДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Антонов А.А., Корнилова З.Г., Яковлев Ю.А., Корнилова В.В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Santaz7@rambler.ru

В данной статье рассматривается оценка остаточной работоспособности надземного трубопровода с учетом выявленных дефектов в сварных соединениях. Для анализа технического состояния трубопровода были использованы методы неразрушающего контроля. Результаты расчетов показали, что надземный трубопровод практически исчерпал свой эксплуатационный ресурс и его дальнейшая эксплуатация невозможна без проведения соответствующих ремонтных работ.

Введение. Надземная прокладка трубопроводной магистрали предоставляет удобство при проведении осмотров, ремонтов или замене конкретных участков, исключая необходимость земляных работ. Кроме того, прокладка магистрали не требует копания траншей, что снижает ее стоимость, в среднем на 20–30%, по сравнению с подземными трубопроводами. Не менее важным аспектом является возможность визуального контроля состояния трубопровода. Открытая конструкция позволяет быстрее выявить возникающие дефекты и оперативно реагировать на них. Это способствует повышению надежности системы в целом и снижает вероятность возникновения серьезных инцидентов.

Надземные магистрали не оказывают воздействия на естественный тепловой режим вечномёрзлых грунтов, что крайне важно для прокладки трубопроводов в северных областях нашей страны. Поскольку трубы в надземном исполнении не соприкасаются с грунтом, они подвержены меньшей коррозии, чем подземные трубопроводы.

Учитывая все эти преимущества, надземные трубопроводы становятся оптимальным решением для многих регионов, особенно в условиях суровых климатических условий северных широт.

В данной работе проведена оценка остаточного ресурса действующего надземного трубопровода с учетом дефектности сварных соединений. Трубопровод, проработавший более 25 лет, состоит из труб диаметрами 159 мм, толщиной 8 мм и 219 мм, толщиной 6 мм. Протяженность трубопровода составляет 2700 м. Рабочее давление – 1,2 МПа, температура 200 °С, согласно [1] при рабочем давлении от 0,07 до 1,6 МПа, и температуре эксплуатации от 155 до 250 °С трубопровод относится к IV-ой категории. Длина паропровода из труб Ø 219 мм – 800 м, Ø 159 мм – 170 м.

Магистральные трубопроводы на Крайнем Севере эксплуатируются в условиях сильных перепадов температур от -60 до 40 °С. Внутреннее давление транспортируемого топлива сравнительно небольшое (1,2 МПа) и основной вклад в напряженное состояние трубопровода вносят нагрузки, обусловленные температурным перепадом. Результаты натурных исследований сварных соединений магистрального трубопровода диаметром 630 мм показали, что наибольшие напряжения возникают в местах поворота (как в плане, так и профиле) трубопровода [2]. Это согласуется и с данными работы [3].

Материалы и методы исследования. Для оценки технического состояния трубопровода были использованы основные распространенные методы неразрушающего контроля, такие как визуально-измерительный контроль, толщинометрия, определение твердости, радиографическое просвечивание.

Визуально-измерительный контроль сварных соединений осуществлялся посредством внешнего осмотра как невооруженным глазом, так и с применением лупы. Основное внимание уделялось выявлению дефектов швов, таких как трещины, подрезы, поры, свищи, прожоги, наплывы и непровары в нижней части швов.

Контроль размеров сварных швов проводился с использованием измерительных инструментов с точностью $\pm 0,1$ мм. Для измерений применялись штангенциркуль и УШС-3. Кроме того, осуществлялся внешний осмотр трассы трубопровода на предмет смещения газопроводов, наличия вибраций, сплющивания, недопустимых прогибов и повреждений опор.

Для оценки коррозионного износа труб и зон сварных соединений проводились измерения толщины стенок с помощью ультразвукового толщиномера Булат-1М с погрешностью $\pm 0,1$ мм.

Рентгенографический контроль сварных стыков трубопровода выполнялся с использованием аппарата АРИНА-1, чувствительность контроля 0,3, после предварительной очистки сварного соединения от неровностей, шлака, брызг металла, окалины и других загрязнений. Контроль проводился через две стенки с размерами пленок 300×70 мм и углом экспозиции 120° .

Результаты и обсуждение. По результатам визуально-измерительного контроля выявлены следующие недопустимые дефекты: поры размерами от 1 до 2,5 мм; подрезы глубиной от 1 мм до 2,5 мм; свищи диаметром до 3 мм; механические повреждения глубиной до 2 мм.

Внешние геометрические размеры сварных швов трубопровода диаметрами в основном отвечают нормативным требованиям.

С другой стороны, практически все сварные швы трубопровода диаметром 159 мм выполнены с недопустимым смещением кромок шва от 1,5 до 3,5 мм, что превышает максимально допустимые смещения по нормативу [1]. На сварных швах трубопровода диаметрам 219 мм недопустимые смещения кромок шва отсутствуют.

Из [4, 5] получим выражения для определения опасной величины смещения кромок:

$$\Delta_{\text{оп}} = \delta \cdot \left[\frac{m \cdot R_2^H \cdot \delta}{0,405 \cdot k_H \cdot p \cdot D_{\text{вн}}} - \frac{10}{9} \right], \quad (1)$$

если $0 \leq \Delta/\delta \leq 0,8333$;

$$\Delta_{\text{оп}} = \delta \cdot \left[\frac{m \cdot R_2^H \cdot \delta}{0,675 \cdot k_H \cdot p \cdot D_{\text{вн}}} - \frac{1}{3} \right] \quad (2)$$

если $\Delta/\delta \geq 0,8333$.

Однако опыт освидетельствования качества сварных швов и результаты проведенных испытаний показывают, что этот диапазон целесообразно ограничить пределами $0 \leq \Delta/\delta \leq 0,5$, т. е. считать, что предельно опасной является величина смещения, достигающая половины толщины стенки:

$$\Delta_{\text{пр}} = \delta \cdot 0,5 \quad (3)$$

В этом случае окончательное выражение для определения величины смещения кромок $[\Delta]$ запишется:

$$[\Delta] = \min \left\{ \delta \cdot \left(\frac{m \cdot R_2^H \cdot \delta}{0,405 \cdot k_H \cdot p \cdot D_{\text{вн}}} - 1,11 \right); 0,5 \cdot \delta \right\} \quad (4)$$

где: R_2^H – нормативное сопротивление растяжению (сжатию) металла, которое принимается минимальному значению предела текучести, МПа; m – коэффициент условий работы трубопровода; k_H – коэффициент надежности по назначению трубопровода, p – нормативное (рабочее) давление, МПа; $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубопровода, мм; Δ – величина смещения кромок, мм; δ – толщина сварного соединения, мм.

Определим допустимую величину смещения кромок сварных стыков паропровода из условия обеспечения напряженно-деформированного состояния существующим требованиям. По формуле (4) получим:

$$[\Delta] = \min\{7,2; 4\} \quad (5)$$

Таким образом, при смещении кромок кольцевых сварных стыков паропровода до 4 мм напряженно-деформированное состояние не превышает установленных требований. Обнаруженные сварные стыки со смещением кромок до 4 мм, при условии отсутствия других дефектов, могут быть допущены к дальнейшей эксплуатации без проведения ремонтных мероприятий, при этом их эксплуатационная надежность будет обеспечена.

Результаты измерений фактической толщины стенки труб диаметрами 219 и 159 мм приведены на рис. 1.

Трубы, детали трубопроводов подлежат отбраковке, если за срок, обеспечивающий остаточный ресурс до очередного технического освидетельствования (ревизии), выполняемого предприятием-владельцем, фактическая толщина стенки из-за коррозионного и эрозионного износов уменьшится и станет равной или выйдет за пределы отбраковочных значений в соответствии с требованиями.

Толщина линейной части трубопровода варьируется: трубы Ø 219 – от 5,6 до 6,0 мм; трубы Ø 159 мм – от 4,7 до 5,4 мм. Наименьшая допустимая толщина стенки для марки стали Ст3, мм: для труб Ø 219, 159 мм – 3,5 мм по [6].

Оценка остаточного ресурса основных несущих элементов трубопровода, повреждающим фактором для которого является общая коррозия, производится по формуле:

$$T_{\text{ост}} = \frac{K(S_{\text{ф}} - S_{\text{отб}})}{A_{\text{ф}}} \quad (6)$$

где: $T_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс элемента, годы; $S_{\text{ф}}$ – фактическая толщина элемента, мм; $S_{\text{отб}}$ – отбраковочная толщина элемента, мм; K – коэффициент, зависящий от категории и срока службы трубопровода без замены; $A_{\text{ф}}$ – фактическая скорость коррозионного и эрозионного износа, мм.

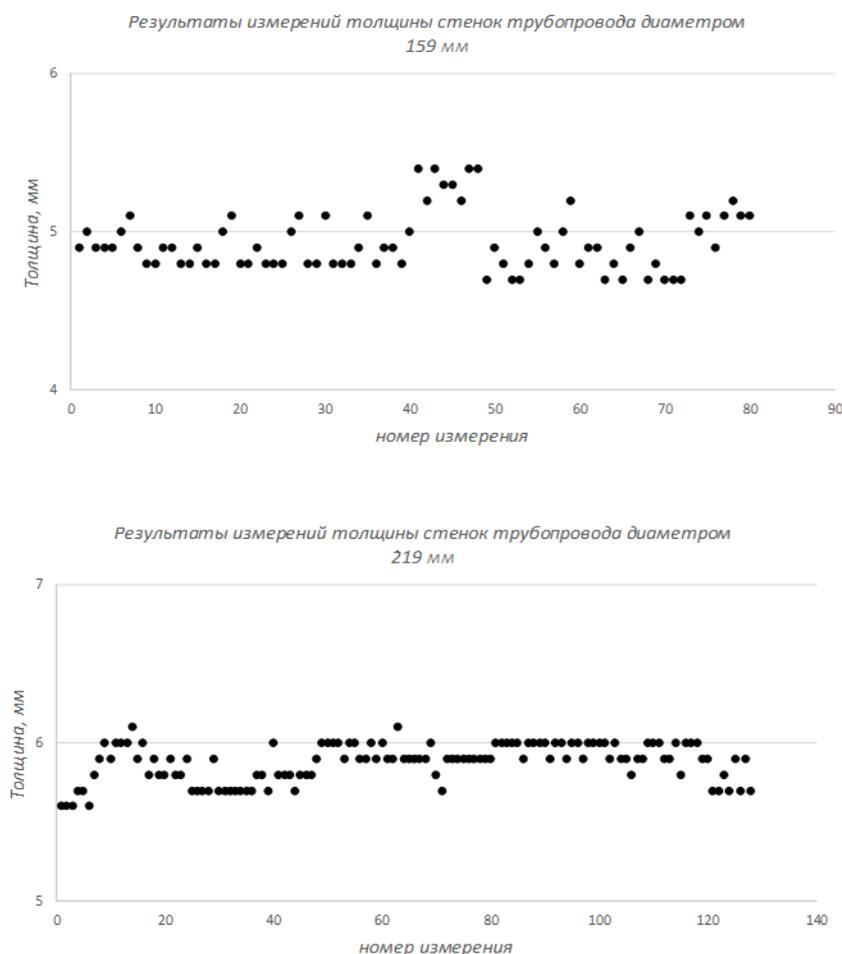


Рис. 1. Результаты измерений толщины стенок труб диаметрами 159 и 219 мм

Для трубопроводов IV-ой категории – $K = 1,00$. С учетом продолжительности эксплуатации паропровода, равной примерно 25 лет, средняя скорость коррозии стенки труб составляет 0,1 мм/год. Исходя из этого, расчетный остаточный ресурс труб паропровода по толщине: для труб $\varnothing 219$ мм – 21 год, $\varnothing 159$ мм – 12 лет. Но по [7], в тех случаях, когда расчетный остаточный ресурс трубопровода превышает десять лет, остаточный ресурс принимается равным десяти годам.

Радиографический контроль, в объеме 3% от общего числа однотипных стыков трубопровода, показал 100% негодность сварных соединений, по [1]. Следовательно, остаточный ресурс сварных соединений стыков трубопровода полностью исчерпан.

В сварных соединениях трубопроводов непровары корня шва, изначально имевшие значения недопустимые по глубине и длине, за период эксплуатации под влиянием концентраторов напряжений и двуосного напряженного состояния за счет эксплуатационных нагрузок и непредусмотренных природно-климатических воздействий, достигли глубины от 1,5 до 3,0 мм по результатам радиографического контроля.

Выводы. Трубопровод практически полностью исчерпал свой ресурс, и его дальнейшая эксплуатация допускается только после 100% контроля сварных швов рентгенографическим методом и последующим устранением всех обнаруженных дефектов сварных соединений стыков труб, а также проведения повторного полного технического обследования.

При должном проведении ремонтно-восстановительных работ трубопровод будет пригоден к эксплуатации в течение 10 лет.

Литература

1. ПБ 10-573-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов горячей воды и пара. 128 с.
2. Аммосов А.П., Голиков Н.И. Оценка остаточного ресурса сварных соединений действующего надземного трубопровода // Сварочное производство. 1999. № 11. С. 20–22.
3. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. Л.: Недра, 1990. 180 с.
4. Методы оценки работоспособности труб технологических газопроводов / А. Я. Яковлев [и др.]. М.: Изд. ООО «ЛитНефтеГаз», 2008. 272 с.
5. Антонов А.А., Яковлев Ю.А., Корнилова З.Г. Определение допустимого смещения кромок сварных соединений паропровода // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Том 1. Якутск: Цумори Пресс, 2018. С. 513–517.
6. ОСТ 108.031.09-85 «Котлы стационарные паровые и водогрейные и трубопроводы пара и горячей воды. Нормы расчета на прочность».
7. Методика оценки остаточного ресурса трубопроводов пара и горячей воды III и IV категорий. АООТ «ВНИКТИ нефтехимоборудование». Волгоград, 1997. 23 с.

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ЭЛЕКТРОМУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Петров Д.Д.

ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

Dhv4071@mail.ru

В работе приведены описания разработок методик испытаний, использующихся при контроле качества сварных соединений полиэтиленовых труб. Сварные соединения были получены сваркой с помощью деталей с закладным нагревателем. Известно, что существующие методы испытаний являются недостаточно информативными. В связи с этим разработаны новые методики испытаний на прочность. Показано, что данные методики могут использоваться при разработке новых технологий сварки труб с помощью деталей с закладным нагревателем.

Введение. Сварка с помощью деталей с закладными нагревателями (или электромуфтовая сварка) повсеместно применяется для прокладки трубопроводов из полимерных труб. Часто данный способ сварки оказывается единственным эффективным средством для формирования сложных узлов, а также при ремонтных работах. Процесс электромуфтовой сварки полимерных труб заключается в соединении труб за счет нагрева детали путем подачи напряжения через металлическую спираль, установленную внутри детали (фитинга).

На рис. 1 приведены этапы процесса электромуфтовой сварки. Перед выполнением сварки производится очистка от грязи и циклевка поверхности свариваемых труб. Далее концы труб вводят в электросварной фитинг, сварочный аппарат подключается к контактам фитинга и подает на спираль ток строго определенных параметров. Выделяемое при этом тепло расплавляет полиэтилен, материал пластифицируется и соединяет свариваемые элементы, заполняя пространство между ними. После остывания трубы и соединительная деталь образуют единую конструкцию. Получающееся с помощью данной технологии сварное соединение считается наиболее надежным вариантом сварки полимерных труб.



Рис. 1. Этапы процесса электромуфтовой сварки полимерных труб

Согласно нормативному документу СП 42-103-2003 [1] контроль качества полученных сварных соединений рекомендовано проводить такими видами испытаний как: внешний осмотр, пневматические, испытания на стойкость к сплющиванию, испытания на стойкость

при постоянном внутреннем давлении. Однако данные виды испытаний являются недостаточно информативными и на практике выдерживают даже сварные соединения, выполненные с нарушениями технологии.

Кроме приведенных в СП 42-103-2003 существует способ испытания на определение стойкости к расслоению [2], в котором образцы растягивают на разрывной машине закрепив основной материал трубы с одной стороны и электромuftу с другой (рис. 2). Недостаток этого способа в том, что метод применим для соединений с номинальным внешним диаметром больше или равном 90 мм, также разрушение часто происходит не по сварному шву, а в области основного материала трубы, или в области материала муфты по месту приложения нагрузки.

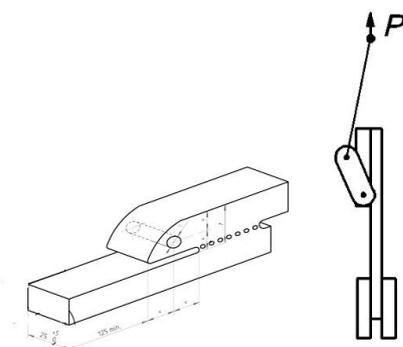


Рис. 2. Образец и схема испытаний на расслоение

В ИПНГ СО РАН были предложен оригинальный способ испытания муфтового сварного соединения [3], в котором перед сваркой на место будущего шва наносится дефект в виде вещества, препятствующего сшиванию поверхностей в этом месте (рис. 3.). Ширина дефекта составляет половину ширины образца, что уменьшает площадь сваренного участка на 50%. При испытаниях такого образца с искусственно уменьшенной площадью сварного шва расслоение происходит именно по сварному шву, а не по основному материалу. Недостатком этого способа является то, дефект наносится перед сваркой и данный способ пригоден для испытаний ранее сваренных соединений.

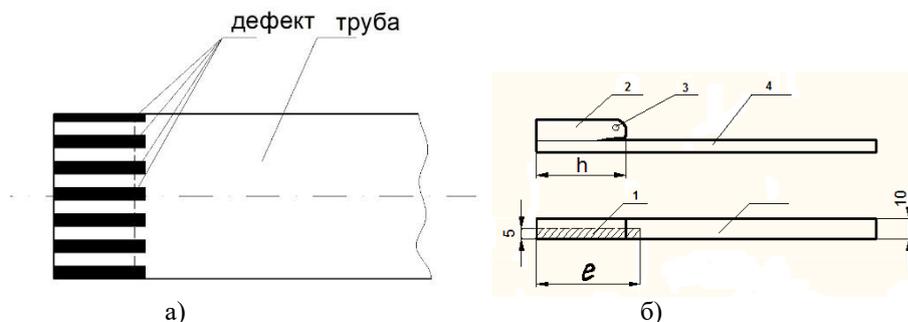


Рис. 3. Подготовка образцов для испытаний: а) схема нанесения дефекта на область сварки полимерной трубы; б) образец с дефектом

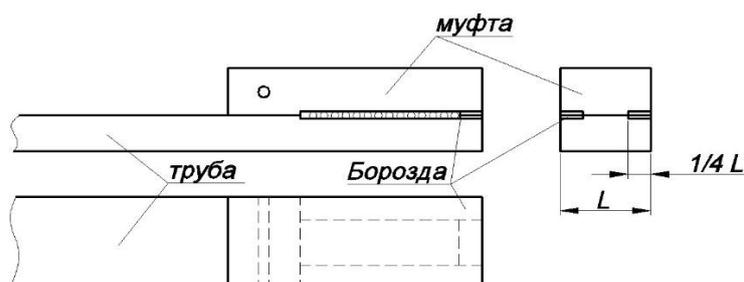


Рис. 4. Схема нанесения борозд на образце муфтового сварного соединения

Также в ИПНГ СО РАН разработан способ испытания муфтового сварного соединения, в котором нанесение дефекта в виде борозд происходит после сварки, перед испытанием муфтового сварного соединения [4]. Путем фрезерования, с обеих сторон образца, на всю длину сварного шва по зоне сплавления прорезаются борозды глубиной равной $\frac{1}{4}$ ширины образца (рис. 4). Далее проводятся испытания на расслоение согласно ISO 13954. Таким образом, данный вид испытания может применяться при исследованиях ранее сваренных электромуфтовых соединений ПЭ труб.

При исследованиях муфтовых сварных соединений, полученных при различных технологиях, была поставлена задача количественной оценки прочности всей области сварного шва. Для решения данной задачи в ИПНГ СО РАН была предложена методика, суть которой также заключается в уменьшении площади сварки. В отличие от предыдущих методик, здесь определение прочности производится при отрыве сваренного участка муфты от трубы специальными захватами [5]. Подготовка образцов сварных соединений также производится путем фрезерования борозд с двух сторон (рис. 5).

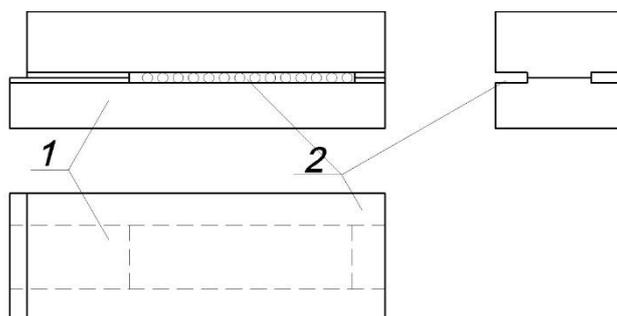


Рис. 5. Образец для испытаний на отрыв: 1 – образец; 2 – борозда

Для испытаний были изготовлены специальные захваты, позволяющие закрепить образец через борозды (рис. 6).

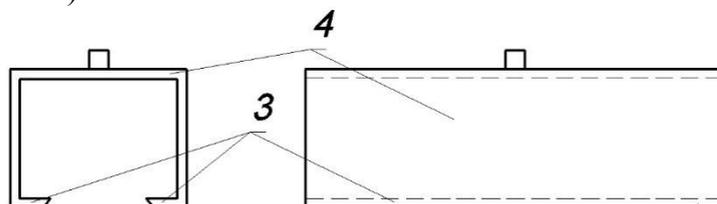


Рис. 6. Специальные захваты для испытаний на отрыв растяжением: 3 – рабочая часть; 4 – захват

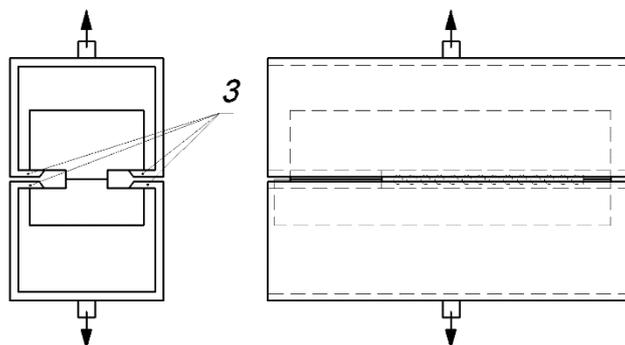


Рис. 7. Схема испытаний на отрыв растяжением специальными захватами

Захваты устанавливаются в зажимы разрывной испытательной машины (рис. 7). Испытания проводятся путем растяжения до полного отрыва сваренного участка муфты от основного материала трубы образца. При испытаниях фиксируется максимальная нагрузка, которую выдерживает образец. Таким образом, данной методикой можно количественно либо сравнительно определить общую прочность сварного шва по показаниям разрывной машины.

В результате исследований было показано, что существующие методики испытаний недостаточно эффективны при выборе наилучших технологий сварки. На основе испытаний на

расслоение были предложены оригинальные способы испытаний, позволяющие количественно оценить прочность сварных соединений, выполненных при различных режимах сварки. Данные методы вполне успешно можно использовать при разработке новых технологий сварки полимерных труб.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162-9. с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. СП 42-103-2003. Проектирование и строительство газопроводов из полиэтиленовых труб и реконструкция изношенных газопроводов. М.: Полимергаз, ФГУП ЦПП, 2004. 86 с.
2. ГОСТ Р 58121.1-2018. Пластмассовые трубопроводы для транспортирования газообразного топлива. Полиэтилен (ПЭ). Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 38 с.
3. Способ испытания муфтового сварного соединения полимерных труб: пат. 2457449 Рос. Федерация. № 2011104771/28 / Ботвин Г.В., Данзанова Е.В., Андреев Б.И., Герасимов А.И.; заявл. 09.02.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.
4. Способ испытания муфтового сварного соединения полимерных труб: пат. 2802888 Рос. Федерация. № 2022130847 / Петров Д.Д., Ботвин Г.В., Старостин Н.П., Данзанова Е.В.; заявл. 17.05.2022; опубл. 05.09.2023, Бюл. № 25.
5. Способ испытания муфтового сварного соединения полимерных труб на отрыв: пат. 2816000 Рос. Федерация. № 2023119010 / Петров Д.Д., Ботвин Г.В., Данзанова Е.В.; заявл. 19.07.2023, опубл. 25.03.2024, Бюл. № 9.

DOI: 10.24412/ci-37269-2024-1-69-71

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ СУВЕНИРНОЙ ПРОДУКЦИИ ИЗ БИВНЯ МАМОНТА

Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С., Исакова Т.А., Павлова В.В., Соловьев Т.М., Хабаров Д.Р.

ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

gleb-0379@mail.ru

Создание изделий из бивня мамонта (БМ) вручную сложная и кропотливая работа, соответственно цена на такие изделия остается высокой. Автоматизации процесса создания изделий из БМ значительно снизит его продолжительность и стоимость готовых изделий. Все большую актуальность с этой точки зрения приобретает внедрение современных цифровых технологий.

Введение. Создание изделий из бивня мамонта вручную сложная и кропотливая работа, соответственно цена на такие изделия остается высокой. Современный уровень развития техники и технологий предопределяет необходимость внедрения новых подходов к созданию недорогой сувенирной продукции. Наибольший интерес с данной точки зрения представляет специализированное автоматическое оборудование, оснащенное числовым программным управлением (ЧПУ) с успехом, применяемое в деревообработке [4, 6].

Создание 3D модели. Для автоматизации производства изделий из кости необходимо создание цифровой трехмерной (3D) модели. 3D модель можно создать с помощью программного обеспечения Zbrush, например, обладающего технологией «скульптинга», которая позволяет имитировать процесс лепки, моделирование идет от простой формы (рис. 1 а, б). Фотограмметрия – еще один из способов создания 3D-модели из нескольких изображений одного объекта, сфотографированного с разных углов [1–3,5]. Фотограмметрия позволяет определить

по снимкам исследуемого объекта его форму, размеры и пространственное положение в заданной системе координат, а также его площадь, объём, различные сечения на момент съёмки и изменения их величин через заданный интервал времени (рис. 1, в, г).

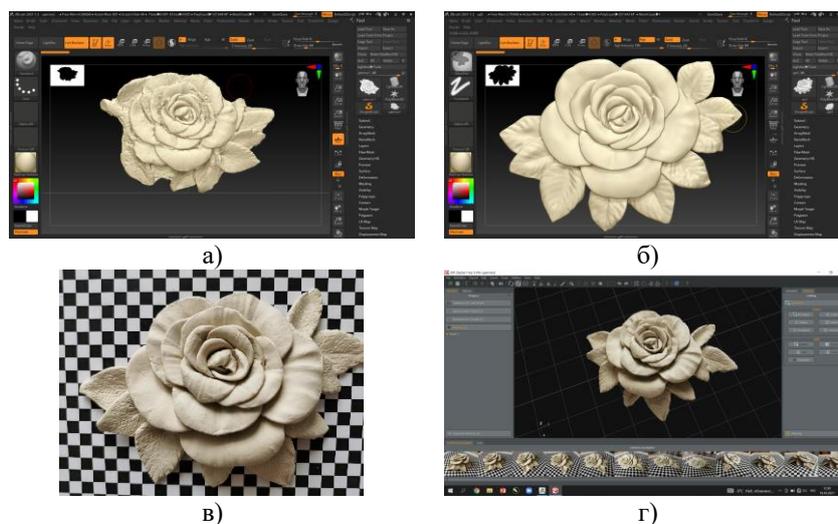


Рис. 1. Создание 3D модели

Параметры фрезерной обработки. Бивень мамонта ценный, невозобновляемый биологический материал, и чтобы не испортить его во время фрезерования нужно определить оптимальные режимы обработки.

Фрезерование проводили на пяти-осевом фрезерном станке с ЧПУ «NC-2030ASV-5D» конической сферической двухзаходной фрезой с радиусом при вершине 0,25 мм и углом конуса 10°. На образцах бивня мамонта размерами 35x35x10 мм вырезалось изображение цветка с параллельной фиксацией температуры нагрева обрабатываемой поверхности материала. Фрезерование проводилось по следующим режимам:

- Р-1. Скорость вращения фрезы $V_f=20000$ об/мин, скорость подачи фрезы $V_n=600$ мм/мин, шаг обработки $Ш=0,18$ мм;
- Р-2. $V_f=20000$ об/мин, $V_n=600$ мм/мин, $Ш=0,09$ мм;
- Р-3. $V_f=20000$ об/мин, $V_n=900$ мм/мин, $Ш=0,09$ мм;
- Р-4. $V_f=20000$ об/мин, $V_n=900$ мм/мин, $Ш=0,05$ мм;
- Р-5. $V_f=20000$ об/мин, $V_n=600$ мм/мин, $Ш=0,05$ мм;
- Р- 6. $V_f=20000$ об/мин, $V_n=600$ мм/мин, $Ш=0,02$ мм.

Таблица 1. Результаты фрезерования БМ

Параметры / Режимы	Р-1	Р-2	Р-3	Р-4	Р-5	Р-6
Время на обработку, мин.	7	17	15	32	42	80
Необходимость ручного шлифования	да	да	да	нет	нет	нет
Мах. Температура, °С.	118	87	102	75	59	35

На рисунке 2 приведены изображения поверхностей изделий при режимах Р-1, Р-2, Р-5. Достаточное качество поверхности изделия, не требующая ручного шлифования, было получено уже при режиме Р-5 (рис. 2, в).

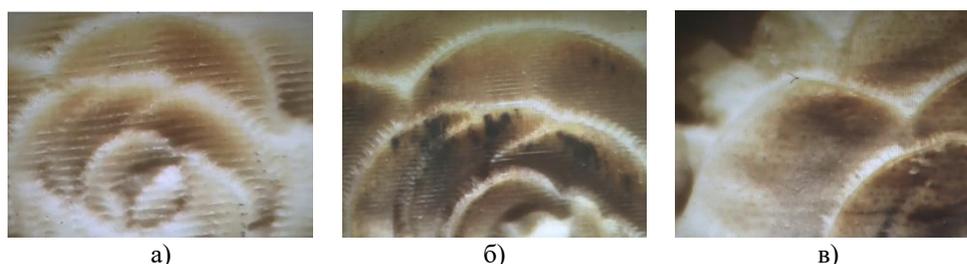


Рис. 2. Изображения поверхностей изделий: а)- режим Р-1; б)- Р-2; в)- Р-5.

Таким образом исходя из продолжительности создания изделия, качества обработанной поверхности и степени нагрева образца оптимальным режимом фрезерования БМ, для данного станка и фрезы, является режим Р-5. Полученное посредством фрезерования изделие не требует дополнительной обработки (рис. 3). После небольшой шлифовки изделие покрывается полировкой для придания блеска и защиты. Полученная таким образом изделие – точная копия нашей 3D модели. Подобным образом можно изготовить изделия практически любой формы и размера в зависимости от возможностей оборудования.



Рис. 3. Готовое изделие

Заключение. Для внедрения частичной, либо полной автоматизации производства серийных сувенирных изделий, либо для производства частей крупных составных изделий из бивня мамонта разной сортности перспективными являются технологии фрезерной резьбы. Автоматизация производства позволит массово производить изделия как для туристической отрасли, так и доступных рядовым потребителям. При этом разработка новых уникальных художественных изделий из резной кости будет оставаться сугубо творческим процессом и оставаться приоритетной областью мастеров-косторезов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР № 122042000008-5. Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

Литература

1. 3D-сканирование без 3D-сканера. Как получить трехмерную модель при помощи смартфона [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://xakep.ru/2019/07/03/3d-scan/> (дата обращения 20.12.2019).
2. The art of photogrammetry: how to take your photos [Электронный ресурс]. 2014. URL: <https://www.tested.com/art/makers/460142-art-photogrammetry-how-take-your-photos/> (дата обращения 20.12.2019).
3. Всё, что нужно знать о фотограмметрии [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://habr.com/ru/post/319464/> (дата обращения 20.12.2019).
4. Маслов В.Д., Сачков И.Н. Актуальные проблемы автоматизации промышленных предприятий // Вестник науки и образования: научный журнал. 2019. № 2(56). Часть 1. С. 48–51.
5. Немного о фотограмметрии или создании модели из фото [Электронный ресурс]. 2017. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/alorlov/a-little-about-photogrammetry-or-creating-a-model-from-a-photo/> (дата обращения 20.12.2019)
6. Шокорова Л.В., Турлюн Л.Н. Проблема взаимодействия традиционной резьбы по дереву с компьютерными технологиями // Мир науки, культуры, образования. 2013. № . 6 (43). С. 420–422.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ЯКУТИИ НА НАДЕЖНОСТЬ РЕССОР ГРУЗОВОГО АВТОТРАНСПОРТА МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННОГО РЯДА ОТКАЗОВ

Буслаева И.И.¹, Яковлева С.П.²

¹ Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

buslajeva@mail.ru

Проведено моделирование временного ряда отказов листовых рессор эксплуатирующихся в Якутии грузовых автомобилей КАМАЗ с использованием разложения в ряд Фурье. Предложена аддитивная модель, достаточно хорошо аппроксимирующая динамику отказов рессор. Показана взаимосвязь ритмологических особенностей ряда с условиями эксплуатации в криолитозоне. Полученные модели могут быть использованы для краткосрочного прогнозирования динамики отказов рессор при работе на Севере.

Одним из основных элементов транспортного комплекса Якутии является автомобильный транспорт, что определяет важность обеспечения эффективности его работы. На работоспособность автотранспорта значительное влияние оказывают меняющиеся по сезонам года условия эксплуатации. Для совершенствования системы технической эксплуатации автомобилей актуально знание закономерностей влияния сезонных условий на их отказы. На Севере условия эксплуатации техники характеризуются разнообразием переменных факторов и их сочетаний, но для автотранспорта наиболее значимыми являются температура воздуха и дорожные условия. Влияние дорожных условий, главным образом, определяется зависимостью уровня действующих на автотехнику динамических нагрузок от неровности дорог. С учетом того, что в Якутии 69% автодорог – грунтовые и сезонные, 43% – автозимники и ледовые переправы [1], дорожные условия эксплуатации автотранспорта в республике относятся к крайне неблагоприятным. В работе [2] проведены измерения профилей сезонных неровностей грунтовой автомобильной дороги в Центральной Якутии, обработаны данные и показано, что автокорреляционные функции профилей дороги по сезонам существенно различаются. Изучено влияние сезонных изменений на частоту колебаний рессоры грузового автомобиля КАМАЗ и выявлено, что осенью частота основного тона колебаний повышается почти в полтора раза по сравнению с зимним периодом, а в теплое время года появляются дополнительные колебания от мелких неровностей с более высокой частотой. Следует отметить, что на такие системы грузовиков КАМАЗ, как подвеска, к которой относятся рессоры, приходится существенное количество отказов при работе в северных регионах [3]. Очевидно, что изменение сезонных условий должно учитываться при оценке работоспособности элементов подвески, в том числе при создании соответствующих математических моделей. Цель работы – выявление сезонных особенностей динамики отказов рессор грузовиков КАМАЗ при эксплуатации в Якутии на основе моделирования временного ряда отказов с использованием разложения в ряд Фурье.

Информационной основой анализа надежности любой технической системы является статистика отказов. Исследование проведено на статистических данных по отказам листовых рессор 50 грузовых автомобилей марки КАМАЗ, работавших в Мирнинском районе Якутии в течение четырех полных лет с начала эксплуатации после поставки с завода.

Для исследования работоспособности технических объектов, их систем, узлов и деталей на основе экспериментальных данных создаются временные ряды отказов. Анализ временного ряда месячного числа отказов рессор может быть полезен для выявления причин этих отказов, в связи с чем рассмотрены возможности использования разложения в ряд Фурье для построения аддитивных моделей, состоящих из уравнения тренда и значимых гармоник, описывающих закономерное изменение динамики отказов. Поскольку коэффициент регрессии

уравнения тренда временного ряда месячного числа отказов рессор автомобилей КАМАЗ длиной 48 месяцев оказался статистически незначимым, то центрирование ряда отказов рессор осуществлено относительно среднего значения числа отказов. Разложение в ряд Фурье центрированных данных выполнено по формуле

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N/2-1} \left(a_i \cos \frac{2\pi}{N} it + b_i \sin \frac{2\pi}{N} it \right) + a_{N/2} \cos \pi t, \quad (1)$$

где t – порядковый номер месяца наблюдения; i – номер гармоники; a_i, b_i – коэффициенты Фурье; N – длина ряда. Так как ряд отказов эквидистантен, то коэффициенты Фурье вычислены по формулам:

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N \left(Y_t \cos \frac{2\pi}{N} it \right), \quad a_{N/2} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y_t \cos \pi t), \quad b_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N \left(Y_t \sin \frac{2\pi}{N} it \right), \quad (2)$$

где Y_t – центрированное число отказов в месяц с номером t .

Поскольку цель анализа заключается в выявлении и последующей оценке закономерного изменения изучаемого показателя, то необходимо выделить значимые гармоники, для чего удобно использовать представления ряда Фурье только косинусоидами [4]:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{N/2} A_i \cos \left(\frac{2\pi}{N} it - \varphi_i \right), \quad (3)$$

где A_i – амплитуда i -й гармоники, φ_i – ее фаза. Эти параметры вычисляются через коэффициенты Фурье:

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}, \quad \varphi_i = \begin{cases} \arctg \frac{b_i}{a_i}, & \text{if } a_i \geq 0 \\ \pi + \arctg \frac{b_i}{a_i}, & \text{if } a_i < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Ряд Фурье из 24 гармоник точно аппроксимирует центрированный временной ряд отказов. Представление ряда Фурье в форме (3) позволяет построить амплитудные спектры отказов рессор, где можно выделить пять гармоник с наибольшими амплитудами, которым соответствуют периоды, равные 24; 16; 12; 9,6 и 6 месяцам (рис. 1, а). Наибольшее значение амплитуды наблюдается для периода 9,6 месяца. Параметры пяти значимых гармоник приведены в таблице.

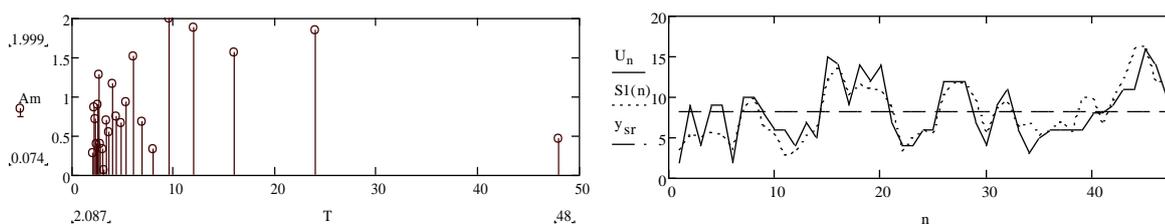


Рис. 1. Амплитудный спектр разложения Фурье отказов рессор грузовиков КАМАЗ при работе на Севере (а) и графики хронограммы отказов (сплошная линия), среднего значения (штриховая линия) и аддитивной функции (пунктирная линия) (б)

Аддитивная функция состоит из среднего значения отказов рессор в месяц (8,25) и пяти значимых гармоник. Ее коэффициент детерминации равен 0,632, то есть 63,2% дисперсии временного ряда отказов рессор объясняется этой моделью (для приемлемых моделей коэффициент детерминации должен превышать значение 0,5). Таким образом, аддитивная функция с достаточной точностью аппроксимирует хронограмму отказов рессор, которая представляет собой график исходного ряда во временной области (рис. 1, б). В то время как временной ряд отказов рессор имеет множество локальных максимумов в течение 48 месяцев, локальные максимумы аддитивной функции временного ряда отказов рессор приходятся на следующие календарные месяцы: март, август, апрель, март, август, март, сентябрь. Эти месяцы соответствуют периодам ухудшения дорожных условий в Якутии – март-апрель и август-сентябрь.

Таблица. Параметры значимых гармоник отказов рессор грузовика КАМАЗ

Значимые гармоники														
1			2			3			4			5		
T , мес.	A	φ_0 , рад	T , мес.	A	φ_0 , рад	T , мес.	A	φ_0 , рад	T , мес.	A	φ_0 , рад	T , мес.	A	φ_0 , рад
24	1,851	-1,01	16	1,564	-0,864	12	1,89	3,247	9,6	1,999	-1,402	6	1,512	2,826

Гармоника с наибольшим периодом 24 месяца может приниматься в качестве основной тенденции временного ряда отказов рессор (рис. 2, а), описывающей влияние некоторых долговременных факторов.

На гармонике с периодом 16 месяцев (рис. 2, б) максимум отказов наблюдается в феврале, июне и октябре. По гармонике с периодом 12 месяцев (рис. 2, в) максимумы отказов соответствуют июню. Гармоника с периодом 9,6 месяцев (рис. 2, г) имеет наибольшую амплитуду среди остальных значимых гармоник, ее максимумы приходятся на июнь, май, март, декабрь и октябрь. Максимумы отказов по гармонике с периодом 6 месяцев (рис. 2, д) наблюдаются в марте и сентябре.

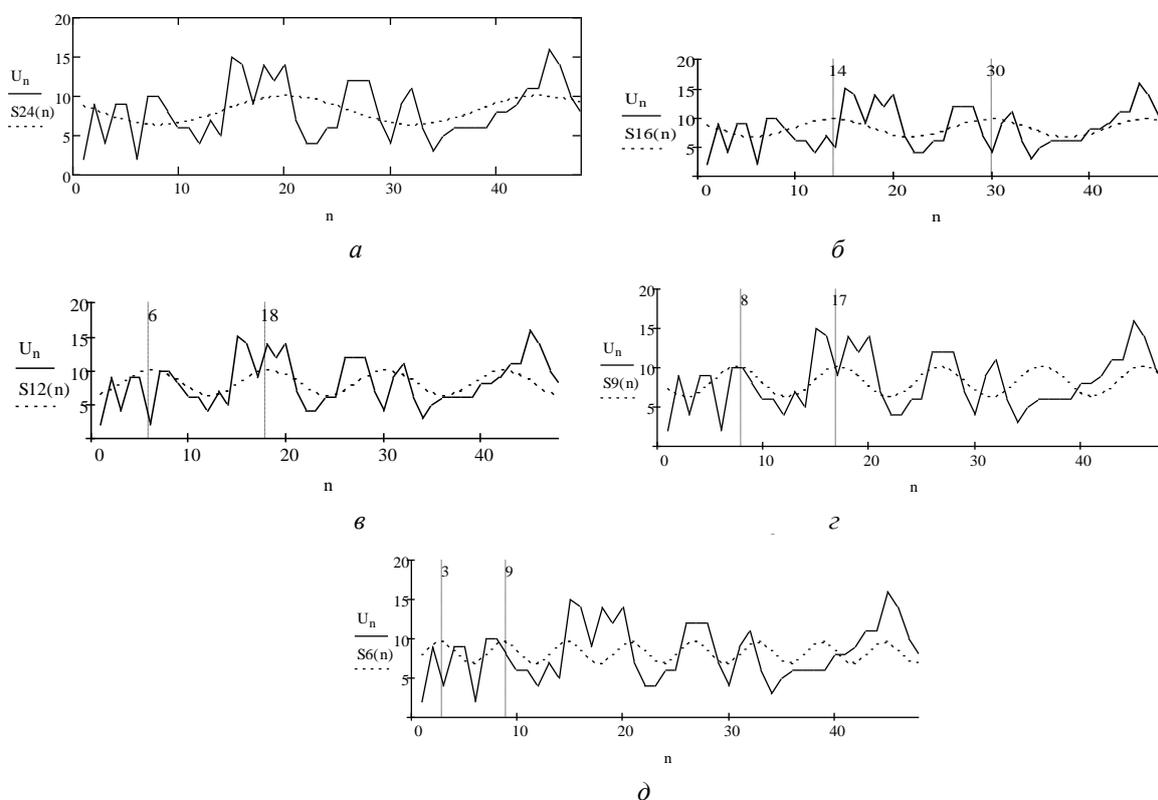


Рис. 2. Хронограмма временного ряда отказов рессор грузовиков КАМАЗ при работе на Севере и значимые гармоники с периодами: а – 24 мес.; б – 16 мес.; в – 12 мес.; г – 9,6 мес.; д – 6 мес.

Рассматривая причины, обуславливающие увеличение отказов в конкретные месяцы, можно перечислить ряд наиболее вероятных обстоятельств. Так, в феврале в Мирнинском районе повышается скользкость заснеженных дорог, что приводит к необходимости частого интенсивного торможения и неблагоприятно влияет на работу рессор. При этом средняя температура окружающей среды составляет $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. В октябре и марте наблюдаются плохие дорожные условия, вызванные появлением значительных сезонных неровностей.

Достаточно очевидным в качестве первостепенного фактора влияния по сравнению с температурой воздуха на работоспособность рессор представляется фактор неровности дорог. На математической модели временного ряда отказов рессор максимумы приходятся на периоды март-апрель и август-сентябрь, которые соответствуют периодам ухудшения дорожных условий в Якутии. При этом на значимых гармониках с периодами 16 и 12 месяцев максимум

отказов наблюдается в июне, в связи с чем представляет интерес более подробно проанализировать характеристики дорог Якутии в июне. В работе [3] было показано, что сезонные спектральные плотности корреляционной функции воздействия неровностей грунтовой дороги на колебания подвески имеют максимумы при различных характерных частотах, которые зависят от сезонного состояния дороги. Показано, что самый высокий и четкий пик максимума спектральных плотностей наблюдается летом, когда профиль дороги характеризуется наибольшей стабильностью неровностей дороги. Выявленные максимумы отказов рессор грузовиков КАМАЗ в июне согласуются с этими результатами.

Отсутствие локальных максимумов аддитивной функции, приходящихся на ноябрь, декабрь, январь объясняется сглаживанием неровностей дорог снежным покровом и указывает на меньшую значимость низких температур в формировании потоков отказов рессор грузовиков КАМАЗ (средняя температура воздуха в Мирнинском районе в ноябре составляет $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, в декабре $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$, в январе $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Таким образом, предложена математическая модель, описывающая закономерное изменение временного ряда отказов рессор грузовиков КАМАЗ при работе в Якутии, представляющая собой аддитивную функцию, состоящую из среднего месячного числа отказов и пяти значимых гармоник разложения Фурье. Коэффициент детерминации аддитивной функции 0,632. Установлены значимые периодические колебания работоспособности рессор, связанные с сезонным характером условий эксплуатации. Периоды максимумов математической модели отказов рессор приходятся на март-апрель и август-сентябрь, то есть на месяцы, соответствующие периодам ухудшения дорожных условий в Якутии. Показана роль дорожных условий как более важного деструктивного фактора влияния на работоспособность рессор в криолитозоне по сравнению с фактором низких температур воздуха.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема 121020400168-1).

Литература

1. Безопасные и качественные дороги в Якутии требуют учета условий вечной мерзлоты. URL: <https://tass.ru/nacionalnye-proekty/6675752> (дата обращения 4.7.2024).
2. Левин А.И., Буслаева И. И., Винокуров Г.Г., Гаврильева А.А. Влияние сезонного состояния дороги в криолитозоне на колебания подвески автомобильной техники // Вестник СВФУ. 2019. № 4 (72). С. 61–72.
3. Зудов Г.Ю., Буслаева И.И., Лебедев М.П., Левин А.И. Работоспособность автомобиля КАМАЗ в условиях криолитозоны // Вестник ИрГТУ. 2018. № 10. С. 166–177. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-10-166-177>.
4. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008 г. 408 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОСЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ОСЕВОЙ СТАЛИ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

Волохов Г.М.¹, Князев Д.А.¹, Чунин В.В.¹, Тимаков М.В.¹, Ваулин П.В.²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна

² Общество с ограниченной ответственностью «Уральские локомотивы» (ООО «Уральские локомотивы»), г. Верхняя Пышма

volokhov-gm@vnikti.com

В данной статье приведены основные механические характеристики металла осей колесных пар скоростного (высокоскоростного) подвижного состава, эксплуатирующегося на сети железных дорог Российской Федерации. Также приведены результаты стендовых испытаний стандартных образцов и натуральных осей, изготовленных из различных марок сталей ОС и ЕА4Т, на циклическую вязкость разрушения и живучесть соответственно. На основании полученных результатов испытаний проведена расчетная оценка периодичности роста трещины от воздействия сил, действующих на колесную пару скоростного (высокоскоростного) подвижного состава в эксплуатации.

На данный момент в России эксплуатируется высокоскоростной подвижной состав ЭВС1 проекта Velaro Rus «Сапсан», который был разработан в соответствии с европейскими нормативными документами и имеет конструкционную скорость 250 км/ч. Согласно конструкторской документации в колесной паре используется полая ось, изготовленная из марки стали ЕА4Т.

Схожие по конструкции и материалу изготовления оси колесных пар эксплуатируются в скоростном моторвагонном подвижном составе ЭС1 проекта Desiro Rus «Ласточка». При этом при подписании контракта на закупку данного подвижного состава была предусмотрена процедура локализации изготовления его деталей в России. В связи с ее реализацией оси колесных пар «Ласточки» (ЭС2Г) стали изготавливать в соответствии с требованиями ГОСТ 33200-2014 из марки стали ОС. Для сравнения основные характеристики этих осей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические характеристики металла и прочность осей из марки стали ОС и ЕА4Т

№ п/п	Наименование показателя	Ось ЭС2Г «Ласточка»	Ось ЭС1 «Ласточка»	Ось ЭВС1 «Сапсан»
1	Марка стали	ОС	ЕА4Т	ЕА4Т
2	Предел прочности σ_b , МПа	671	755	705
3	Предел текучести σ_t , МПа	340	570	550
4	Относительное удлинение, %	28	21	27
5	Поперечное сужение ϕ , %	49,0	61,5	68,0
6	Твердость на поверхности оси, НV	225	240	230
7	Предел выносливости σ_{-1d} , МПа	206	186	180
8	Коэффициент запаса статической прочности	2,32	3,89	3,75
9	Коэффициент запаса сопротивления усталости	1,39	1,27	1,22

При оценке соответствия осей колесных пар требованиям ТР ТС 001 (ТР ТС 002) по параметрам прочности подтверждаются характеристики статической прочности и циклической долговечности. Из таблицы видно, что коэффициент запаса статической прочности выше у осей из марки стали ЕА4Т, это связано с более высоким значением предела текучести для

данной стали по сравнению с маркой ОС. При этом значение коэффициента запаса сопротивления усталости выше у оси из марки стали ОС, так как выше полученный экспериментальным путем предел выносливости данной оси по сравнению с осями, изготовленными из марки стали ЕА4Т.

Еще одним показателем, отвечающим за безопасность эксплуатации подвижного состава, является живучесть оси колесной пары, то есть период, за который трещина разовьется с размера, допускаемого при проведении ультразвукового контроля (при проведении УЗК допускаются дефекты не более 2 мм) до размера длины трещины, эквивалентного потере несущей способности конструкции оси (160 мм). При этом для исключения возможности разрушения (излома) конструкции оси колесной пары в эксплуатации необходимо устанавливать соответствующую периодичность неразрушающего контроля.

Для оценки живучести осей колесных пар были проведены исследования трещиностойкости (циклической вязкости разрушения) на стандартных образцах по ГОСТ 33200-2014 и скорости роста трещины на натуральных осях, для марок стали ЕА4Т и ОС.

Для проведения испытаний на циклическую вязкость разрушения были изготовлены по двенадцать образцов для каждой марки стали. Образцы изготавливались из шеек натуральных осей в соответствии рис. 2. Геометрические размеры стандартных образцов приведены на рис. 1.



Рис. 1. Образец с краевым концентратором для испытаний на трещиностойкость

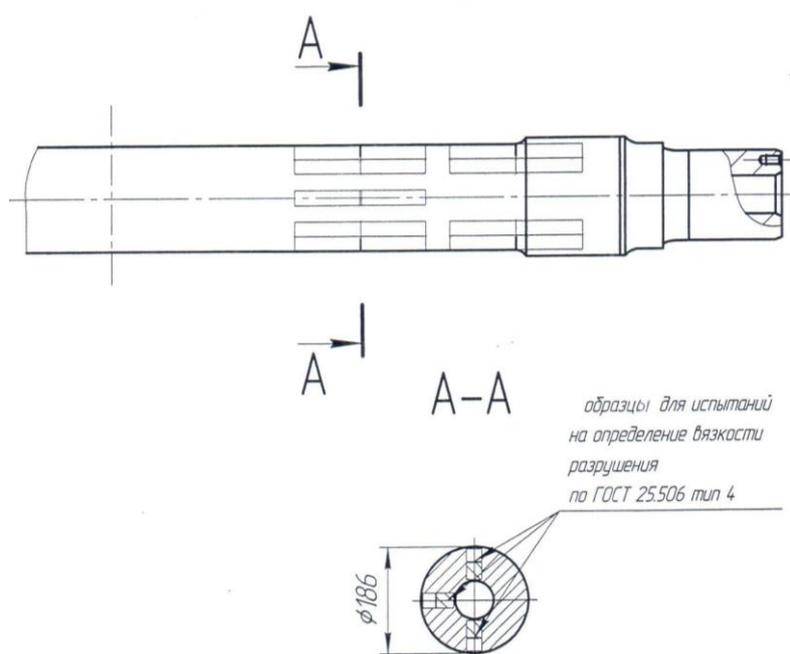


Рис. 2. Места вырезки образцов

Образцы испытывали на плоский изгиб при нагружении по схеме балки, установленной на двух опорах с приложением циклической нагрузки посередине образца. Исходная трещина на образцах была расположена в плоскости, перпендикулярной наибольшему растягивающему напряжениям. Испытания по определению циклической вязкости разрушения выполняли до разрушения образца при постоянном коэффициенте асимметрии цикла нагружения согласно ГОСТ 33200-2014. Нагружение мягкое, заданное размахом нагрузок.

По результатам испытаний были получены параметры кинетической диаграммы установившихся разрушений (КДУР), приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики трещиностойкости металла осей

Марка стали	t , °С испытаний	K_{fc} , МПа $\sqrt{м}$	K_{th} , МПа $\sqrt{м}$
ОС	25	70,3	15,4
ОС	-60	47,6	18,3
ЕА4Т	24	88,7	14,3
ЕА4Т	-60	53,7	18,7

Для сравнительной оценки скорости роста трещины в натурной конструкции оси были проведены их испытания на живучесть. Для установки в стенд в соответствии с ГОСТ 33783-2016 натурные оси формировались с имитаторами колес на одной стороне оси, а на другие свободные торцы осей монтировались нагружающие устройства (рис. 3), позволяющие воспроизводить нагрузку, эквивалентную эксплуатационной с учетом ее увеличения для сокращения времени испытаний.



Рис. 3. Внешний вид объекта испытаний (ось в сборе с технологическим имитатором колеса)

После установки в стенд производилось тензометрирование осей для определения напряжений в них от воздействия сил при различных режимах нагружающего устройства. Далее в наиболее нагруженных сечениях осей воспроизводились максимально допускаемые по методу неразрушающего контроля (НК) трещиноподобные дефекты, приведенные на рис. 4.

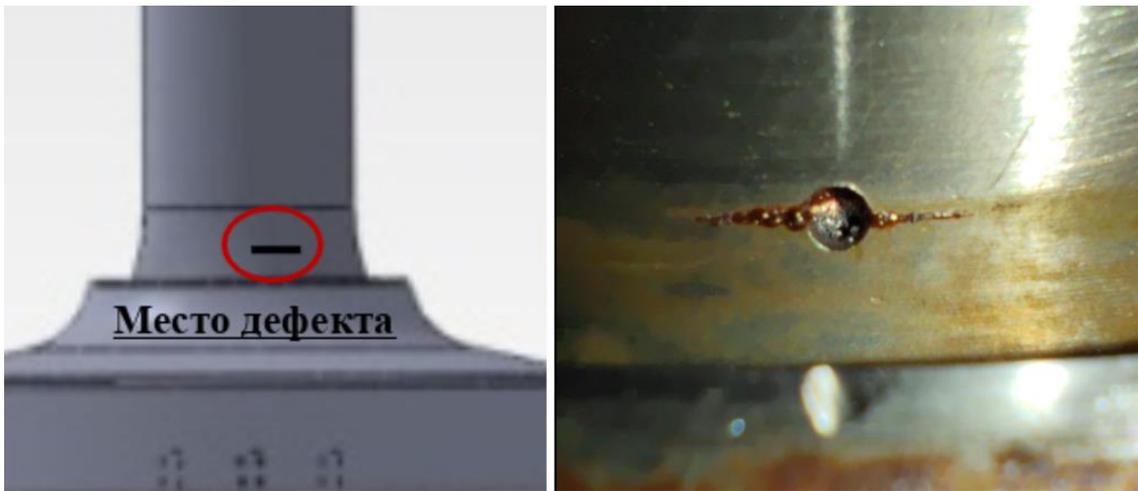


Рис. 4. Место нанесения трещиноподобного дефекта с допускаемыми по НК размерами

После чего производилось циклическое нагружение данных осей, от воздействия которого на границах трещиноподобного дефекта возникли трещины, длина которых замерялась по прошествии определенного количества циклов нагружения. Графические зависимости роста длины трещины от количества циклов при постоянной нагрузке приведены на рис. 5 для оси, изготовленной из стали ОС, и рис. 6 для оси, изготовленной из стали ЕА4Т.

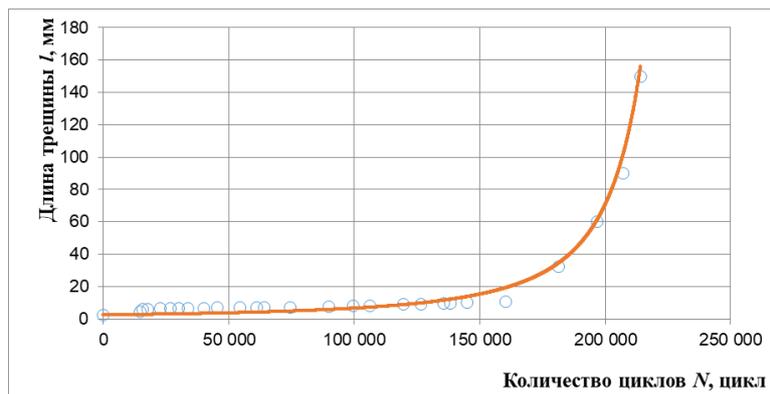


Рис. 5. Зависимость изменения длины трещины от количества циклов нагружения оси, изготовленной из марки стали ОС

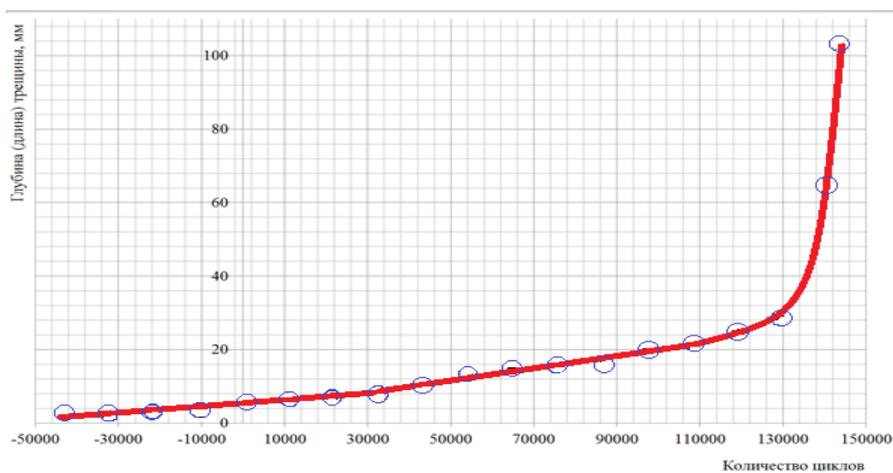


Рис. 6. Зависимость изменения длины трещины от количества циклов нагружения оси, изготовленной из марки стали ЕА4Т

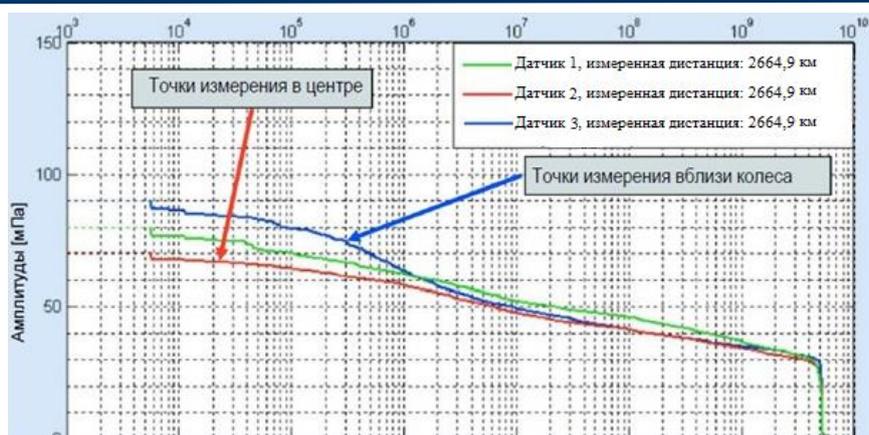


Рис. 7. Величины напряжений, возникающие в оси, полученные по результатам проведения ходовых испытаний

Из полученных графических зависимостей видно, что при одинаковых номинальных амплитудах напряжений в наиболее нагруженной зоне осей количество циклов нагружения до достижения критической длины трещины больше для стали марки ОС по сравнению с маркой ЕА4Т. Для обоснования периода освидетельствования осей колесных пар проведен перерасчет периода живучести полученных зависимостей с учетом блока эксплуатационной нагруженности осей колесных пар, полученных по результатам натурных ходовых испытаний по маршруту Санкт-Петербург – Москва – Нижний-Новгород, приведенный на рис. 7.

На рис. 8 приведены сравнительные результаты живучести осей, изготовленных из стали марки ОС и ЕА4Т с учетом полученного блока эксплуатационной нагруженности (рис. 7). Из полученных результатов видно, что живучесть оси колесной пары, изготовленной из марки стали ОС, выше на 11% по сравнению с осями из марки стали ЕА4Т.

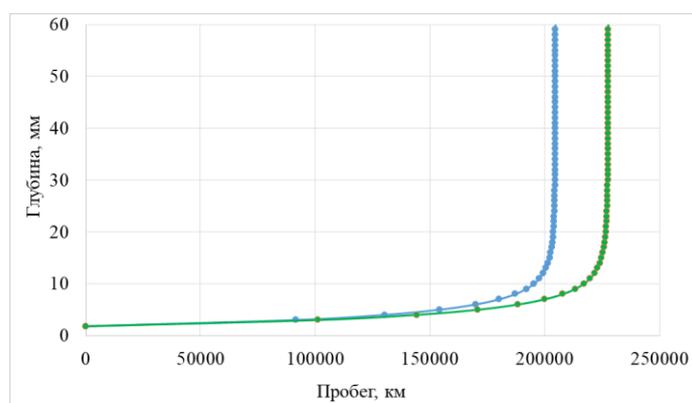


Рис. 8. Живучесть оси колесной пары с учетом блока эксплуатационной нагруженности

По результатам проведенной расчетно-экспериментальной работы можно сделать выводы:

1. Пороговые значения КИН (K_{th}) сопоставимы, а циклическая вязкость разрушения (K_{fc}) у стали ЕА4Т выше на 7%.
2. Живучесть (наработка с момента зарождения трещины в натурной оси до потери ее несущей способности) оси из стали марки ОС на 11% больше по сравнению с осью марки стали ЕА4Т. Возможному объяснению этого является создание на поверхности оси из марки стали ОС сжимающих остаточных напряжений вследствие упрочнения накатывания роликом.
3. Учитывая ограниченную выборку объектов испытаний, предполагается оценку живучести осей колесных пар из марок сталей ОС и ЕА4Т сделать на большем количестве образцов.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-81-84

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Шардаков И.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

gusev.g@icmm.ru

В работе освещен опыт проектирования, внедрения и использования систем интеллектуального мониторинга на ряде строительных объектов РФ и республики Беларусь. Все приведенные примеры объединены сложными историями строительства и эксплуатации в условиях техногенных воздействий и влияния агрессивной окружающей среды.

Современные строительные сооружения являются сложными инженерными объектами как с точки зрения конструктивных особенностей работы, так и с точки зрения эксплуатации в агрессивных условиях окружающей среды. Выполненные из железобетона, армокаменных материалов или различных сталей, такие сооружения испытывают сложные комбинации квазистатических и динамических нагрузений на всем периоде, начиная с первых этапов строительства и на протяжении всей эксплуатации. Наличие же агрессивной окружающей среды в виде сезонных перепадов температур, ветровых и иных климатических воздействий вкупе с техногенным воздействием различного вида, существенным образом увеличивают риски развития нештатных в общем и аварийных, в частности, состояний ответственных конструкций. Таким образом, задача о контроле деформированного состояния инженерных конструкций в такого рода условиях является не просто актуальной, а критически важной в аспекте безопасной эксплуатации.

Одним из вариантов решения проблемы оценки текущего деформационного состояния такого рода систем является разработка и реализация различных вариантов систем интеллектуального мониторинга строительных объектов. Система интеллектуального мониторинга – это комплекс мероприятий, который призван обеспечить безаварийную и бесперебойную работу ответственных инженерных сооружений на всем периоде их жизнедеятельности. Данный комплекс мероприятий строго иерархичен и подчиняется жесткой логике проектирования, внедрения и развития систем и включает в себя различные этапы. К ним относятся: техническое обследование строительных конструкций, математическое моделирование объекта мониторинга с оценкой критических состояний как всего сооружений, так и отдельных элементов в условиях предполагаемой эксплуатации, оценка вариантов развития аварийных ситуаций по вероятным сценариям нарушения работоспособности, разработка, проектирование и реализация систем мониторинга деформационного состояния в условиях эксплуатации. Все этапы являются важными и необходимыми в смысле составляющей любой действующей системы интеллектуального мониторинга деформационного состояния строительных объектов. В данной работе представлен опыт разработки, проектирования и эксплуатации такого рода систем, действующих на объектах Российской Федерации и в республике Беларусь.

Первый пример. Техногенное понижение уровня грунтовых вод, которое привело к разрушению части конструкций торгово-развлекательного центра (ТРК). Основной задачей исследования изначально являлось определение причин возникновения неравномерных осадок фундаментных конструкций ТРК в г. Пермь, в последствии, повлекших за собой повреждение основных несущих конструкций сооружения и признание части его аварийным и непригодным к эксплуатации.

Торгово-развлекательный комплекс площадью 70 000 м² состоит из шести блоков – «А», «В», «С» (блоки первой очереди) и «D», «D1», «D2» (блоки второй очереди) разделенных деформационными швами. Комплекс был введен в эксплуатацию в 2003 г. В 2009–2010 гг. вдоль длинной его стороны на глубине 25–30 метров велось строительство Главного разгру-

зочного коллектора г. Перми. Диаметр ствола коллектора составил 6 м. Проходка и строительство как самого коллектора, так и разгрузочных шахт велись по технологии, которая предусматривала водопонижение по всем водоносным горизонтам в зоне строительства. Понижение уровней грунтовых вод по данным измерений произошло на 6–8 м по двум горизонтам. Осушение активной толщи аллювиальных грунтов привело к развитию неравномерных осадок по всей площади ТРК и сопряженной с ней территории автопарковки, которая попала в зону развития депрессии. Величины осадок свободной земной поверхности составили порядка 30 см (рис. 1, 2). В 2010 г. основные несущие конструкции блоков первой очереди стали накапливать деформации, которые привели к образованию дефектов в несущих конструкциях сооружений. В связи с конструктивными особенностями сооружений виды дефектов и их величины существенно различались. Наиболее пострадавшими от развития незапланированных неравномерных осадок стали блоки первой очереди – «А», «С» и «В». Блок «В» в 2010 г. был признан аварийным, выведен из эксплуатации и демонтирован. В 2012 г. был спроектирован, построен и в 2014 г. введен в эксплуатацию новый блок «В» на месте старого сооружения. Блоки «А» и «С» были отремонтированы и частично усилены. С 2010 г. по настоящее время специалистами лаборатории интеллектуального мониторинга ПФИЦ УрО РАН ведется научно-техническое сопровождение данного Объекта в рамках комплексного мониторинга всего ТРК [1, 2].

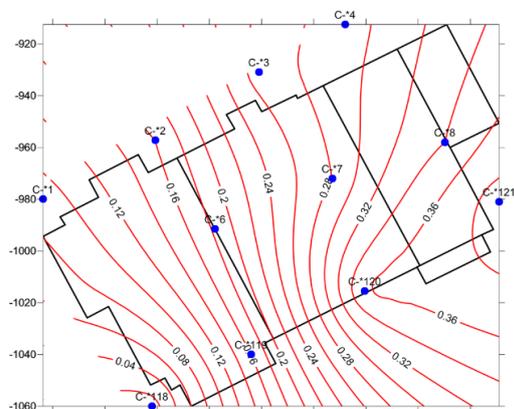


Рис. 1. Схема распределения осадок земной поверхности при снижении уровней подземных вод на территории корпусов ТРК

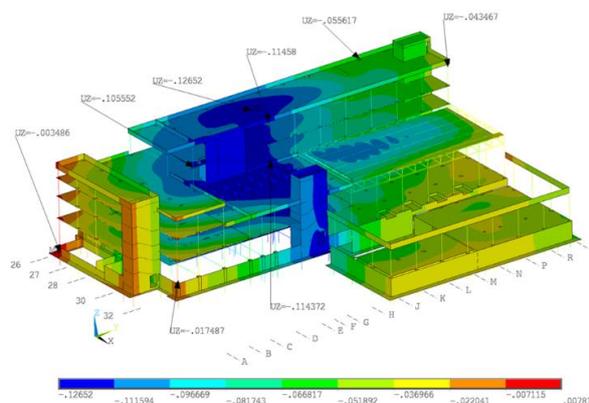


Рис. 2. Результаты численного моделирования НДС для одного из блоков ТРК по данным системы комплексного мониторинга

Второй пример. Объектом исследования являются стальные конструкции покрытия 50-ти метрового плавательного бассейна спортивного комплекса (рис.3). Конструкции покрытия имеют достаточно сложную историю возведения и эксплуатации. К особенностям строительства и эксплуатации объекта относятся: долгое (с перерывами) строительство комплекса с нарушением условий консервации и развитием коррозионных процессов в несущих элементах уже на стадии возведения; пересортица несущих элементов и существенные отличия возведенного сооружения от изначальной проектной документации; многократное усиление части несущих конструкций по результатам расчетов в разное время и в разных постановках [3, 4].

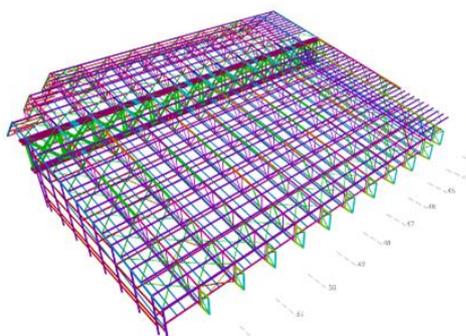


Рис. 3. Конечно-элементная модель конструкций стального покрытия большого бассейна

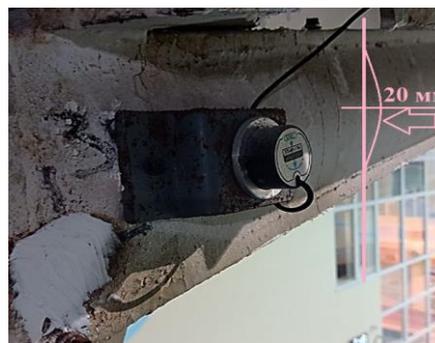


Рис. 4. Элемент нижнего пояса фермы. Датчиками зафиксирована потеря устойчивости стенки сечения элемента. Выход из вертикальной плоскости составил 1.5–2 см

Основной задачей исследования является периодическая оценка технического состояния объекта на основе анализа данных системы деформационного мониторинга и прогнозирование его жизнедеятельности в условиях эксплуатации, которые осложнены историей возведения (рис. 4).

Третий пример. Объектом исследования является металлическая конструкция надшахтного здания скипового ствола с копром Петриковского горно-обогатительного комплекса, г. Петриков (республика Беларусь). Конструкция представляет собой сборно-сварное высотное металлическое сооружение с максимальной высотной отметкой +64.350 м. Внешний вид конструкции на декабрь 2019 года представлен на рисунке 5. Строительство данного сооружения было осложнено тем, что часть фундаментных конструкций попала в зону замороженных грунтов, которая была сформирована для строительства ствола шахты [5]. Целью внедрения системы интеллектуального мониторинга и задачей исследования являлось прогнозирование изменения деформационного состояния стальной конструкции надшахтного здания, которое возникло вследствие оттаивания замороженного грунта [6]. Задача осложнялась постоянным наличием влияния агрессивной окружающей среды в виде аэрозолей и рассолов калийных солей, которые постоянно присутствуют в конструктивном объеме всего сооружения [7, 8].



Рис. 5. Внешний вид конструкции на этапе возведения – осень 2019 г.



Рис. 6. Уничтоженный солевой коррозией тензометрический датчик деформации

Сотрудниками лаборатории интеллектуального мониторинга ПФИЦ УрО РАН, г. Пермь за последние 15 лет исследовательской деятельности разработаны и внедрены на строительные объекты более 50-ти вариаций различных систем деформационного мониторинга. Большинство систем являются действующими и по сей день.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124040500016-9.

Литература

1. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams / R. Tsvetkov, I. Shardakov, A. Shestakov [et al.] // Procedia Structural Integrity: 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, Funchal, Madeira, Portugal, 04–07 сентября 2017 года. Vol. 5. Funchal, Madeira, Portugal: Elsevier B.V., 2017. P. 620–626. DOI 10.1016/j.prostr.2017.07.028.
2. Forecast of differential settlement of structures using data of monitoring system / I. Shardakov, R. Tsvetkov, G. Gusev [et al.] // 16th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS 2022), Ekaterinburg, 16–20 мая 2022 года. Vol. 50. Elsevier BV: Elsevier BV, 2023. P. 257–265. DOI 10.1016/j.prostr.2023.10.049.
3. Гусев, Г. Н. Опыт проектирования и внедрения системы мониторинга напряженно-деформированного состояния большепролетных стальных конструкций покрытий плавательного бассейна / Г. Н. Гусев, А. В. Маккавеев // Научно-технический вестник Поволжья. –2018. № 11. С. 161–164.

4. Гусев Г. Н., Цветков Р. В. Верификация численной модели кровли бассейна по результатам мониторинга // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 5. С. 47–53. doi: 10.33622/0869-7019.2024.05.47-53.
5. Формирование напряженного состояния бетонной крепи в процессе проходки шахтного ствола / И. Н. Шардаков, А. П. Шестаков, И. О. Глот [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15, № 4. С. 399–408. DOI 10.7242/1999-6691/2022.15.4.30.
6. System for Monitoring Deformation Processes in High-Rise Metal Structure / I. Sharda-kov, I. Glot, A. Shestakov [et al.] // Procedia Structural Integrity. 2023. P. 127–134. DOI 10.1016/j.prostr.2023.07.138.
7. Мониторинг инженерной конструкции в процессе её эксплуатации в условиях коррозийно-активной среды / В. В. Епин, Г. Н. Гусев, Р. В. Цветков [и др.] // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2022. № 4. С. 6–15. DOI 10.7242/2658-705X/2022.4.1.
8. Experience of using tensoresistive strain gauges in corrosive environments / G. Gusev, I. Glot, V. Epin [et al.] // Procedia Structural Integrity: 22nd, Perm, 22–26 марта 2021 года. Vol. 32. Perm, 2021. P. 49–55. DOI 10.1016/j.prostr.2021.09.008.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-84-88

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ УПАКОВОЧНЫХ КОМПЛЕКТОВ ДЛЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ВНЕШНИХ УДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Казанцев А.Г.¹, Абрамов В.В.¹, Петров О.М.¹, Радченко М.В.²

¹ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва

² АО «Атомспецтранс», г. Москва

kazantsev_a_g@mail.ru

При хранении транспортных упаковочных комплектов ТУК на открытой площадке, в число аварий, анализ которых предусмотрен рекомендациями МАГАТЭ, входит такое внешнее события, как удар самолета. Приведена методика обоснования целостности ТУК на уменьшенных макетах, в соответствии с которой в зоне удара создается искусственный трещиноподобный дефект, размеры которого определяются с учетом технологической дефектности, масштаба макета и рассеяния свойств материала.

В число анализируемых аварий при хранении транспортных упаковочных комплектов (ТУК) с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) на открытой площадке входит такое внешнее событие, как удар истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E со скоростью 215 м/сек. В связи с тем, что натурные испытания ТУК на такой вид воздействия сопряжены со значительными трудностями, их проводят на уменьшенных макетах ТУК, технология изготовления которых, материалы, а также функциональные свойства комплектующих, идентичны используемым в натурном изделии.

В данной работе рассматривается удар самолета Phantom RF-4E по ТУК для обращения с облученными тепловыделяющими сборками реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. Корпус ТУК изготовлен из сваренных между собой толстостенной обечайки и днища из поковок стали 09Н2МФБА-А. Его герметичность обеспечивается уплотнениями на крышках. Высота корпуса ТУК – 5 м, внешний диаметр – 2.5 м, толщина стенки – 250 мм, толщина днища – 300 мм, масса около 130 т.

Наиболее жестким является удар по ТУК двигателя самолета. Масса двигателя истребителя-бомбардировщика Phantom RF-4E составляет 1,46 т, пятно удара – круг диаметром 0,76 м.

При расчете напряженно-деформированного состояния, возникающего при ударе, учет влияния скорости деформации на свойства материалов производился с использованием уравнения Купера-Саймондса. Используемые в расчетах характеристики деформирования и разрушения материалов определялись на стандартных образцах и плоских мишенях разной толщины, в условиях, позволяющих обеспечить скорости деформирования и напряженно-деформированное состояние близкие к реализуемым при ударе двигателя по ТУК.

При выборе конструкции бойка – имитатора двигателя использовались данные по ударному импульсу, полученному в краш-тесте при ударе натурального двигателя со скоростью 215 м/сек о жесткую стенку. Параметры бойка, который создает аналогичный ударный импульс, подбирались путем проведения серии расчетов МКЭ с варьированием жесткости бойка при фиксированной массе и диаметре.

При проведении расчетов напряжений в ТУК моделировались боковые удары по нижней (зона сварного соединения днища с обечайкой), верхней части и колпаку, рис.1а. Максимальные растягивающие напряжения в корпусе (до 460 МПа) возникают при боковом ударе по ТУК на уровне центра тяжести на внутренней поверхности обечайки и действуют в окружном направлении.

Их распределение по толщине стенки для макетов различного масштаба показано на рис. 2.

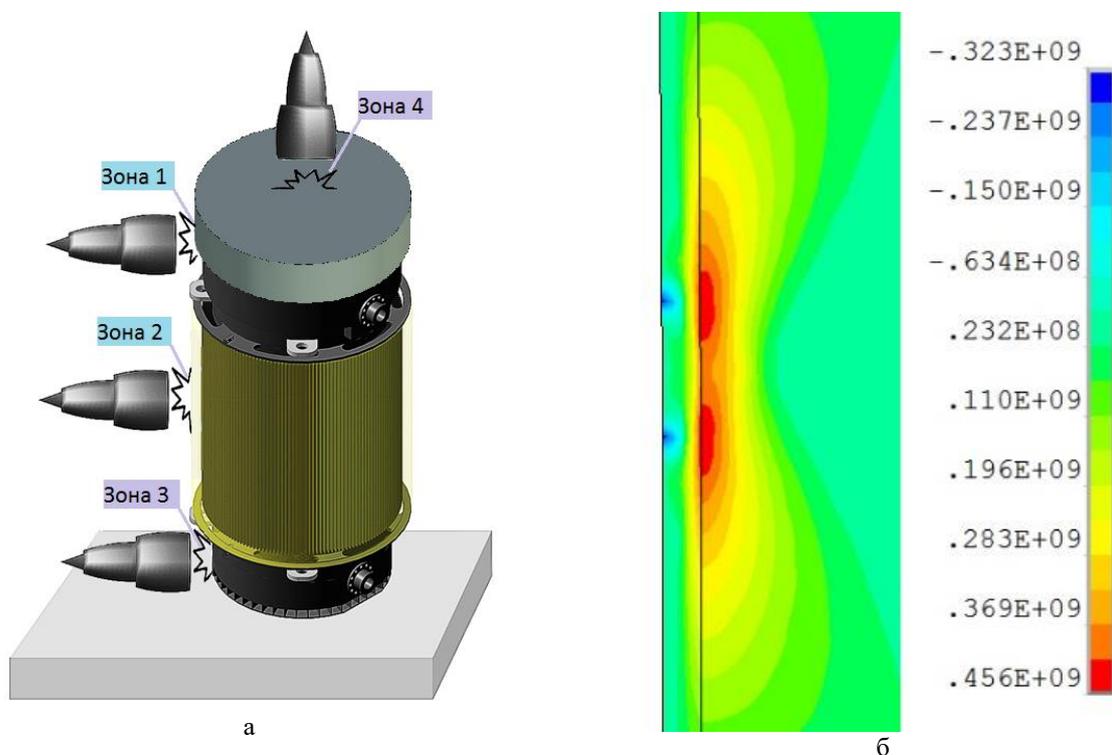


Рис.1. а – направление ударов по корпусу ТУК. б – главные (окружные) растягивающие напряжения (Па) в зоне удара

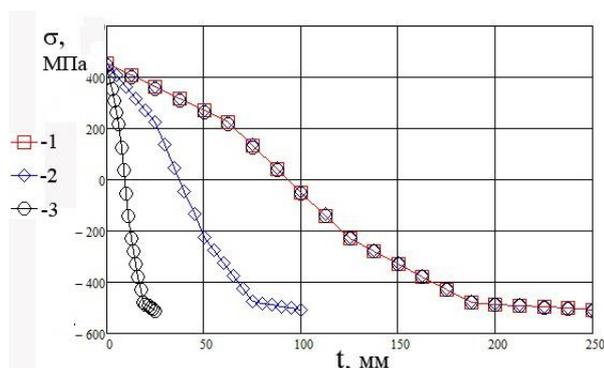


Рис. 2. Распределение окружных напряжений в зоне удара в стенке макетов ТУК различного масштаба. 1– 1:1; 2 -1:2,5; 3 – 1:10

Как видно из рис.2, с уменьшением размеров макета увеличивается градиент напряжений по толщине стенки. Для распределения компонент напряжений по толщине выполняется условие подобия

$$\sigma(t) = \sigma(t/n) \quad (1)$$

где t – расстояние, отсчитываемое от внутренней поверхности стенки, n – масштабный коэффициент. Пересчитанные с использованием (1) значения напряжений для макетов в масштабе 1:10 и 1:2,5 ложатся на одну кривую, соответствующую натурному ТУК, рис.2.

Хранение ТУК в районах крайнего Севера может осуществляться в диапазоне температур до минус 60 °С, что вызывает необходимость обоснования хрупкой прочности ТУК в условиях отрицательных температурах.

Инициаторами хрупкого разрушения могут быть технологические дефекты. В соответствии с ГОСТ 24507-80, величина максимальных допустимых размеров дефектов (максимальная площадь дефекта) зависит от толщины поковок и группы качества. Для обечайки корпуса ТУК толщиной 250 мм площадь максимального допустимого дефекта составляет 20 мм². В качестве эквивалентного дефекта с указанной площадью принимался поверхностный полуэллиптический трещиноподобный дефект глубиной 2,1 мм и протяженностью 12,6 мм.

Распределение дефектов по объему корпусных элементов, а также сварного шва ТУК носит случайный характер. При ударе бойка – имитатора двигателя самолета область максимальных напряжений локализована и может приходиться как на зону с дефектами, так и на бездефектный металл. В связи с отмеченным, в макетах ТУК целесообразно создать искусственные трещиноподобные дефекты, которые обеспечивают при проведении испытаний реализацию наиболее неблагоприятного сценария.

При изменении масштаба макета изменяется поле напряжений (рис.2). Обусловленная этим изменением зависимость коэффициента интенсивности напряжений K_I от толщины стенки обечайки корпуса для дефектов различных размеров имеет вид, показанный на рис. 3а.

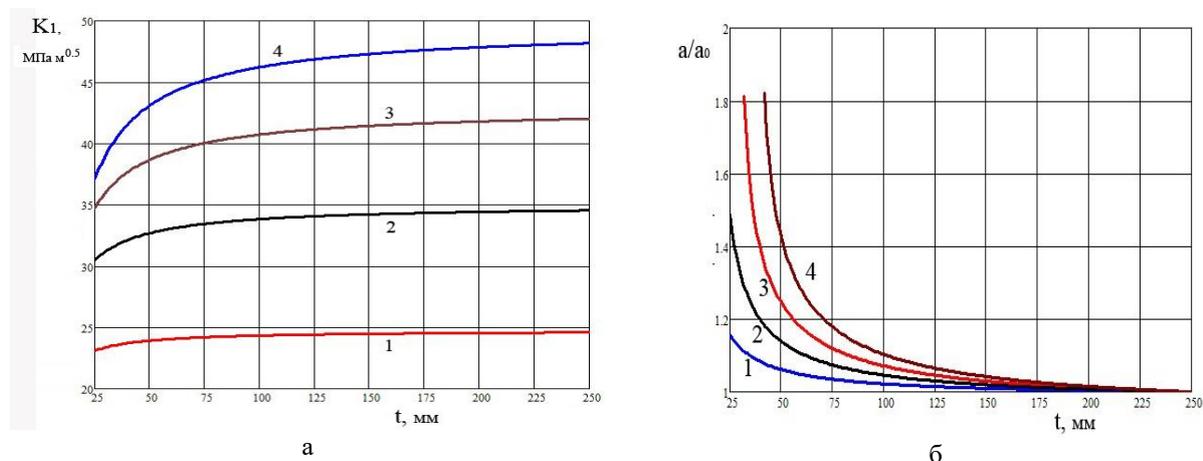


Рис. 3. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений (а) и коэффициента увеличения глубины трещины (б) от толщины стенки макета ТУК. 1– $a_0=1$ мм; 2– $a_0=2$ мм; 3– $a_0=3$ мм; 4– $a_0=4$ мм

Из рис. 3а следует, что при фиксированных размерах дефекта величина K_I в вершине трещины снижается с уменьшением толщины стенки макета за счет более резкого уменьшения растягивающих напряжений в направлении от внутренней к внешней поверхности обечайки. Чтобы получить одинаковые значения K_I размеры дефекта в уменьшенном макете ТУК должны быть больше, чем в натурном изделии. Их можно определить из решения уравнения

$$Y(t, a) \cdot \sigma(t, a) \cdot \sqrt{a} = K_I(t_0, a_0) \quad (2)$$

где t_0 и a_0 – соответственно толщина стенки и глубина дефекта в натурном ТУК; t и a – тоже в макете. Y – коэффициент формы, σ – приведенное эквивалентное напряжение. Изменение коэффициента увеличения размеров трещины $k = a/a_0$ в зависимости от толщины стенки макета ТУК и глубины дефекта a_0 показано на рис.3б.

Разброс данных по вязкости разрушения (K_{JC}) в области хрупко-вязкого перехода описывался трехпараметрической функцией распределения Вейбулла. Зависимость вязкости разрушения от температуры определяется мастер-кривой, уравнение которой для вероятности разрушения $P=50\%$ при толщине образцов 25 мм имеет, в соответствии со стандартом ASTM E1921, вид

$$K_{JC} = 30 + 70 \cdot \exp[0.019(T - T_0)] \quad (3)$$

Вероятность разрушения корпуса макета ТУК в зависимости от свойств металла (референсной температуры T_0) и температуры испытания можно найти из условия $K_I = K_{JC(P)}(T)$ по формуле:

$$P(T, K_I, T_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{K_I - 20}{(11 + 77 \cdot \exp[0.019 \cdot (T - T_0)])} \right)^4 \right] \quad (4)$$

С использованием описанного подхода выполнена оценка вероятности разрушения при имитационных испытаниях на боковой удар двигателя макетов (масштаб 1:10) и натурального ТУК с трещиноподобными дефектами в зоне удара. Материал первого макета (как и натурального изделия) – сталь 09Н2МФБА-А (для данного материала в уравнении (3) референсная температура при динамическом нагружении $T_{0d} = -42^\circ\text{C}$). Второй макет был изготовлен из стали 20, имеющей низкий уровень динамической вязкости разрушения ($T_{0d} = 67^\circ\text{C}$). Величины T_{0d} определялись по результатам испытаний образцов на ударный изгиб с трещиной на инструментированном маятниковом копре. Для максимального допустимого дефекта в основном металле в натурном ТУК ($a=2,1$ мм, $c=6,3$ мм) при ударе двигателя величина $K_I=34,5$ МПа·м^{0.5}. Такое же значение K_I достигается в макете, изготовленном в масштабе 1:10 для дефекта с полуосями $a=3$ мм и $c=9$ мм. Фактические размеры искусственных дефектов в макетах были несколько завышены – глубина трещины составила 3,4 мм, также были ужесточены условия нагружения. За счет этого для дефектов в обоих макетах величина $K_I=37,5$ МПа·м^{0.5}.

По установленным значениям K_I , используя соотношение (4) выполнены расчеты вероятностей разрушения. Получено, что при $T = -60^\circ\text{C}$ вероятность разрушения натурального ТУК составляет $P=2,4 \cdot 10^{-3}$, макета из стали 09Н2МФБА-А – $5,1 \cdot 10^{-3}$. Для макета ТУК из стали 20 при $T = -60^\circ\text{C}$ вероятность разрушения $P=0,6$; при $T = -40^\circ\text{C}$ $P=0,37$; при $T=20^\circ\text{C}$ $P=0,03$. Соответствующие зависимости вероятности разрушения натурального ТУК и макетов в зависимости от температуры испытания, описываемые уравнением (4) приведены на рис. 4.

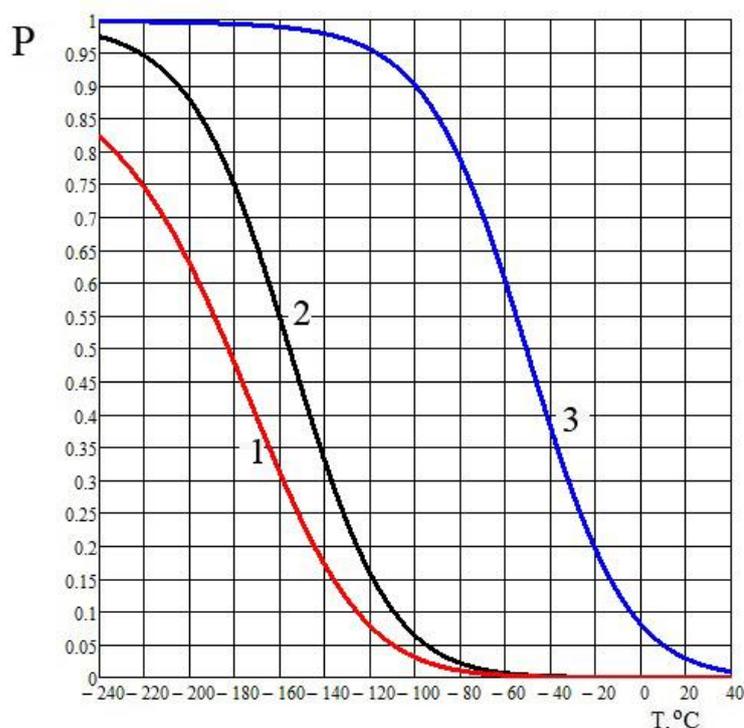


Рис. 4. Вероятности разрушения натурального ТУК (1) и макетов, изготовленных в масштабе 1:10 из стали 09Н2МФБА-А (2) и стали 20 (3), в зависимости от температуры испытания

Для подтверждения расчетных оценок проведены испытания макетов. Удар бойком со скоростью 215 м/сек по макетам ТУК с искусственными дефектами осуществлялся с использованием пневмопушки. Макет из стали 20 выдержал испытание при +20 °С и -40 °С. При $T = -60$ °С удар привел к хрупкому разрушению корпуса – возникла продольная сквозная трещина протяженностью 0.5 м, на всю длину обечайки, торможение которой произошло у днища. Макет из стали 09Н2МФБА-А сохранил целостность после испытания при -60 °С. Результаты испытаний согласуются с расчетными оценками вероятностей разрушения.

Полученные данные показывают, что при температуре минус 60 °С прочность корпуса натурального ТУК, изготовленного из стали 09Н2МФБА-А даже в случае лобового удара двигателя самолета Phantom RF-4Е в центральную часть корпуса с наиболее неблагоприятным расположением и ориентацией дефектов обеспечивается.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-88-91

О ВОЗДЕЙСТВИИ МОРОЗНЫХ ПУЧЕНИЙ НА ПОДЗЕМНЫЙ ТРУБОПРОВОД В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Корнилова З.Г., Иванов Д.С., Аммосов Г.С., Антонов А.А., Корнилова В.В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

zoya_korn@mail.ru

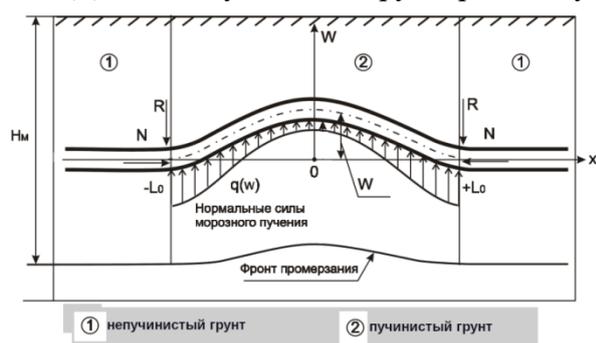
По результатам измерений планово-высотных положений подземного трубопровода, проведенных нами в различные сезоны года, выявлены особенности деформации от морозных пучений. На некоторых участках возникают сложные деформации, проявляющиеся в виде нескольких арок и без интервалов переходящие одна в другую. В статье рассмотрен механизм сложных деформаций при морозных пучениях. Предложено математическое описание трубопровода, решение уравнения даст возможность оценить напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода.

Введение. Магистральные трубопроводы, проложенные на территории Республики Саха (Якутия), эксплуатируются в области распространения многолетнемерзлых грунтов. Экстремальные климатические и инженерно-геологические условия, характеризуются низкими температурами воздуха, высоким уровнем грунтовых вод, заболоченностью и заторфованностью грунтов, глубоким сезонным промерзанием на участках локальных поднятий и подтоплением территорий во время весеннего и осеннего паводков [1, 2].

Особую опасность представляет на пойменном участке для подземных трубопроводов влага при промерзании и протаивании (оттайке) мерзлых грунтов и связанная с ними деформация земной поверхности, влияющая на оценку прочности и надежности конструкции в целом [3].

Нами уделено внимание участку берегового склона, где происходят сезонные экзогенные процессы в виде морозного пучения и протаивания грунта. Выбор левого берега связан с тем, что слой сезонного промерзания, начиная с приурезного участка, смыкается с зоной вечномерзлых грунтов. Для определения сезонных колебаний трубопровода использовали метод обследования планово-высотного положения (ПВП) трубопровода.

Действие пучений на трубопровод изучается многими исследователями, но в работах [4–



9], рассматривающие это явление авторы, исследуют только одну модель – по трассе трубопровода встречается участок с пучинистым грунтом, и в результате пучений получается деформация в виде арки – одиночной выпуклости. Расчетную схему взаимодействия трубопровода с грунтом принимают как на рисунке 1.

Рис. 1. Расчетная схема силового взаимодействия трубопровода с пучинистым грунтом.

Для математического моделирования деформации трубопровода используют уравнение:

$$EI \frac{d^4 W}{dx^4} + N \frac{d^2 W}{dx^2} = q, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала трубопровода, I – момент инерции сечения трубопровода, W – сдвиг оси трубопровода от прямой линии, x – продольная координата, N – продольные усилия в трубопроводе, q – силы морозного пучения.

Материалы и методы исследования. В отличие от исследованных действий пучений, рассматривающих одиночную арку, на магистральном 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.

Многолетним мониторингом пространственного положения береговой части подземного трубопровода нами выявлен участок на протоке Табагинская, в котором дважды в год происходят интенсивные деформации. Наиболее показательна серия измерений, проведенных в ряд последовательных сезонов 2017–2018 годов (рис. 2).

На рисунке 2 показаны результаты измерения пространственного положения подземного трубопровода в ряд последовательных сезонов на участке интенсивных деформаций. Измерения проводились в апреле, когда трубопровод находится в мерзлом грунте, и в октябре (ноябре), когда грунт вокруг трубопровода талый. На рисунке 2 сплошной линией показано положение трубопровода во время измерения, пунктирной линией показано положение трубопровода за предыдущий сезон, тонкой линией показан уровень дневной поверхности грунта. Как видно, величина смещения трубопровода в отдельных точках за полгода составляет ~2 м. Форма, которую приобретает трубопровод – не одиночная арка, а ряд выпуклостей и вогнутостей, идущих друг за другом.

Кроме сложной формы, особенностью является также величина смещения трубопровода. Обычная величина морозных пучений – десяток сантиметров, в особых случаях – несколько десятков сантиметров. Измерения показывают, что вызванные ими смещения трубопровода, в сложных случаях, могут быть на порядок больше.

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. Следовательно, на нем замерзание грунта запаздывает, по сравнению с прилегающими участками. С наступлением холодов верхние и нижние участки склона в результате замерзания грунта зацемяют 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 на трубопроводе возникают изгибные деформации. При изгибе происходящие в средней

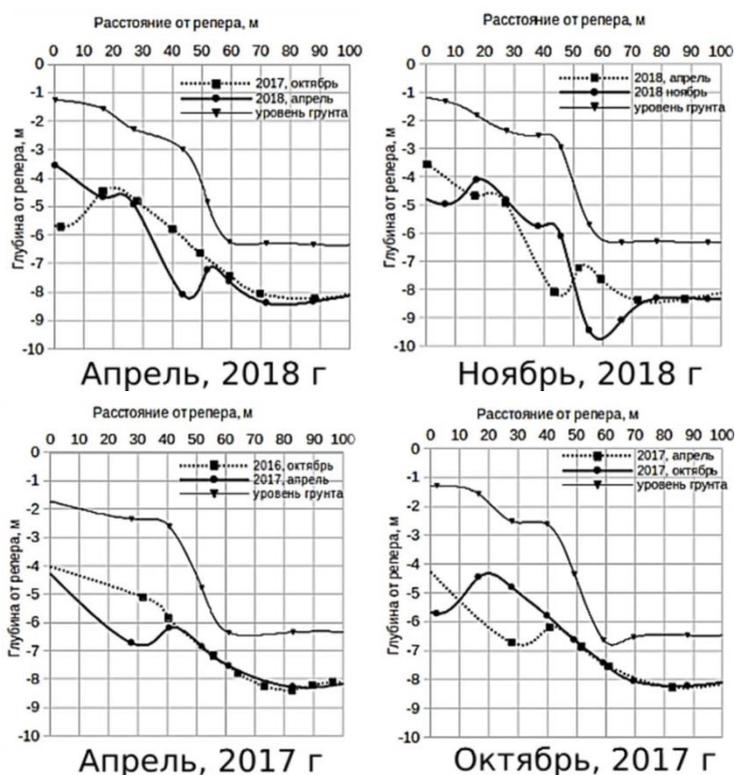


Рис. 2. Положение трубопровода на входе протоки «Табагинская» в течение ряда последовательных сезонов

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 на трубопроводе возникают изгибные деформации. При изгибе происходящие в средней

части сдвиги трубопровода могут превосходить по величине концевые сдвиги, вызываемые пучениями.

Упрощенная схема предложенного механизма представлена на рисунке 3. 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.

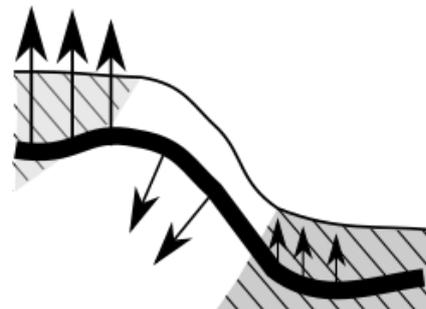


Рис. 3. Воздействие сил на подземный трубопровод в момент начала замерзания грунта

Для проверки предложенного механизма разработана математическая модель в первом приближении. Первое приближение означает, что взята упрощенная модель.

Для математического описания трубопровода можно применить уравнение (1). Но использование этой формулы затрудняет явное задание продольных усилий N . Чтобы исключить задания этого параметра, нами было выведено следующее уравнение [10]:

$$EI \frac{d^4 Z}{dx^4} - \frac{D\rho_l g}{2} \cdot \frac{d^2 Z}{dx^2} + p - q + \rho_l g = 0, \quad (2)$$

E – модуль упругости; I – момент инерции сечения трубопровода; D – диаметр трубопровода; Z – вертикальная координата оси трубопровода; ρ_l – линейная плотность трубопровода; p – линейная интенсивность сил действующих сверху на трубопровод; q – линейная интенсивность сил действующих снизу на трубопровод, g – ускорение свободного падения.

Алгоритм вычисления следующий. Задается начальная линия, по которой трубопровод лежит в талом грунте. В нижней части склона фиксируется положение трубопровода, сдвиг из-за пучений задается на верхней границе склона и в средней части склона решается уравнение (2).

В прямом решении уравнения проблему создают реакции грунта p и q , поскольку они не постоянные, а зависят от перемещения трубопровода Z . Чтобы обойти этот момент, сдвиг разделяем на множество мелких сдвигов, так, чтобы при мелком сдвиге трубопровода, реакции грунта p и q не сильно изменились, в момент решения уравнения их можно было считать постоянной величиной. В уравнении (2) существенное отличие – отсутствие явного задания продольных усилий.

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.

Все вышеуказанные данные получены нами только в одном участке. Следовательно, проведение изыскательских работ по трассе магистрального газопровода с целью поиска склонов приведет к увеличению количества экспериментальных данных, с сезонным измерением в них ПВП трубопровода. И это позволит нам изучить не только южные склоны, но и северные, где также возможны сложные эффекты с морозными пучениями.

Литература

1. Лазарев С. А., Пульников С.А., Сысоев Ю.С. Диагностирование протяженных пространственно-деформируемых участков магистральных газопроводов в системе управления техническим состоянием и целостностью ПАО «Газпром» // Территория Нефтегаз, 2016. – № 4. С. 106–115.
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. Айнбиндер, А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость: справочное пособие. М.: Недра, 1991. 287 с.
5. Бородавкин П.П. Механика грунтов в трубопроводном строительстве. М.: Недра, 1986. 224 с.
6. Горковенко А.И. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов: дис. док. техн. наук: 25.00.19: ТюмГНГУ. Тюмень, 2006. 305 с.
7. Гулин Д.А. Воздействие морозного пучения на линейную часть магистральных трубопроводов / Д.А. Гулин, Э.В. Файзуллина, Э.И. Шарипова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. №4. С.42–48.
8. Иванов И.А., Кушнир С.Я. Магистральные трубопроводы в районах глубокого сезонного промерзания пучинистых грунтов. СПб.: Недра, 2010. 174 с.
9. Марков Е.В. Обеспечение проектного положения магистральных трубопроводов в условиях пучинистых грунтов: дис. канд. техн. наук: 25.00.19: ТИУ. – Тюмень, 2020. 133 с.
10. 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.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-91-97

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ДЛИН УРАВНИТЕЛЬНЫХ РЕЛЬСОВ И РЕМОНТНЫХ РУБОК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Коссов В.С., Оганьян Э.С., Шабуневич В.И.

АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

Рассмотрены конечно-элементные модели наружного рельса кривой бесстыкового пути, содержащие различные длины соединенных накладками уравнительных рельсов и ремонтных рубок рельсов. Модели нагружены массовыми элементами, боковыми силами от колесных пар грузовых вагонов и отрицательной температурой. В результате проведения гармонического анализа выявлено, что менее нагруженными конструкциями являются участки с уравнительными рельсами длиной 25 метров. Показано также влияние высокочастотных нагрузок на долговечность соединяемых накладками рельсов.

В процессе эксплуатации на поверхности катания головки рельсов образуются различные дефекты. Давно известным дефектом поверхности катания головки рельсов является волнообразный износ. Волнообразный износ наносит большой экономический ущерб железнодорожному транспорту. При движении по рельсам с волнообразным износом увеличивается динамическое взаимодействие подвижного состава и пути и, как следствие, вибрация ходовых частей, элементов верхнего и нижнего строения пути. Ввиду наличия шероховатости, волнистости и других неровностей на поверхностях катания рельсов и качения колёс при их взаимодействии зона контакта является источником вынужденных колебаний. Эти колебания согласно экспериментальным данным по спектральному составу вертикальных ускорений элементов верхнего строения пути и ходовых частей подвижного состава охватывают широкий диапазон частот, включая акустический. Вибрация в этом диапазоне существенно не влияет на разрушение или повышенный износ материалов до тех пор, пока на определённых частотах не возникнут резонансные явления с образованием стоячих волн. Они создают дополнительные чередующиеся области растягивающих и сжимающих напряжений и, как следствие, создают условия для возникновения повышенного неравномерного износа [1]. Особую актуальность указанные негативные аспекты приобретают для скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей.

В данной работе рассмотрен наружный рельс кривой бесстыкового пути. Созданы конечно-элементные (КЭ) модели, содержащие различные длины соединенных накладками уравнильных рельсов и ремонтных рубок рельсов бесстыкового пути (рис. 1) [2–4]. Модели содержат 70 и 120 шпал со скреплениями. Рельс нагружается боковыми силами по 10 тс от каждой колесной пары грузовых вагонов при осевой нагрузке на колесо 12.5 тс. Осевая нагрузка создается тяжелыми кубиками или массовыми элементами, установленными на головках рельсов в местах расположения колесных пар. Далее на рисунке 2 показаны результаты статического анализа модели с уравнильным рельсом длиной 12.5 м, и на рисунках 3 и 4 – результаты ее гармонического анализа также при дополнительном температурном нагружении минус 38 градусов.

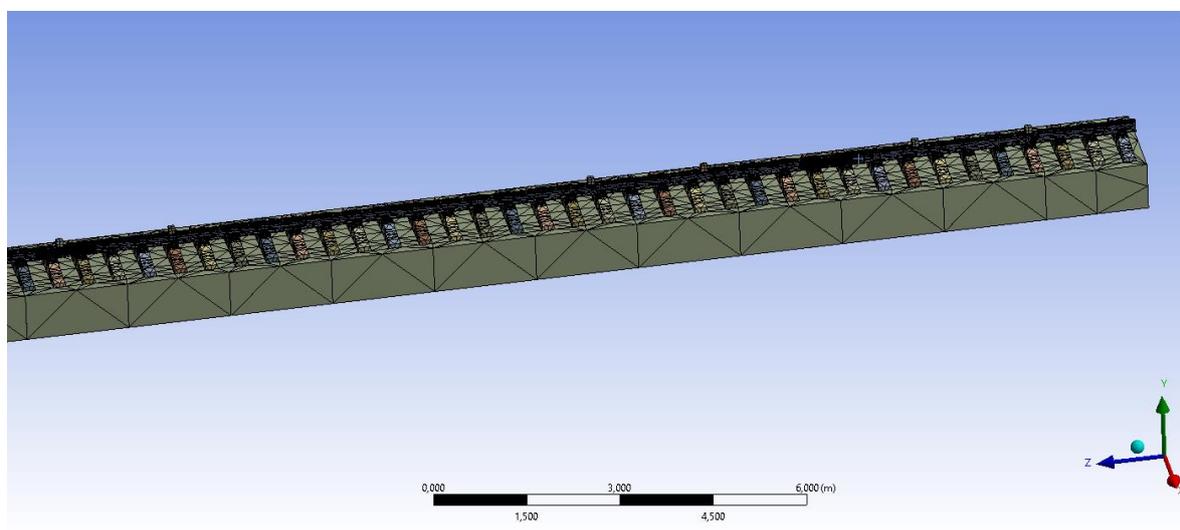
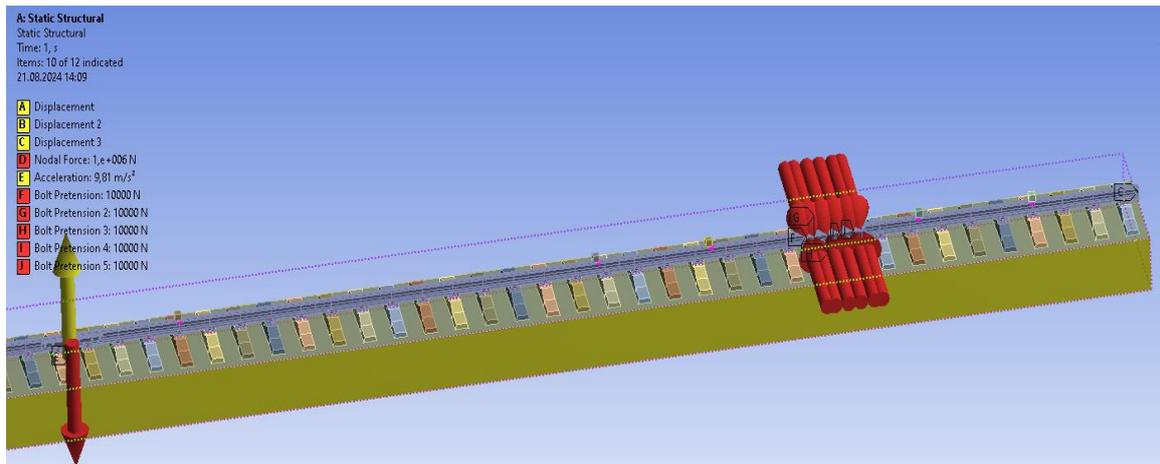
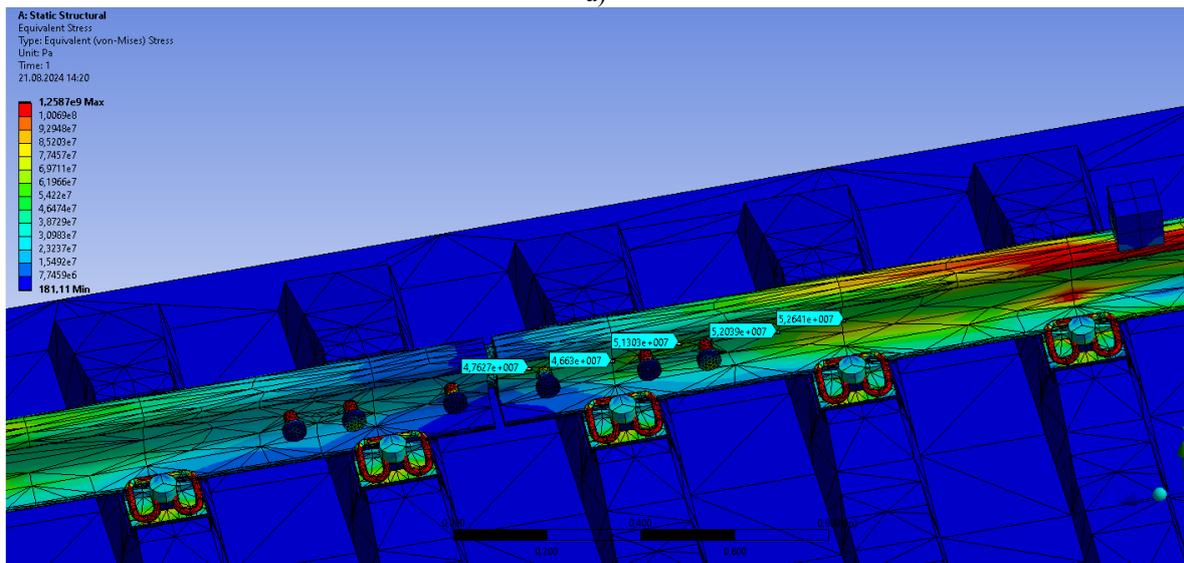


Рис. 1. Конечно-элементная модель



а)



б)

Рис. 2. Статический анализ (а) и эквивалентные напряжения Мизеса в районе накладок (б)

Проведен также гармонический анализ КЭ модели при нагружении боковыми силами от колесных пар и отрицательном температурном нагружении, на рисунках 3 и 4 показаны его результаты.

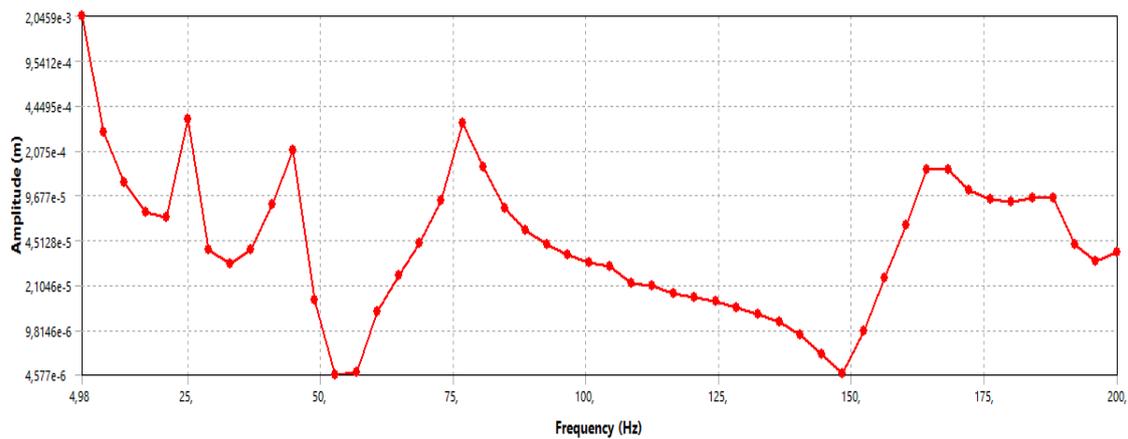


Рис. 3. График изменений поперечных перемещений по частоте в среднем узле боковой поверхности правой накладки

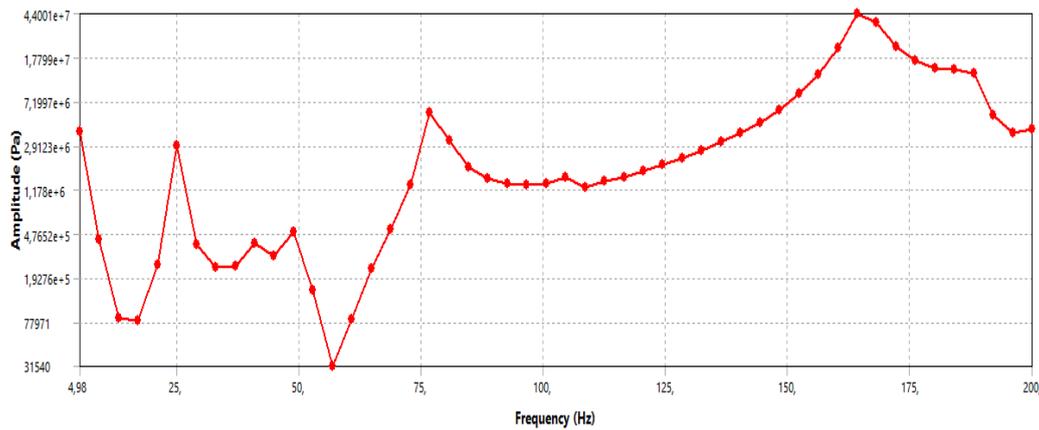


Рис. 4. График изменений продольных напряжений по частоте в среднем узле боковой поверхности правой накладке

Аналогично сделаны расчеты нескольких конструкций соединений уравнильных рельсов длиной 25, 12,5 метров и ремонтных звеньев длиной 8,3 метра с бесстыковыми плетями с помощью модельных и реальных накладок также при различных условиях закрепления и нагружения [2–4].

Сравнение между собой напряженно-деформированного состояния в районе накладок для участков бесстыкового пути с различными длинами рубок рельсов (для результатов гармонического анализа) позволяет сделать вывод, что менее нагруженными конструкциями являются участки с рубками длиной 25 метров.

Кроме того, аналогично [1] можно предположить наличие перемещающейся системы резонирующих стоячих волн под движущимся поездом.

Далее показана возможность оценки долговечности зон соединений различных уравнильных рельсов и ремонтных рубок.

Считается, что изменение частоты не оказывает значительного влияния на сопротивление усталости материалов. Так, для сталей изменение частоты нагружения в интервале 8,33–83,33 Гц не вызывает заметного изменения предела усталости, дальнейшее же увеличение частоты до 1000 Гц приводит к повышению предела усталости на 5–12% [5].

На рисунке 5 показаны наиболее характерные изломы рельсов в зонах стыков [6].



Рис. 5. Характерные изломы рельсов в зонах стыков

Создана также содержащая всего 6 шпал КЭ модель зоны стыка рельсов с шестью стянутыми по 1тс болтами, скрепляющими накладку. Результаты статического расчета модели (см. рис. 6) показаны на рисунке 7. Проведен также ее гармонический анализ низкой температуре и при нагружении правого края левого рельса боковой нагрузкой 10 тс, там же в узле установлена точечная масса 12500 кг. Результаты гармонического анализа приведены на рисунках 8–10.

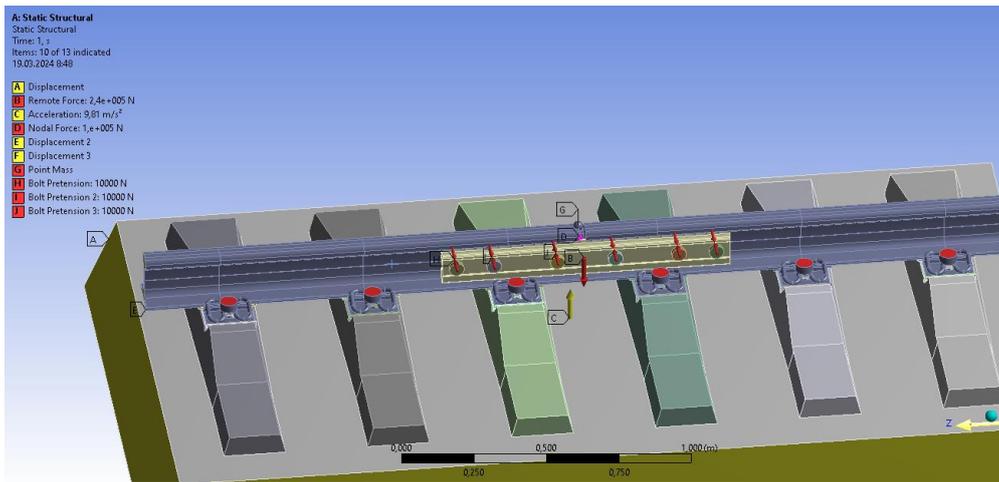


Рис. 6. Статический анализ КЭ модели при температуре минус 38 градусов

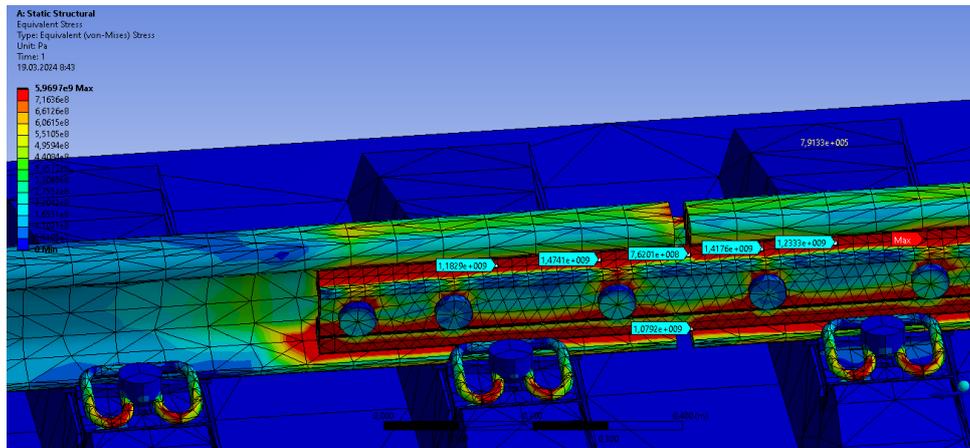


Рис. 7. Эквивалентные напряжения Мизеса в КЭ модели в районе накладок

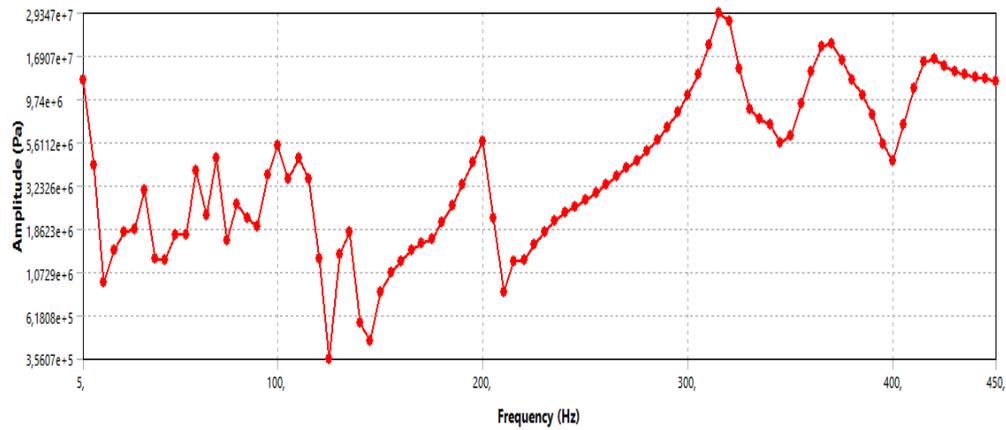


Рис. 8. График изменений продольных напряжений по частоте в узле головки рельса вблизи накладки

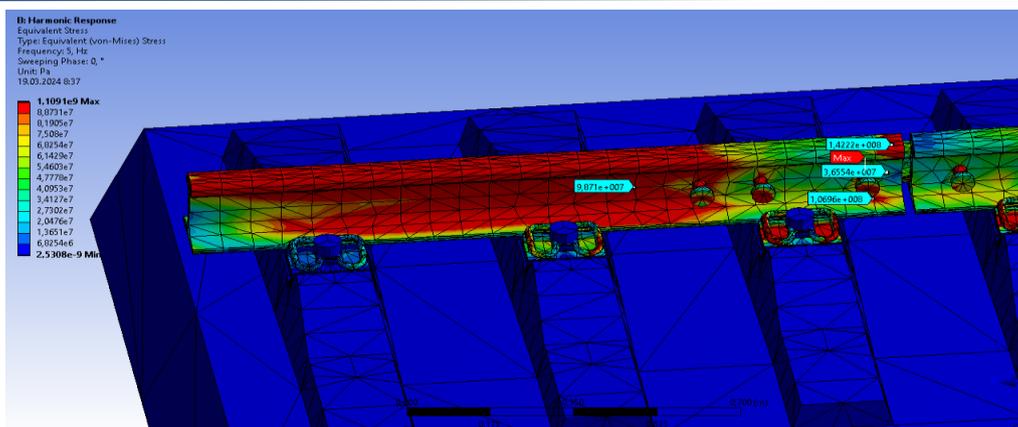


Рис. 9. Эквивалентные напряжения Мизеса в рельсе КЭ модели на резонансной частоте 5 Гц в зоне накладок (одна не показана)

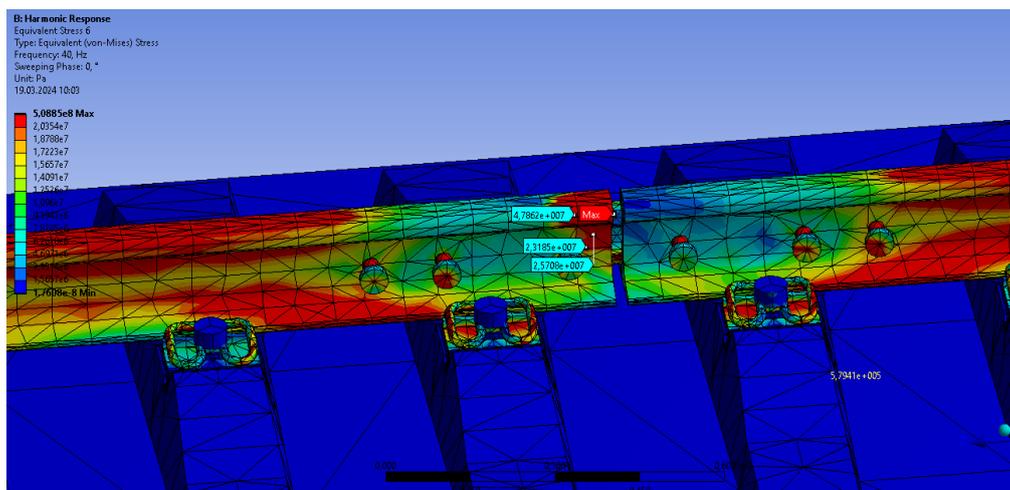
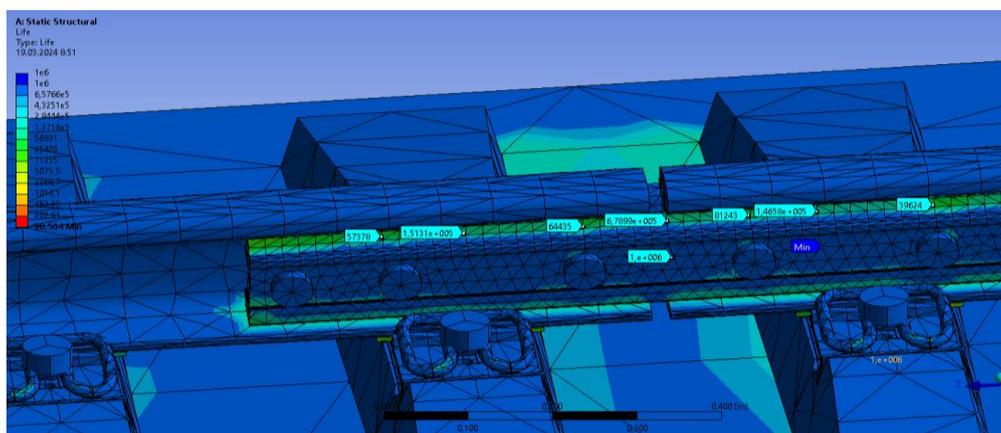
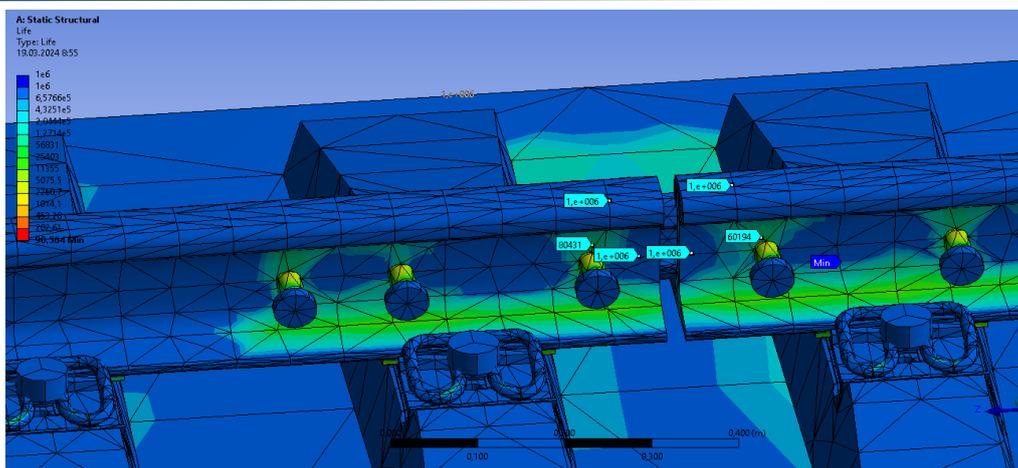


Рис. 10. Эквивалентные напряжения Мизеса в рельсе КЭ модели на резонансной частоте 40 Гц в зоне накладок (одна не показана)

Аналогичные по виду картины распределения эквивалентных напряжений Мизеса в рельсе КЭ модели получены для резонансных частот 60, 100, 200, 310 и 365 Гц в зоне накладок. Можно предположить, что именно высокочастотные напряжения от ударов колес по рельсу в зазорах обуславливают наблюдаемые в эксплуатации уголковые разрушения концов рельсов (см. рис. 5).



а)



б)

Рис. 11. Долговечность накладки (а) и концов рельсов (б) в зоне накладок

Далее проведена оценка долговечности зоны стыка. Результаты оценки показаны на рисунке 11.

Таким образом, в результате проведения гармонического анализа при нормальной и низкой температурах выявлено, что менее нагруженными конструкциями являются участки с уравнительными рельсами длиной 25 метров. Причем низкие температуры усиливают эти проявления. Показано также значительное влияние высокочастотных нагрузок на долговечность соединяемых накладками рельсов.

Литература

1. Автореферат диссертации к.т.н. Алижан А. Влияние динамических процессов в системе колесо рельс на образование волнообразных неровностей на поверхности катания рельсов, М: МИИТ, 2010. – 26с.
2. СП 238.1326000-2015 Свод правил. Железнодорожный путь. – 71с.
3. ГОСТ Р 51685-2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия
4. ГОСТ 33184-2014 Накладки рельсовые двухголовые для железнодорожных рельсов широкой колеи. Технические условия. М: Стандартинформ, 2019, – 19с.
5. Мыльников В. В. Циклическая прочность и долговечность конструкционных материалов: монография / В. В. Мыльников, О. Б. Кондрашкин, Д. И. Шетулов; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2018. –177 с.
6. Лысюк В.С. Причины и механизмы схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов. М: Транспорт, 2002. – 215с.

РАСЧЕТ НАГРУЖЕННОСТИ РАМЫ АВТОСАМОСВАЛА БЕЛАЗ-7555В И ПРИМЕР РЕМОНТА СВАРКОЙ

Михайлов В.Е.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

mve59@mail.ru

В статье проведен расчёт нагруженности рамы автосамосвала БелАЗ-7555В, которые эксплуатируются на месторождении золота Куранахского рудного поля АО «Полюс Алдан». Эти автосамосвалы имеют грузоподъемность 55 тонн, имеют двухлонжеронную раму прямоугольного профиля переменного сечения, соединенные поперечными балками. Разработана операционно-технологическая карта ремонта лонжерона рамы с заменой фрагмента с трещиной.

Рама карьерного самосвала является основным несущим элементом конструкции. В случае поломки рамы следует трудоёмкий и дорогостоящий процесс восстановления.

Рама карьерного самосвала БелАЗ 7555В состоит из двух продольных балок – лонжеронов, которые крепятся между собой поперечными балками. При движении по технологическим дорогам на раму карьерного самосвала действуют силы различной интенсивности и длительности. В силу этого несущая конструкция испытывает нагрузки на изгиб и кручение [1]. При погрузке в кузов самосвала горнорудной массы экскаватором происходят ударные нагрузки, особенно первый ковш.

Вес пустой платформы самосвала БелАЗ 7555В составляет 18000 кг. Грузоподъемность самосвала составляет 55000 кг. Таким образом, статическая нагрузка на раму самосвала составляет около 75000 кг от платформы.

Смоделирована трехмерная модель конструкции рамы самосвала в системе САПР Компас v.18 с реальными размерами и материалами. Проведен расчет и анализ конструкции на изгиб, кручение при точечном воздействии на отдельные узлы с помощью встроенного приложения системы прочностного анализа АРМ FEM. Система Компас является российской компанией трехмерного моделирования и проектирования, которая используется во всех отраслях промышленности и имеет множество инструментов, от создания эскизов и чертежей до расчета и анализа трехмерных моделей.

Кручение:

Закрепим конструкцию в точках A_1 и A_2 , крепления задней подвески. В точках B_1 и B_2 приложим равные вертикальные силы противоположной направленности $P_1 = -P_2$. Точки B_1 и B_2 являются точками крепления передней подвески (Рис. 1).

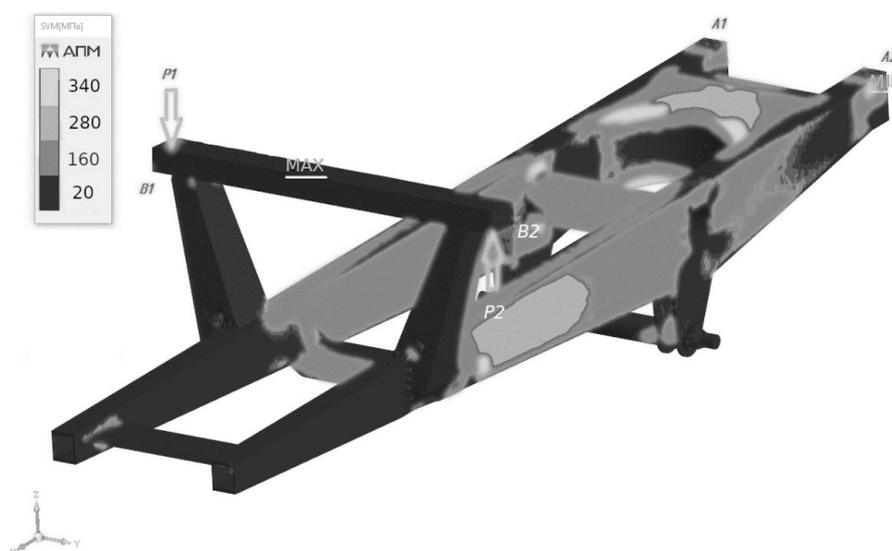


Рис. 1. Результат расчета на кручение

В результате анализа мы видим на конструкции концентрации напряжений в точках:

- стойки крепления к лонжеронам;
- боковые листы лонжеронов ближе к передним стойкам;
- места крепления второй нижней балки к лонжеронам;
- места крепления третьей поперечной балки круглого сечения;
- задняя поперечина крепления лонжеронов.

Изгиб:

Закрепим жестко модель в точках крепления задней подвески A1 и A2, а также в точках крепления передней подвески B1 и B2 (Рис. 2).

На раму действует нагрузка от веса платформы и перевозимого груза. Смоделируем эту ситуацию, нагрузив распределенной силой $P = 450$ кН на площадки прилегания платформы к раме самосвала, $P=P1+P2$.

После обработки получим следующие концентрации напряжений:

- стойки крепления передней подвески;
- площадки крепления задней подвески;
- верхняя полка лонжерона на площадках прилегания кузова;
- нижняя полка лонжерона.

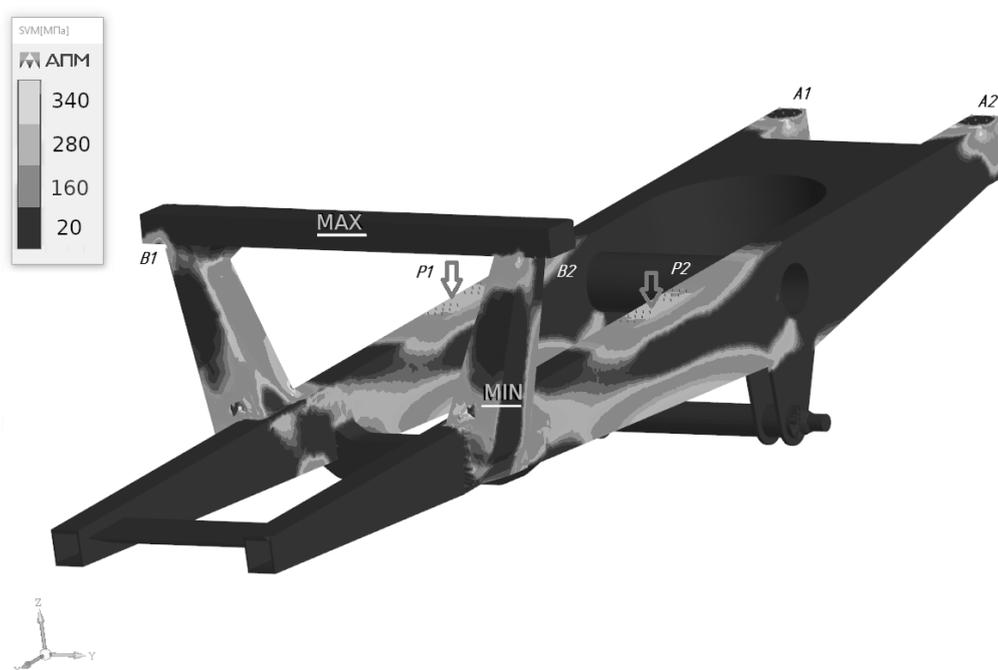


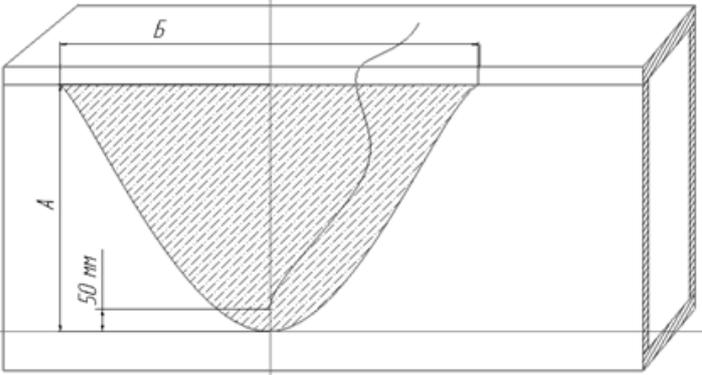
Рис 2. Результат расчета на изгиб

Статистические данные по 30 машинам БелАЗ 7555В показывают, что возникают:

- трещины на переходах от верхней полки лонжерона к его боковым листам;
- трещины на боковых листах лонжерона ниже точек приложения силы от кузова;
- трещины в места крепления третьей поперечной балки круглого сечения;
- трещины в местах крепления стоек с передней и задней стороны к лонжеронам;
- трещины кронштейнов крепления цилиндра опрокидывающего механизма.

Рама карьерного самосвала БелАЗ 7555В изготовлена из низколегированной стали 10ХСНД. Разработана операционно-технологическая карта ремонта лонжерона рамы с заменой фрагмента с трещиной:

Таблица 1. Операционно-технологическая карта ремонта лонжерона рамы с заменой фрагмента

Операции	Инструмент, материалы и приспособления
Участок подлежащий ремонту очистить от загрязнений, ржавчины и лакокрасочного покрытия, шлака, брызг и т.п до металлического блеска	Щетка, шлифовальная машина и т. п.
Произвести разметку удаляемого фрагмента с дефектом: <ul style="list-style-type: none"> – провести перпендикуляр от нижней части трещины – провести параллель верхней полке лонжерона ниже боковой трещины на 50 мм – разметить боковую стенку в рекомендуемом соотношении расстояний $A = B$, возможно уменьшение B до $2A = B$ 	Разметочный инструмент и приспособления для разметки, измерительный инструмент
Удалить размеченный фрагмент	УШМ, кислородно-плазменный резак
Произвести разделку кромок боковой стенки лонжерона под сварное соединение типа С17	УШМ, кислородно-плазменный резак
Произвести разделку кромок верхней полки лонжерона под сварное соединение С17 или С19 <ul style="list-style-type: none"> – рекомендуется разделить на всю ширину полки 	УШМ, кислородно-плазменный резак
Если сварное соединение С19: <ul style="list-style-type: none"> – изготовить подкладку для верхней полки лонжерона из стали 09Г2С округлой формы толщиной 3–4 мм. и шириной 20–30 мм. 	
Изготовить вставку для боковой стенки лонжерона с помощью шаблона из стали 10ХСНД с зазором 3 мм. с разделкой кромок под сварное соединение С17	УШМ, кислородно-плазменный резак
Очистить свариваемые кромки и прилегающие к ним зоны на расстояние не менее 30 мм от сварного соединения от загрязнений, острых углов, борозд и т. п. до однородного чистого металла	Шлифовальный инструмент
Если сварное соединение С19 равномерно вдоль шва установить подкладку с помощью прихваток	РДС, электроды УОНИИ-13/55-4
Произвести подогрев сварного участка шириной до 200 мм. до 150–175°	Кислородно-газовая горелка
Произвести сварку верхней полки лонжерона корневого шва по расчетным режимам	РДС, электроды УОНИИ 13/55-4
Перед каждым проходом произвести зачистку и визуальный осмотр шва	Молоток шлако-отбойный, щётки, шлифовальный инструмент
Произвести сварку заполняющих и облицовочных швов верхней полки лонжерона	РДС, электроды УОНИИ 13/55-5
Произвести установку фрагмента боковой стенки лонжерона на прихватки	РДС, электроды УОНИИ 13/55-3
Произвести сварку фрагмента лонжерона по расчетным режимам	РДС, электроды УОНИИ 13/55-3
Перед каждым проходом произвести зачистку и визуальный осмотр шва	Молоток шлако-отбойный, щётки, шлифовальный инструмент
Произвести снятие концентраторов напряжений шва	Шлифовальный инструмент
Произвести подогрев всего сварного участка и околошовной зоны на ширину 100 мм. на сторону до 200°	Кислородно-газовый резак
Укрыть ремонтный участок теплоизолирующим материалом	Жаростойкий теплоизолирующий материал

После полного остывания произвести ультразвуковую ударную обработку для снятия остаточных напряжений	Ультразвуковая ударная установка
Провести контроль качества произведенных работ ВИК, УЗК.	Инструменты ВИК, УЗК
Восстановить лакокрасочное покрытие	Обезжириватель, грунт, краска
Убрать рабочее место	Уборочный инвентарь

Таблица 2. Расчетные режимы ручной дуговой сварки верхней полки

Номер слоя	Диаметр электрода, мм	Род и полярность тока	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В
1	4	постоянный, обратная полярность	130–150	25–28
2 и т.д.	5		160–200	27–29

Таблица 3. Расчетные режимы ручной дуговой сварки боковой стенки

Номер слоя	Диаметр электрода, мм	Род и полярность тока	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В
1	3	постоянный, обратная полярность	70–90	22–24
2 и т.д.	4		130–150	25–26

Литература

1. Михайлов В.Е. Исследование замедленного разрушения сварных соединений и разработка технологии ремонтной сварки несущих узлов техники, эксплуатируемой на Севере. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Киев. 1986 г. 256 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-101-104

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ МАГНИЕВЫХ СИЛИКАТОВ НА КОЛЛОИДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА

Москвитин С.Г., Москвитина Л.В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Horo48@yandex.ru

При обеспечении высокой прочности бетона большая роль принадлежит управлению формированием плотной структуры бетона и интенсификацией процессов гидратации цемента. Приведены результаты исследования возможности применения магнезиальных горных пород – дунита Центрального Алдана (Якутия) для производства бетонов. Установлено, что применение предварительно обожженного дунитового порошка с удельной поверхностью $8000 \pm 200 \text{ см}^2/\text{кг}$ в комплексе с суперпластификатором СП-1 позволяет получить автоклавный порошковый бетон класса по прочности до В45.

Введение. В современных условиях в технологии бетонов произошли значительные изменения благодаря многочисленным исследованиям по получению высокопрочных бетонов, результаты которых доказывают эффективность применения тонкодисперсных минеральных добавок в комплексе с суперпластификаторами. В отличие от традиционного бетона реакционно-порошковый бетон многокомпонентный, без крупного заполнителя, где до 50% от массы цемента можно заменить тонко- или ультрадисперсной минеральной добавкой в зависимости от его природы, реакционной активности при сохранении требуемой удобоукладываемости бетонной смеси [1–4].

Целью данной работы является исследование прочностных свойств композитных связующих с добавкой тонкодисперсных ультраосновных магматических пород Центрального Алдана Якутии и создание на их основе высокопрочных мелкозернистых бетонов.

Материалы и методы исследований. В экспериментах для изготовления мелкодисперсных минеральных добавок к цементу использована дунитовая порода щелочно- ультраосновного массива в северной части Алдано-Станового щита. Химические составы пород и клинкера представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав материалов, масс.%

Наименование Материала	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	R ₂ O	Δm _{пр}	п.п.п.	MgO/S iO ₂
Дунит	55,70	36,24	1,42	5,31	0,60	-	0,6		1,54
Портландце- ментный клин- кер	4,06	20,40	4,10	2,76	0,15	0,75	-	0,11	
Песок	0,86	79,36	9,97	0,22	0,84	4,47	-	0,92	

Для определения минералогического состава дунита были использованы рентгенофазовый анализ и термический анализ. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на рентгеновском дифрактометре Shimadzu ХКС 7000 с использованием излучения Си- анода, шаг сканирования 0,05°/мин, время измерения интенсивности в точках сканирования 0,5 с, напряжение на трубке 40 кВ, сила тока 30 мА. Термоанализ (ТГ/ДСК/ДТА) проводили с помощью термоанализатора для синхронного термического анализа NETSCH TT-DSC STA 449 Jupiter. Исследование проводилось до 1000 °С. Исследования были выполнены в Центре управления научно-исследовательским оборудованием Томского политехнического университета (исполнитель доцент, к.т.н. Н.А. Митина)

Петрографический состав цементных камней с добавкой дунитовой породы исследован в прозрачных и полированных шлифах на оптическом микроскопе Axio Scope A2m/2mv (Япония).

Результаты исследования и обсуждение. Для оценки влияния дунитовой добавки на свойства композитного связующего получены три пробы цементов путем механического смешивания исходного портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Б с исследуемой добавкой в количестве 30, 40 и 50% в составе вяжущего. В качестве контрольного состава принят портландцемент без добавки.

Для определения прочности на сжатие были заформованы образцы из цементного теста нормальной густоты размерами 2×2×2 см, которые твердели при температуре 20 ±2 °С в водной среде. Для повышения степени гидратации часть образцов подвергалась автоклавированию при давлении 1,0–1,5 атм. Полученные результаты сравнивали с показателями портландцемента, твердевшего в нормально влажностных условиях. Все образцы испытывали в возрасте 7, 14 и 28 суток.

Влияние дисперсной дунитовой добавки на прочность и кинетику твердения мелкозернистого бетона изучалось путем испытания образцов-балочек размерами 4×4×16 см.

Приготовление бетонной смеси производилось в лабораторном смесителе СЛ-5. Порядок подачи материалов и перемешивание смеси осуществляли следующим образом: сначала перемешивали песок, цемент и часть воды затворения в течение 2 мин; затем в смесь вводили предварительно подготовленную суспензию тонкодисперсной дунитовой добавки с суперпластификатором СП-1 и перемешивали в скоростном смесителе в течение 3 мин.

Изготовление и испытание образцов мелкозернистого бетона выполнены в соответствии ГОСТ 310.4-8.1. При подборе состава мелкозернистого бетона исходили из условия обеспечения расплыва конуса на встряхивающем столике 100–115 мм. Составы мелкозернистого бетона даны в таблице 2.

Образцы после пропарки в автоклаве хранились в камере нормально-влажностного твердения и испытаны в возрасте 7, 14 и 28 суток.

Таблица 2. Составы мелкозернистого бетона на кварц-полевошпатовом кварцевом песке, кг/м³

№ состава	Вяжущее, в% от массы		Соотношение между песком и вяжущим по массе, П/В	Химическая до- бавка СП-1, % от массы вяжущего	Водо-вяжу- щее Отношение, В/В	Средняя плотность смеси, кг/м ³
	Цемент	Дунитовая до- бавка				
1	70	30	2,92	-	0,37	2166
2			3,04	0,7		2156
3			2,92	-	0,39	2240
4			3,26	0,7		2226

На рисунке 1 показаны результаты испытания цемента. Часть образцов, твердевших в камере нормально влажностного хранения, обозначены маркировкой: Д0 – 100% ЦЕМ I 42,5Б, Ду30-В – 70% ЦЕМ I 42,5Б +30%ДБ, а бетоны автоклавного твердения: Ду30-А – 70% ЦЕМ I 42,5Б +30%ДБ, Ду40-А – 60% ЦЕМ I 42,5Б +40%ДБ, Ду50-А – 50% ЦЕМ I 42,5Б +50%ДБ.

Как видно из рис. 1, в нормальных условиях твердения портландцемент ЦЕМ I 42,5Б в 28 суточном возрасте показал активность 48,0 МПа, что соответствует требованию ГОСТ 31108-2016.

Образцы с 30% добавкой дунита, затворенные водой с автоклавным пропариванием на всех периодах твердения показали прочность на сжатие выше контрольных образцов. После 28 суточного твердения прочность образцов с 30% добавкой дунита автоклавного твердения выше контрольных на 56,8%.

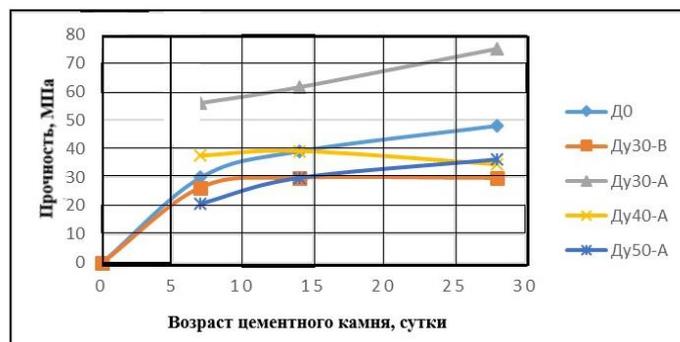


Рис. 1. Прочность цементного камня с добавками дунита

Проведенные исследования показали повышение гидратационной активности дунита в результате предварительного обжига дунита с последующей механической активацией. Серпентинитовые минералы при обжиге и механоактивации теряют часть кристаллизационной воды и становятся активными центрами для осаждения гидросиликатов магния. Появление многочисленных активных центров при дальнейшей гидратации способствуют образованию дисперсной структуры композиционного вяжущего. Это подтверждается прочностью на сжатие автоклавных цементных камней, с содержанием тонкодисперсной дунитовой добавки (рис. 1).

Изучение влияния тонкодисперсной дунитовой добавки в комплексе с суперпластификатором СП-1 на прочность свойства мелкозернистого бетона использовали составы, указанные в табл. 2. Результаты испытания образцов показаны на рис. 2. Как видно, из рис. 2, прочность тонкозернистого порошкового бетона с максимальным размером зерен песка 0,4мм составляет от 40,10 до 55,6 МПа, что соответствует классам по прочности от В30 до В45. Результаты испытаний показали, что прочность мелкозернистого бетона с композитным вяжущим можно повысить применением суперпластификатора СП-1.

Известно, что в процессе гидролиза образуется гидролизная известь (портландит) с низкой цементирующей способностью. Свободная известь в порах цементного камня, по существу, является балластом, не увеличивающим прочность бетона и его коррозионную стойкость [5, 6]. Основная задача науки по созданию бетонов нового поколения – химическое связывание портландита в теле бетона в прочные цементирующие соединения – гидросиликаты кальция. Это достигается введением в состав бетона реакционно-активных наноразмерных порошков горных пород [7–9].

Проведенными исследованиями показано, что механизм действия мелкодисперсного дунита заключается в том, что они вступают в химическую реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся

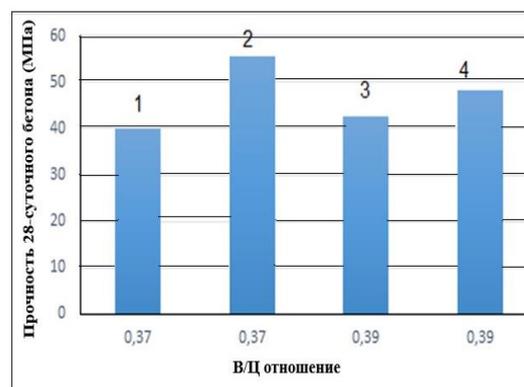


Рис. 2. Зависимость прочности бетона от соотношения В/Ц с композиционным вяжущим с добавкой 30% дунита от массы вяжущего от количества В/В: 1 – ДуМ36 -1 без добавки; 2 – ДуМ36 -1 с добавкой; 3 – ДуМ36 -2 без добавки; 4 – ДуМ36 -2 с добавкой

в процессе гидратации портландцемента, образуя дополнительные низкоосновные гидросиликаты, которые, увеличивая гелевую составляющую цементного камня, улучшают прочностные и деформативные свойства бетона.

Выводы:

1. Серпентинитовые минералы в составе дунита при обжиге и механоактивации теряют часть кристаллизационной воды и становятся активными центрами для осаждения гидросиликатов магния. Появление многочисленных активных центров при дальнейшей гидратации способствуют образованию дисперсной структуры композиционного вяжущего, что обусловило высокую прочность цементного камня.

2. Продуктами гидратации при композиции «портландцемент – дунит» при затворении водой являются портландит или кальцит, сцементированные мелкокристаллическими гидросиликатами кальция, Са-Mg алюмосиликатами, магниевыми силикатами, что обусловило прочностные и деформативные свойства бетона.

3. Установлено, что применение предварительно обожженного дунитового порошка с удельной поверхностью $8000 \pm 200 \text{ см}^2/\text{кг}$ в комплексе с суперпластификатором СП-1 позволяет получить автоклавный порошок бетон класса с прочностью до В45.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-43-140018

Литература

1. Калашников В. И., Гуляева Е. В., Валиев Д. М. и др. Высокоэффективные порошково-активированные бетоны различного функционального назначения с использованием суперпластификаторов//Строительные материалы, 2011. № 11. С. 44–47.

2. Калашников В.И., Тараканов О.В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения// Строительные материалы. 2017. № 1–2. С. 62–67.

3. Richard P., Cheybezy M. Composition of reactive Powder Concretes. Scientific Division Bougues, Cement and Concrete Research, Vol. 25. 1995. No 7. Pp.1501–1511.

4. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Кардумян Г. С. Новые модифицированные бетоны. – М.: ООО «Типография «Парадиз», 2010. 238 с.

5. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.

6. Нанопроцессы в технологии строительных материалов / Г.И. Бердов, В.Н. Зырянова, А.Н. Машкин, В.Ф. Хританков // Строительные материалы. 2008. № 7. С. 76–80.

7. Mehta P. K. Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development // ACI Concrete International. 2016. Vol. 24(7). P. 23–28.

8. Lian H., Wu Z. Sustainable development of concrete and high performance cementitious material // Concrete. 2015. No.6. P. 8–12.

9. Худякова Л.И., Константинова К.К., Нариханова Б.Л. Вяжущие материалы на основе дунита// Строительные материалы. 2000. № 8. С.33–34.

ТЕХНОЛОГИИ ПОДВОДНОЙ МОКРОЙ СВАРКИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ОХЛАЖДЕНИЯ

Паршин С.Г.¹, Гао Ю.¹, Никулин В.Е.¹, Левченко А.М.², Иванова И.В.¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

² ООО «УНТЦ «Сварка», Санкт-Петербург

parshin@spbstu.ru

Разработаны технологии подводной мокрой сварки низколегированной стали D40 с применением ферритной порошковой проволоки ППС-АПЛ2. Исследована микроструктура, остаточные напряжения, распределение микротвердости шва и зоны термического влияния. Применение подогрева и термоизоляции позволило снизить остаточные напряжения, микротвердость и степень микроструктурной анизотропии шва и зоны термического влияния.

Введение. Основной проблемой при подводной мокрой сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности является появление холодных трещин в зоне термического влияния (ЗТВ), которые возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов: наличия закалочных структур, диффузионно-подвижного водорода и остаточных растягивающих напряжений [1, 2].

Целью работы являлось снижение остаточных сварочных напряжений и анизотропии шва при подводной мокрой сварке низколегированной стали D40 за счет уменьшения скорости охлаждения и улучшения микроструктурного состояния.

1. Методика исследований. Для мокрой сварки использовали ферритно-перлитную судостроительную сталь повышенной прочности D40 по ГОСТ Р 52927-2015 с эквивалентом углерода 0,302%с пределом текучести 435 МПа, твердостью 173 HV. Для сварки использовали самозащитную порошковую проволоку ППС-АПЛ2 по ТУ 1274-001-83763787-2014 диаметром 1,6 мм. Подводную мокрую сварку производили на глубине 500 мм с применением источника EVOMIG-500 (ООО «ЗТИ», Санкт-Петербург) при скорости сварки 320 мм/мин, токе 215–240 А, напряжении 30–32 В, погонной энергии 903–945 Дж/мм. Остаточные напряжения исследовали в сечении по центру пластины со сварным швом методом рентгеновской дифракции анализатором «НеРКА» (ООО «РаДиаТех», г. Гатчина).

2. Результаты исследований. Выполняли подводную сварку 5-ти образцов: № 1 обычный режим; № 2 обычный режим с индукционным подогревом до 95 °С; № 3 обычный режим с теплоизоляцией; № 4 импульсный режим; № 5 импульсный режим с подогревом. Максимальная величина продольных положительных растягивающих напряжений в образцах № 1, 2, 3 достигала в ЗТВ: 491–492 (ср. 492), 313–404 (ср. 359), 348–411 (ср. 380) МПа. Таким образом, применение подогрева и теплоизоляции уменьшило среднюю максимальную величину растягивающих напряжений в ЗТВ в 1,37 и 1,29 раза.

Максимальная величина продольных растягивающих напряжений в образцах № 4, 5 достигала в ЗТВ: 416–561 (ср. 488), 420–436 (ср. 428) МПа. Таким образом, в импульсном режиме возникали продольные напряжения до 561 МПа, что выше в 1,14 раза максимума напряжений при сварке в обычном режиме. Применение подогрева в импульсном режиме уменьшило среднюю максимальную величину растягивающих напряжений в ЗТВ в 1,14 раза.

Измерение микротвердости производили твердомером Durascan-50 G5 при нагрузке 2 Н с шагом 250 мкм. Применение подогрева и теплоизоляции при подводной мокрой сварке стали D40 снизило твердость в верхней части шва в 1,29–1,53 раза с 275 HV до 179–212 HV, в нижней части шва в 1,17–1,43 раза с 247 HV до 172–211 HV, на границе шва с 347–358 HV до 286–301 HV в 1,15–1,25 раза.

Типичная микроструктура шва состояла из зерен размером 100–220 мкм первичного феррита (FSP) со вторичной фазой из игольчатого феррита (AF) и пластинчатого феррита (SPF) внутри зерен FSP. На границе шва отмечалось увеличение объема участков нижнего

бейнита (LB) с АФ и появление мартенсита (М) речной морфологии. Применение подогрева в обычном режиме привело к увеличению объема PF в 3–5 раз, отсутствию АФ, уменьшению размера зерен FSP в 2–2,2 раза, уменьшению доли GBF и LB. На границе шва увеличился объем PF и LB с АФ, а также сократился объем мартенсита, что способствует снижению твердости. Применение теплоизоляции в обычном режиме увеличило объем и размер зерен PF в 2 раза, к увеличению длины и ширины АФ в 2–3 раза. На границе шва увеличился объем PF, LB с АФ при отсутствии мартенсита, что способствует снижению твердости.

При импульсном режиме микроструктура отличалась значительным снижением доли и диаметра зерен FSP и GBF в 1,4–2 раза, наличием участков LB и мартенсита речной морфологии, что способствует росту твердости. На границе шва увеличился объем LB и М, а также обнаружены холодные микротрещины длиной 400–600 мкм в мартенсите. Применение подогрева при импульсном режиме увеличило объем GBF и PF в 2–3 раза, однако на границе шва также обнаружили микротрещины длиной 400–600 мкм. Причиной образования холодных микротрещин на границе шва является совместное действие факторов: высоких растягивающих напряжений и образование мартенсита. Третьей причиной является возможный рост концентрации диффузионного водорода в локальной зоне между мартенситным слоем и ферритным присадочным материалом. Из-за различия в коэффициентах диффузии водорода в разнородных материалах на границе феррит-мартенсит максимум концентрации диффузионного водорода достигает до 180% от концентрации водорода в шве [3, 4]. По данным [5] и по уточненным исследованиям вакуумным методом, концентрация диффузионного водорода в шве при мокрой сварке порошковой проволокой ППС-АПЛ2 составляет 23–30 мл/100 г, т. е. локальная концентрация водорода на границе ферритного шва с мартенситным слоем в ЗТВ может достигать 41–54 мл/100 г.

Выводы:

1. Таким образом, методом рентгеновской дифракции установлено, что при подводной мокрой сварке стали D40 образуется продольное и поперечное поле остаточных напряжений сложной конфигурации с критической величиной растягивающих напряжений на границе шва, которая превышает предел текучести стали. Применение подогрева и теплоизоляции позволило уменьшить максимальную величину продольных напряжений на границе шва в обычном режиме в 1,29–1,37 раза, в импульсном режиме в 1,14 раза.

2. При подводной мокрой сварке судостроительной стали D40 с применением ферритной порошковой проволоки ППС-АПЛ2 в обычном и импульсном режиме в шве формируется анизотропная микроструктура, состав и морфология которой изменяется в поперечном сечении шва. Микроструктура шва состоит из зерен первичного феррита со вторичной фазой игольчатого феррита, а также зернограничного и полигонального феррита. На границе шва возникают участки нижнего бейнита и мартенсита, что увеличивает твердость до 347–358 HV.

3. Применение подогрева и теплоизоляции позволило снизить твердость в верхней части шва в 1,29–1,53 раза, в нижней части шва в 1,17–1,43 раза за счет увеличения объема полигонального феррита в 2–5 раз, а также на границе шва в 1,15–1,25 раза за счет уменьшения объема мартенсита. В импульсном режиме подогрев снизил максимальную твердость в шве в 1,16–1,2 раза, на границе шва в 1,05–1,18 раза за счет уменьшения объема мартенсита.

Литература

1. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 487 с.
2. Паршин С.Г. Материалы и технологии подводной сварки. Монография. Санкт-Петербург, Издательство Политех-Пресс, 2023. 468 с.
3. Karkhin V.A., Levchenko A.M., Starobinskii E.B., Parshin S.G. Effect of Microstructural Inhomogeneity on Hydrogen Diffusion in Welded Joints. *Materials Today: Proceedings* 2020, 30, 1.
4. Rudskoi A.I., Karkhin V.A., Starobinskii E.B., Parshin S.G. Modeling of Hydrogen Diffusion in Inhomogeneous Steel Welded Joints. *Materials* 2022, 15, 7686.
5. Parshin S.G., Levchenko, A.M., Maystro, A.S. Metallurgical Model of Diffusible Hydrogen and Non-Metallic Slag Inclusions in Underwater Wet Welding of High-Strength Steel Metals 2020, 10, 1498.

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ

Петров В.Н.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

v.n.petrov@iptpn.ysn.ru

Предлагается методика оценки трещиностойкости при хрупком разрушении в условиях нагружения расклинивающим ударом по предварительно статически нагруженному образцу (комбинированное нагружение) на основе энергетического подхода.

Трещиностойкость материалов, особенно в условиях низких климатических температур, в значительной степени зависит от неоднородности напряженного состояния и скорости приложения нагрузки. При этом до сих пор экспериментальные исследования динамического разрушения предварительно нагруженных образцов из конструкционных материалов представляют значительные трудности технического характера. В связи с этим большую роль приобретают модельные исследования, предназначенные для разработки экспериментальных методик и выявления основных закономерностей накопления повреждений и разрушения материала в условиях расклинивающего удара по предварительно нагруженному образцу (комбинированное нагружение).

Целью данной работы является разработка и расчетно-экспериментальное обоснование методики оценки трещиностойкости при хрупком разрушении в условиях нагружения расклинивающим ударом по предварительно статически нагруженному образцу (комбинированное нагружение).

Экспериментальные исследования по комбинированному нагружению образцов осуществлялись на модельной установке «МИУ-1», разработанной в ИФТПС СО РАН Семеновым Х.Н. и Ларионовым В.П. Схема нагружения приведена на рис. 1 [1]. В эксперименте испытывались образцы с одним боковым надрезом при фиксированных нагрузках в области упругой пропорциональности модельного материала полиметилметакрилата (ПММА) при следующих температурах $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Также, варьируемыми величинами были приложенная нагрузка P и энергия удара бойка W .

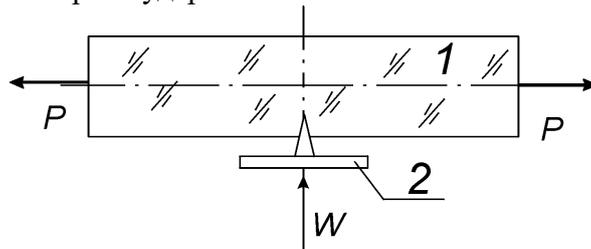


Рис. 1. Схема нагружения образца: 1 – образец типа ОБН; 2 – боек МИУ-1

Для случая комбинированного нагружения, на основе зависимости распределения компонент тензоров деформации и напряжения от скорости распространения трещины, разработан энергетический критерий оценки трещиностойкости. Исходными данными для решения такой задачи являются скорость и длина трещины в момент регистрации. В этом случае представляется целесообразным применение метода, разработанного Е. Шер и другими авторами [2]. Е.Шер основывался на работах Ирвина и решении Крэггса для задачи о стационарном распределении компонент тензоров деформаций и напряжений на берегах разреза. Использовалось предположение о том, что в окрестности вершины произвольно движущейся трещины напряжения имеют особенность порядка $r^{-1/2}$, где r – расстояние от вершины трещины, которое справедливо для статических случаев, но также распространяется на динамику. С учетом порядка данной особенности находят угловое распределение напряжений вокруг кончика движущейся трещины. Поток энергии в вершину трещины выражается соотношением:

$$G(v) = \frac{\pi x}{\mu} \left[-\frac{(1-\beta)\sqrt{\alpha}\sigma_{22}^2}{(1+\beta)-4\sqrt{\alpha\beta}} \right] \quad (1)$$

где $\alpha = 1 - \frac{v^2}{c_1^2}$, $\beta = 1 - \frac{v^2}{c_2^2}$. Выражение (1) по существу является энергетическим критерием разрушения Гриффитса при $v \rightarrow 0$.

Основополагающей величиной здесь является значение потока энергии, поступающей в вершину движущейся трещины, под которым понимают отношение мгновенного потока энергии к скорости образования новой поверхности. Набор дискретных данных значений G можно представить как изменение энергии деформации, приходящееся на единицу новой поверхности разрушения, путем ввода ΔG – разности двух соседних значений потока энергии.

Для проведения численного эксперимента по определению ΔG , была разработана модель роста трещины на основе структурного подхода Нейбера-Новожилова и термокинетической концепции Журкова [3].

$$X = \frac{A}{d} \exp\left(\frac{B\sigma_{пр} + W_B}{kT}\right) \quad (2)$$

где T – температура, k – постоянная Больцмана, d – структурный размер, $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение (отношение приложенной нагрузки P к площади сечения образца), W_B – энергия удара бойка, A – поправ. коэф. [м²], B – поправ. коэф. [м³].

Данная модель дает хорошее совпадение с экспериментальными данными на протяжении первой и второй зон разрушения, но имеет расхождение в третьей зоне – этапу распространения трещины с постоянной средней скоростью. Ввиду превалирования механизма долома. Таким образом, мы получили набор экспериментальных данных и значений, полученных из численного эксперимента на основе разработанной полуэмпирической модели развития трещины.

Следующим шагом является адаптация эмпирической модели развития трещины к нахождению критического значения потока энергии в вершину трещины. В виде исходного критического параметра выбрана критическая длина трещины, определяемая из данных фрактографических исследований поверхностей излома образцов под действием комбинированного нагружения. Данные этих исследований занесены в таблицу 1.

Таблица 1. Критическая длина трещины при комбинированном статико-динамическом нагружении

Сила нагружения, P _{ст} , Н	Энергия удара бойка, W _б , Дж	Критическая длина трещины l _{тр*} , мм		
		20°С	-40°С	-90°С
245,3	17,3	8,6	7,3	6,4
	45,0	8,4	6,5	5,6
	135,0	7,3	6,4	5,2
490,5	17,3	7,2	6,2	5,7
	45,0	6,6	5,4	5,2
	135,0	6,5	5,2	4,8
981,0	17,3	7,6	5,4	5,2
	45,0	6,8	6,0	4,7
	135,0	6,7	6,2	4,8

При исследовании фрактограмм поверхностей разрушения образцов, посредством электронной растровой микроскопии обнаружено, что поверхности разрушения имеют три вида последовательных зон:

- зеркальная;
- матовая;
- перьевая.

Первая зона, характеризуется следами в виде бороздок на гладкой поверхности, которые ортогональны фронту продвижения трещины. Данная зона соответствует начальной, медленной, стадии распространения трещины. Экспериментальные данные показали, что с увеличением энергии удара бойка, протяженность данной зоны уменьшается (табл. 1).

В первой зоне разрыв связей происходит в вершине трещины, т. е. в области перенапряжений, которые характерны независимо от того, через какие элементы молекулярной или надмолекулярной структуры проходит ее вершина. Вероятность разрыва в этой области больше, чем в других местах образца, так как определяется локальным напряжением в вершине трещины, а не средним напряжением в образце \square . Согласно работам О.Ф. Кириенко, конец данной зоны соответствует началу хрупкого разрушения полимеров [4]. Следовательно, в нашем случае критическая длина трещины определяется суммой начальной длины надреза полимерного образца с ОБН и протяженности зеркальной зоны разрушения:

$$l_{\text{тр}}^* = l_0 + l_{\text{зер}}; \quad (3)$$

Вторая зона со следами в виде «парабол» или «гипербол» и линий раздира соответствует более высоким уровням энергий и скоростей распространения трещины.

Третья, перьевая, зона на поверхности разрушения отвечает третьему этапу распространения трещины с постоянной средней скоростью и характеризуется рельефом в виде «чешуек». Между второй и третьей зонами на поверхности разрушения наблюдается достаточно резкая граница.

На основе экспериментальных данных и эмпирической зависимости, при распространении трещины определяются три взаимозависимых параметра: x – координата вершины трещины, V – скорость роста трещины и σ_{22} – обобщенное напряжение действующей комбинированной статико-динамической нагрузки. Использование далее значений (2) и (3) с учетом данных таблицы 1 в выражении (1) позволяет получить значения потока энергии, поступающей в вершину движущейся трещины. Размерность потока энергии – Дж/м².

В итоге критерий оценки трещиностойкости в условиях хрупкого динамического разрушения можно представить, как нахождение критического значения потока энергии, соответствующего критической длине трещины.

$$G_{\text{кр}} \leq G(l_{\text{тр}}^*) \quad (4)$$

Таким образом, по предложенной методике были определены значения потока энергии, поступающего в вершину движущейся трещины при различных скоростях нагружения полимерных образцов. Полученные при этом зависимости относительно времени распространения трещины отражены на рис. 2. Линиями (точки перегиба) показаны расчетные данные, полученные согласно эксперименту, точками – значения модуля потока энергии, вычисленные на основе разработанной эмпирической зависимости.

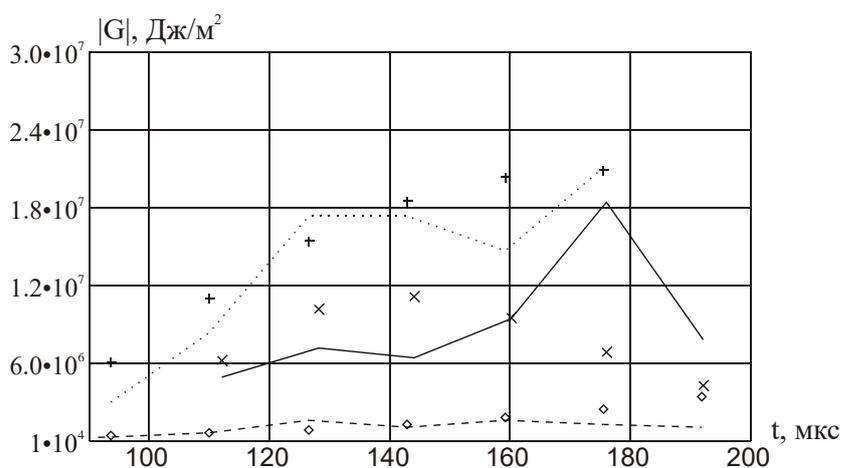


Рис. 2. Зависимость модуля потока энергии по времени для различных температур испытания при одинаковых условиях нагружения ($W_B=135$ Дж, $P=981$ Н)

Штриховая – -90 °C (данные эксперимента); « \diamond » – из эмп. зависимости.
 Пунктирная – -40 °C (данные эксперимента); «+» – из эмп. зависимости.
 Сплошная – $+20$ °C (данные эксперимента); «x» – из эмп. зависимости

Как и следовало ожидать, наименьший поток энергии, поступающей в вершину трещины, соответствует случаю разрушения образца при $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Два других случая на начальном этапе разрушения идентичны (размеры «зеркальных» зон сопоставимы), и следует считать, что на данном этапе преобладающую роль играет расклинивающее действие бойка. На следующем этапе, при температуре испытаний $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, возможно, разрушение поддерживается за счет накопленной упругой энергии деформации. В таблице 2 представлены полученные критические значения модуля потока энергии для данных экспериментов.

Таблица 2. Зависимости критических параметров материала ПММА типа ТОСП ГОСТ 17622-72 от температуры при $W_b=135\text{ Дж}$, $P=981\text{ Н}$

Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	-90	-40	20
Критическое значение модуля потока энергии, G_c , Дж/м ²	$1,59 \cdot 10^4$	$1,581 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$

Таким образом, экспериментальные и расчетные исследования закономерностей формирования модельного материала позволили получить следующие результаты:

1. Предложена модель роста трещины в условиях динамического воздействия на статически нагруженный образец на основе структурного подхода Нейбера-Новожилова и термокинетической концепции Журкова;

2. Разработана универсальная расчетно – экспериментальная методика оценки трещиностойкости при хрупком разрушении в условиях комбинированного нагружения, расклинивающим ударом по предварительно статически нагруженному образцу на основе энергетического подхода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 124032600080-4, научная тема FWRS-2024-0035).

Литература

1. Семенов Х.Н., Ларионов В.П. Динамика развития хрупких трещин и высокоскоростное фотографирование. В 2 частях/магнитно-импульсная установка для динамических испытаний материалов и высокоскоростное фотографирование быстрых трещин. Часть 2. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1993.-188 с.
2. Шер Е.Н. Об энергетическом условии в носике нестационарной трещины. ПМТФ, 1969, № 3.
3. Petrov V., Lepov V. Model of the brittle crack growth under the combined mode loading // Procedia Structural Integrity, 14–17 октября 2019 года, 2019. P. 87–92. – DOI 10.1016/j.prostr.2019.12.120. – EDN ZWYPLU.
4. Cirienco O.F., Leskovsky A.M., Regel V.R. Fractographic method of determination of conditions of transition to brittle fracture polymers // Problems of strength. 1972. № 7. P. 60–63.

БИОЗАРАЖЕНИЕ КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ СОРТНОСТИ БИВНЕЙ МАМОНТА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

Петухова Е.С.¹, Ерофеевская Л.А.², Исакова Т.А.¹, Ботвин Г.В.¹, Соловьев Т.М.¹, Павлова В.В.¹, Чириков А.А.¹, Петров В.В.¹, Хабаров Д.Р.¹

¹ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

² Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

evgspar@rambler.ru

Проведены микробиологические исследования смывов с поверхностей образцов бивней мамонта, хранение которых осуществлялось в различных условиях. Показано, что микробиологическое заражение протекает преимущественно в результате контаминации с объектами окружающей среды. Предложены подходы к хранению, обеспечивающие снижение уровня микробиологического заражения.

Бивень мамонта (БМ) – материал биогенного происхождения. При залегании в вечномерзлых отложениях, все процессы, приводящие к их разрушению, в том числе, микробиологическое заражение, приостанавливаются. Извлечение (выпадение) костных остатков из вмещающих пород при недолжном хранении приводит к достаточно быстрому разрушению материала бивня. Среди факторов, приводящих к его разрушению, наиболее губительными являются выветривание, перепады температур, механические воздействия, а также микробиологическое заражение – бактерии и грибки используют органические компоненты бивня (коллаген) для своего роста и размножения. Результаты исследования особенностей микробиологического заражения БМ при длительном хранении [1], показали, что, во-первых, заражение протекает прежде всего в результате контаминации БМ с объектами окружающей среды (почва, воздух, антропогенное воздействие и пр.), во-вторых, биомасса микроорганизмов и уровень сохранности материала бивня определяется условиями хранения и, в-третьих, низкие температуры не являются губительными для микроорганизмов, выделенных из смывов с поверхности образцов БМ.

На рисунке 1 [1] представлен результаты высева смывов с поверхностей образцов БМ, хранение которых осуществлялось в различных условиях: в условиях отапливаемого помещения, в холодильной камере при температуре минус 10 °С, в условиях неотапливаемого помещения, на открытом воздухе и обернутых в пищевую прозрачную пленку на открытом воздухе. Исследование было проведено после 6 месяцев хранения в заданных условиях. По культурально-морфологическим и физико-биохимическим признакам, выделенные плесневые грибы принадлежат родам: *Aspergillus*, *Mucor*, *Acremonium*, *Penicillium*. Выделенные культуры бактерий отнесены к роду *Bacillus* (*B. Subtilis*, *B. Cereus*). Данные виды бактерий обладают свойством криофильности и характеризуются одинаковыми биохимическими свойствами, что свидетельствует о возможном биозаражении бивней мамонта при длительном нахождении в почве, поскольку бактерии рода *Bacillus* являются типичными представителями почвенной микрофлоры. Показано (рисунок 1), что на родовой состав и общую численность микрофлоры, контаминирующей образцы, существенное влияние оказывают условия хранения. Наименьшей численностью микроорганизмов, выделенных с одинаковой площади поверхности исследуемых объектов, характеризуются образцы из БМ, хранившиеся в отапливаемом (рисунок 1, а) и не отапливаемом помещениях (рисунок 1, в), а также в холодильной камере (рисунок 1, б). Наибольшее количество микроорганизмов выявлено после хранения образцов на открытом испытательном полигоне (рисунок 1, д), а также образцов, экспонировавшихся на полигоне и обернутых в пленку (рисунок 1, г). Вероятно, полученный результат обусловлен тем, что качественный и количественный состав микроорганизмов существенно зависит от состояния воздуха в выбранных условиях экспонирования. Так, оборачивание образцов в пленку

приводит к парниковому эффекту с повышенной влажностью и более высокой температурой под пленкой, что вызывает более интенсивное размножение микроорганизмов.

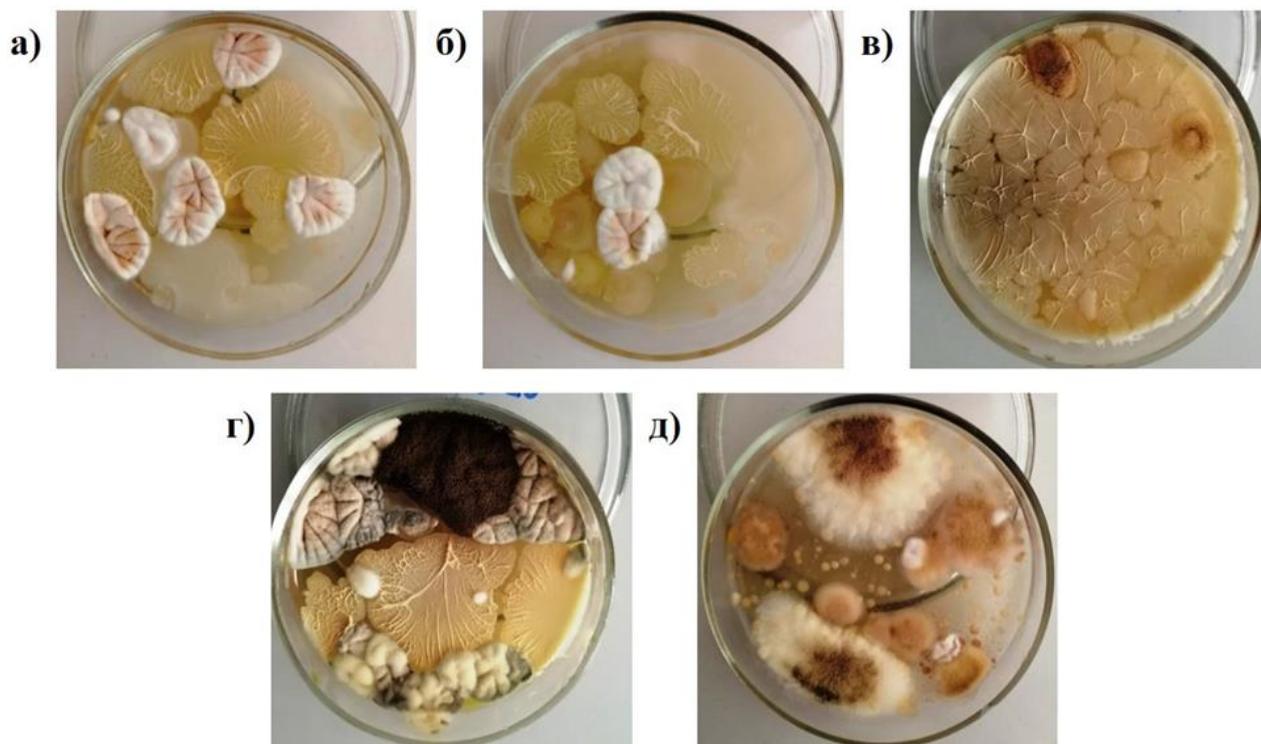


Рис. 1. Формирование колоний плесневых грибов и бактерий рода *Bacillus*, выделенных из образцов бивня мамонта, экспонированных: а) при комнатной температуре; б) при температуре -10°C ; в) в условиях неотапливаемого помещения; г) в пленке, на открытом воздухе; д) на открытом воздухе

По полученным результатам предложен способ защиты палеонтологических находок (бивней мамонта) от биозаражения при длительном хранении, включающий предварительную сушку палеонтологических находок в проветриваемом помещении при комнатной температуре, очистку и обеспыливание, консервацию микротрещин гидрофобно-биоцидным составом (ГБС) [2]. В качестве гидрофобного средства применяется гидрофобизатор «Пента-820» (ТУ 2229-027-40245042-2001 изм.1 «Гидрофобизаторы кремнийорганические марок «Пента-820» и «Пента-822». – Москва. – 2001; 33. Экспертное заключение ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в городе Москве» № 78987 от 04.12.2006г.), в качестве биоцидного средства применяется молочная кислота для ветеринарии 40% (ГОСТ 490-2006 Кислота молочная пищевая. Технические условия. – Москва: Стандартинформ. – 2007. – 27 с.) при следующем соотношении компонентов, масс. %: гидрофобизатор «Пента-820» – 30,0; молочная кислота для ветеринарии 40% – 70,0. ГБС наносили на образцы БМ кистью-макловицей сразу же после приготовления или разбрызгиванием под небольшим давлением до полного насыщения материала (образца БМ) или методом погружения в состав, если это мелкие образцы, после чего образцы складывали на чистую сухую тканевую или бумажную поверхность и сушили при комнатной температуре в течение 24 часов. Далее обработанные образцы помещали на складское хранение. Для обработки бивней мамонта составом достаточно однократной обработки.

Отапливаемое помещение	Неотапливаемое помещение	Холодильная камера (-10°C)
Необработанные ГБС		

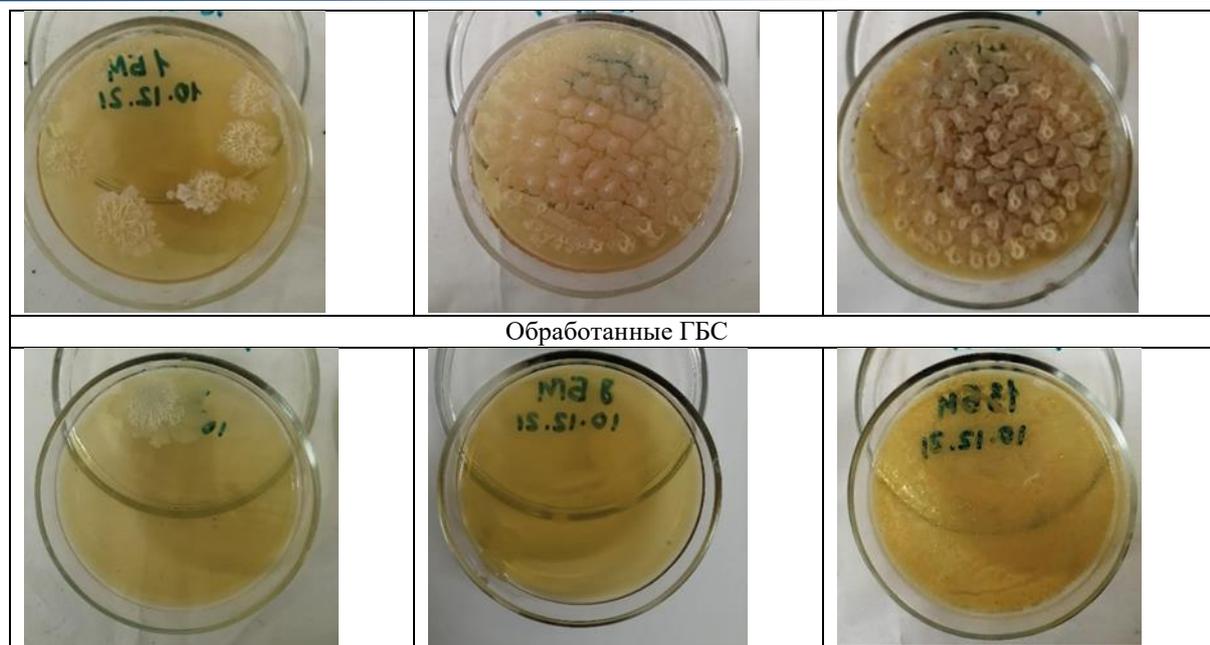


Рис. 2. Рост микроорганизмов на питательном агаре после высева смывной жидкости, отобранной с опытных образцов БМ после хранения в различных условиях обработанных и необработанных ГБС

На рисунке 2 представлены высевы смывов с поверхности образцов БМ, хранившихся в разных условиях, обработанные и не обработанные разработанным ГБС.

Установлено (рисунок 2), что обработка ГБС разработанного состава обеспечивает эффективную защиту материала БМ от микробиологического заражения независимо от условий хранения. В таблице 1 представлены результаты расчета общей численности микроорганизмов (ОЧМ), выявленных из смывов с поверхности образцов обработанных и необработанных ГБС.

Таблица 1. Общая численность микроорганизмов после экспонирования в течение 6 месяцев образцов БМ в различных условиях

Отапливаемое помещение	Неотапливаемое помещение	Холодильная камера (-10 °С)
Необработанные ГБС		
760	800	800
Обработанные ГБС		
130	360	800 (без пленки) 120 (в пленке)

Видно (таблица 1), что ОЧМ на образцах, обработанных ГБС, в 2,2–6,7 раза ниже, по сравнению с необработанными образцами. Однако хранение в морозильной камере, вероятно, ранее значительно обсемененной различными микроорганизмами, обработанных ГБС образцов, эффективна только при изоляции образцов в пищевой пленке.

Литература

- Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. № 3. С. 75–85. doi:10.31242/2618-9712-2021-26-3-75-85.
- RU 2819737 С1 Ерофеевская Л.А., Петухова Е.С., Исакова Т.А., Соловьев Т.М., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В. Способ защиты палеонтологических находок (бивней мамонта) от биозаражения при длительном хранении. Заявл. 21.12.2022. Оpubл. 23.05.2024.

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛИ 10ХСНД ПРИ СВАРКЕ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР

Санников И.И., Голиков Н.И., Семёнов С.В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Для сварных конструкций, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, необходимо уделять внимание работоспособности сварных соединений при низких температурах. Обеспечение достаточной хладостойкости и прочности означает предотвращение хрупких разрушений элементов конструкций при нагрузках, существенно ниже расчетных. Одной из определяющих этих характеристик является ударная вязкость. В работе приведены результаты исследований механических характеристик сварных соединений стали 10ХСНД, полученных сваркой при отрицательной температуре.

Для изготовления основных несущих элементов конструкций мостов в Республике Саха (Якутия) активно применяют сталь марки 10ХСНД, которая является наиболее перспективной для строительства несущих элементов конструкций мостов, к которым предъявляются требования повышенной прочности, коррозионной стойкости, малочувствительности к концентраторам напряжений, требование низкой температуры перехода в хрупкое состояние. Особые условия работы мостовых конструкций, подверженных вибрационным нагрузкам, требуют применения стали малочувствительной к концентрации напряжений, не склонной к старению после наклепа и имеющей достаточно низкую температуру перехода в хрупкое состояние. При выборе стали для сварных мостов к этим условиям добавляется требование хорошей свариваемости и достаточной вязкости металла около сварного шва [1, 2].

Вместе с тем, какими бы уникальными свойствами ни обладал используемый материал, при сварке указанные свойства ухудшаются вследствие влияния температурного нагрева сварочного процесса, зон структурной неоднородности, появляющихся в результате повторного расплавления и кристаллизации металла шва, а также возникающих в них остаточных сварочных напряжений. Влияние этих факторов ещё больше увеличивается, когда сварка производится в условиях низких климатических температур. Вследствие этого сварное соединение всегда является концентратором напряжений [3–5]. Сочетание резкой концентрации напряжений и низкой температуры часто приводит к хрупкому разрушению, сопровождающемуся значительным уменьшением прочности [6].

В свою очередь ударная вязкость численно указывает на способность сопротивления стали хрупкому разрушению. Поэтому в настоящее время актуален вопрос повышения этого параметра для сварных конструкций, в особенности связанных с эксплуатацией при низких температурах в условиях Крайнего Севера

В работе исследована экспериментальным путем ударная вязкость сварных соединений конструкционной низколегированной стали 10ХСНД полученных в условиях низких климатических температур. По результатам испытания на ударный изгиб проводился расчет работы зарождения трещины и распространения трещины для каждого образца. Данные исследования проводились на научном оборудовании Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Полученные результаты могут быть полезны при анализе механизмов разрушения сварных соединений конструкционных сталей, влиянии исходной структуры, сварочных материалов и способов сварки на ударную вязкость сварных соединений, в разработке методики оценки хладостойкости и прочности неразъемных соединений и технологии монтажной сварки низколегированных сталей, обеспечивающую получение заданных служебных свойств сварных соединений и удовлетворяющих требованиям нормативно-технической документации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20214, <https://rscf.ru/project/24-29-20214/>

Литература

1. Гладштейн, Л.И. Высокопрочная строительная сталь. Москва: Металлургия, 1972. 240 с.
2. Молева Д.А., Белозор М.Ю. Обоснование применения сталей для изготовления конструкций мостов / Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. 2(4). С. 28–31.
3. Ларионов В.П., Павлов А.Р., Аммосов А.П. Особенности теплового баланса ванны при сварке в условиях низких климатических температур // Эксплуатационная прочность сварных соединений и конструкций Севера: сборник статей докт. техн. наук, проф. А.П. Аммосова, посвященный 80-летию. Якутск: Цумори Пресс, 2017. С. 17–22.
4. Шевченко А.А., Семёнова Е.С., Шабурова Н.А. Определение причин низкой ударной вязкости кольцевого сварного шва / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: металлургия. № 2. Т. 19. 2019. № 8. С. 63–70.
5. Сидоров М.М., Голиков Н.И. Остаточные сварочные напряжения монтажных соединений трубопроводов из низколегированных сталей, эксплуатирующихся в северных регионах / Сварка и диагностика, 2022. № 5. С. 49–52.
6. Молоков К.А., Маслов К.М. Расчетные методы оценки ударной вязкости сварных элементов с трещинами / Вестник инженерной школы ДВФУ. 2020. – № 3(44). – С. 22–36.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-115-117

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА УДАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Сидоров М.М., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск

sidorovmm@bk.ru

Рассматривается проблема повышения работоспособности сварных соединений трубопроводов, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур. Исследуется возможность применения ударно-механической обработки (УМО) для улучшения физико-механических свойств и снижения остаточных сварочных напряжений. Результаты исследования позволяют определить рациональные параметры обработки и разработать научные подходы для улучшения качества сварных соединений низколегированных сталей. Однако в настоящее время УМО не применяется широко в северных и арктических регионах из-за отсутствия чётких рекомендаций в нормативных документах.

Проблема повышения работоспособности магистральных газопроводов, работающих в условиях низких климатических температур, остаётся актуальной научно-технической задачей. Производство сварных конструкций из разных марок стали и сплавов показывает, что полученные сварные соединения зачастую обладают иными прочностными характеристиками, чем основной металл. Исследования, проведённые учёными ИФТПС СО РАН, выявили проблемы с хрупкими трещинами в сварных соединениях трубопроводов при отрицательных температурах. Разрушения, происходящие при положительных температурах, часто являются результатом накопления повреждений, полученных ранее при минусовых температурах [1, 2]. Это связано с остаточными сварочными напряжениями, структурной неоднородностью материала и технологическими дефектами сварки [3–5]. Таким образом, для сварных соединений магистральных газопроводов, эксплуатирующихся на северных и арктических регионах России необходимо применить дополнительные послесварочные методы обработки, обеспечивающие повышения их эксплуатационной прочности и долговечности.

Такие методы послесварочной обработки, в основном направлены преимущественно на улучшение физико-механических свойств, изменении структуры, уменьшении или перераспределении остаточных сварочных напряжений в зонах сварных соединений. Существуют различные виды послесварочной обработки: термическая, вибрационная, дробеструйная, взрывная и ультразвуковая. Среди них перспективным представляется ударно-механическая обработка (УМО). В металлообработке эта технология относится к способам холодной обработки металлов и классифицируется как способ упрочнения ударным поверхностным пластическим деформированием. Было установлено и доказано, что наилучшим образом она выполняется виброинструментом (ударными бойками) с источником механической энергии в виде резонатора упругих колебаний ультразвуковой частоты [6]. В связи с этим в научной и технической литературе этот метод чаще упоминается как ультразвуковая ударная обработка.

В работе изучалась возможность управления уровнем остаточных сварочных напряжений методом ударно-механической обработки (УМО), её влияние на ударную вязкость сварных соединений низколегированных конструкционных сталей, используемых при строительстве магистральных газопроводов северного исполнения. Исследования проводились с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Результаты исследования позволили определить рациональные параметры обработки для эффективного применения технологии. Разработаны научные подходы для улучшения физико-механических свойств сварных соединений низколегированных сталей. В сравнении с другими методами УМО обладает преимуществами, такими как низкие энергетические затраты, мобильность, экологическая безопасность и удобство в использовании. Однако в настоящее время УМО не используется при строительстве и ремонте техники и сварных конструкций в северных и арктических регионах. Это обусловлено отсутствием чётких рекомендаций по применению УМО в условиях низких температур в существующих нормативных документах.

Эти исследования являются большим вкладом и продолжением многолетних трудов Института физико-технических проблем Севера имени В. П. Ларионова СО РАН по фундаментальным и прикладным разработкам института в области повышения эксплуатационной прочности и хладостойкости сварных конструкций в условиях Крайнего Севера [7, 8].

Таким образом, развитие фундаментальных исследований в области разработки и совершенствования технологических методов послесварочной обработки для контроля уровня остаточных сварочных напряжений и упрочнения поверхностей зон сварных соединений металлоконструкций, работающих в условиях низких климатических температур, представляет собой актуальное направление с большими перспективами внедрения в производство.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТПС СО РАН, шифр проекта FRWS-2024-0034, номер государственной регистрации 1023031300029-4-2.3.1.

Литература

1. Семенов Ян. С., Ларионов В.П. Выявление механизмов замедленного разрушения низколегированных высокопрочных сталей / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2001. Т. 67. № 10. С. 43–47.
2. Ларионов В.П., Аммосов А.П., Попов В.В. О разрушении сварного шва // Эксплуатационная прочность сварных соединений и конструкций Севера: сборник статей доктора технических наук, профессора А.П. Аммосова, посвященный 80-летию. РФФИ. Якутск, 2017. С. 23–26.
3. Сидоров М.М., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н., Тихонов Р.П. Управление уровнем остаточных сварочных напряжений в стыковых соединениях труб из низколегированных сталей ударно-механической обработкой / Тяжелое машиностроение. 2023. № 10. С. 23–28.
4. Голиков, Н.И., Сидоров М.М., Степанова К.В. Влияние способов сварки на структуру и механические свойства сварных соединений винтовых свай // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 7(733). – С. 60–64.
5. Захаров М.Н., Насонов В.А. Оценка влияния дефектов сварных соединений на прочностную надежность стальных сосудов и аппаратов / Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 4. С. 68–72.

6. Шестаков С.Д. Ультразвуковое поверхностное деформирование для упрочнения и пассивации наклепом: теория, технологические процессы и оборудование / Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 7. С.3–15.

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. Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Слепцов Г.Н., Сидоров М.М., Семёнов С.В. Разработка концепции создания и функционирования региональных Центров производства, восстановительного ремонта и упрочняющей обработки ресурсопределяющих деталей и изделий техники, работающей в условиях Крайнего 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. 531–537.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-117-120

АНАЛИЗ ПУЧЕНИЯ ГРУНТОВ ПО ТРАССЕ ЛИНЕЙНОГО СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСЛОВИЙ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Сильвестров А.С., Шегуров Э.А.

ООО «Астрапроект», г. Казань

aastra@mail.ru

Предлагается метод повышения устойчивости существующих магистральных газопроводов и нефтепроводов на участках залегания пучинистых грунтов при прокладке в условиях Крайнего Севера. Метод заключается в устройстве валика из непучинистого грунта, обеспечивающего тепло- и гидроизоляцию. При проектировании было выполнено математическое моделирование изменения водонасыщенности грунтов и величины морозного пучения.

Прокладка в условиях Крайнего Севера магистральных трубопроводов и их вдольтрассовых проездов приводит к изменению гидрогеологических условий, в том числе к изменению водонасыщения грунтов оснований трубопроводов. Это связано с особенностями многолетнемерзлых грунтов и их реакцией на тепловые воздействия.

Основные факторы влияния на гидрогеологические условия:

1. Изменение температуры грунтов. При прокладке трубопроводов изменяется температурный режим окружающих грунтов. Тепло, выделяемое трубопроводами, может привести к оттаиванию мерзлоты, что, в свою очередь, изменяет физико-механические свойства грунтов [1, 3].

2. Водонасыщение и фильтрация. Прокладка трубопроводов может изменить режим фильтрации и водонасыщения в грунтах. Поверхностные воды могут проникать в трещины и поры грунта, увеличивая его водонасыщение и снижая несущую способность [4]. Это также может привести к образованию таликов – зон оттаивания в мерзлых грунтах [5].

3. Снижение несущей способности. Переход грунта из мерзлого состояния в талое ведет к значительной потере его несущей способности. Это создает риски для стабильности трубопроводов и требует применения специальных методов укрепления оснований, особенно для опасных производственных объектов [5].

Таким образом, прокладка магистральных трубопроводов в условиях Крайнего Севера действительно приводит к изменению гидрогеологических условий, в том числе к изменению водонасыщения грунтов оснований. Эти изменения требуют тщательного проектирования и

мониторинга для предотвращения негативных последствий, таких как оседание или разрушение инфраструктуры. Отдельного внимания требуют магистральные трубопроводы, относящиеся к особо опасным производственным объектам.

Наиболее сложными являются участки перехода от талых пород к мерзлым, характеризующиеся различными показателями пучения. Часто на таких участках трубопровод испытывает неравномерные деформации, вызывающие напряжения в стенках трубопровода. Проблема неравномерного пучения создает задачу определения максимальных деформаций.

Оценка максимальных деформаций, которые могут развиваться в процессе эксплуатации трубопровода, необходима при проектировании и выборе режима работы трубопровода, а также при мониторинге на стадии эксплуатации [3].

В качестве объекта исследования был выбран вдольтрассовый проезд магистрального нефтепровода в условиях Крайнего Севера. Данный проезд проложен вдоль магистрального трубопровода и имеет аналогичные гидрогеологические условия. Кроме того, насыпь автомобильного проезда создает дополнительный рельеф, что приводит к изменению водосбора поверхности.

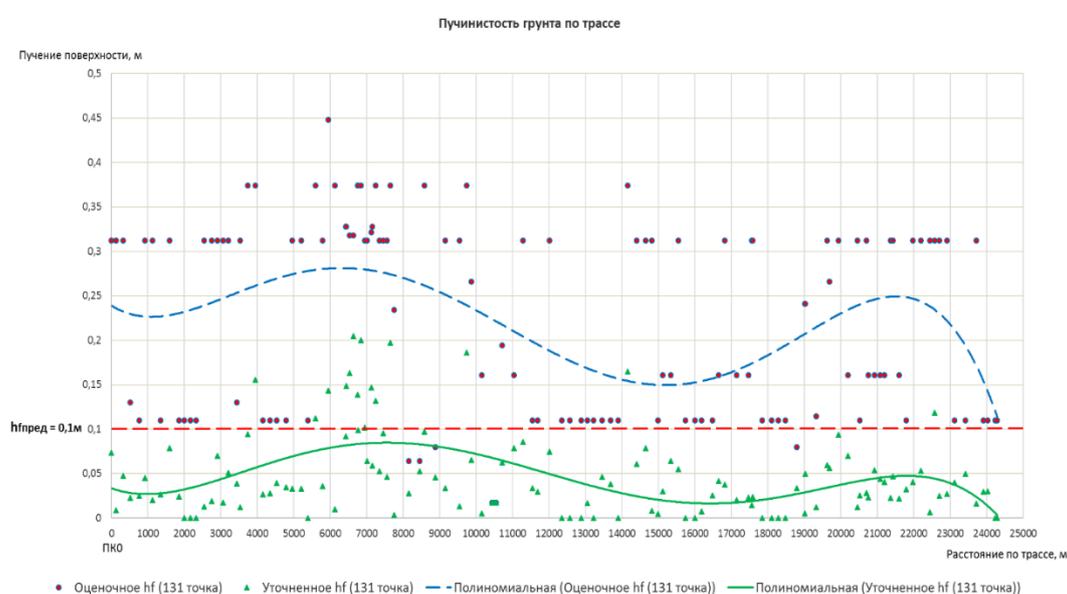


Рис. 1. Изменение величины пучения по длине трассы вдольтрассового проезда (по результатам оценочного по методике [10] и уточненного по методике [7] расчетов)

Расчетные значения морозного пучения были вычислены по методике, изложенной в [7]. Приближение данных полиномом 5-й степени было выполнено в ПО Excel. На рис.1 представлены расчетные (оценочные) значения морозного пучения, рассчитанные по методике [10], и его тренд по трассе автомобильной дороги. Эта оценка применялась для грубого разделения «опасных» и «относительно безопасных» с точки зрения пучинистости участков трассы. Также на графике представлены уточненные значения морозного пучения и его тренд, вычисленные по методике [7], позволяющие более точно оценить величину пучения грунтов на опасных участках. Критерии допустимости установлены как к вдольтрассовому проезду $h_{пред}=0,1$ м [6, 7].

Поскольку пучинистые свойства грунтов по длине трассы проявляются неравномерно, трасса была разбита по длине на четыре участка, после чего тренды были построены отдельно для каждого участка (см. рис. 2).

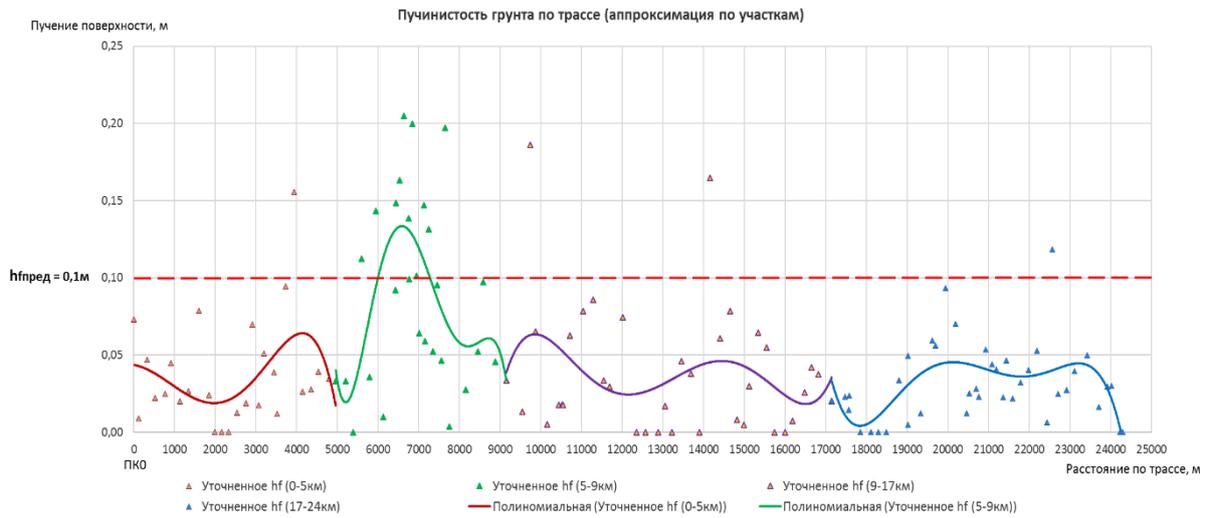


Рис. 2. Изменение величины пучения при разделении трассы вдольтрассового проезда на четыре участка (по результатам уточненного по методике [7] расчета)

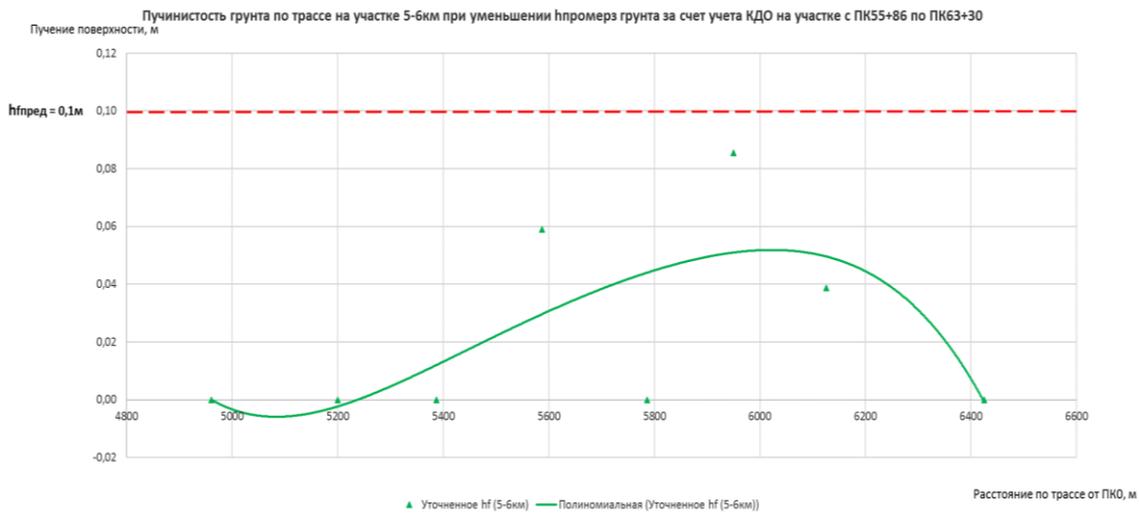


Рис. 3. Аппроксимация изменения пучения грунта на участке 5–6 км при уменьшении глубины промерзания грунта за счет учета КДО

На втором участке выявлено превышение величины допустимой деформации, поэтому для данного участка был выполнен повторный расчет морозного пучения, но с учетом наличия дорожной одежды (т. е. с учетом того, что над естественным грунтом природного сложения выполнена отсыпка дорожной насыпи и устройство земляного полотна, что привело к уменьшению величины морозного пучения основания вследствие уменьшения толщины промерзающего пучинистого слоя грунта). По результатам расчета построен график и его тренд на данном участке (см. рис. 3), на котором видно, что деформации морозного пучения при учете конструкции дорожной одежды не превышают предельно допустимой величины.

Таким образом для исключения разрушения дороги в результате морозного пучения авторами были выполнены:

- анализ изменения водосбора с поверхности;
- расчет величины морозного пучения по имеющимся методикам;
- полиномиальная регрессия расчетных величин морозного пучения и подбор допустимых деформаций поверхности земли;
- подбор проектных решений, снижающих морозное пучение основания дороги;
- подбор проектных решений, снижающих водонасыщенность грунтов основания дороги.

По состоянию на 2024 год опытная эксплуатация не выявила недопустимых пучений грунтов. В связи с этим авторами предлагается создание над существующими трубопроводами, подверженными потере устойчивости в продольном и поперечном направлении, защитного валика, обеспечивающего гидроизоляцию, водоотвод, теплоизоляцию для уменьшения промерзания основания трубопровода.

При прокладке в соответствии с п. 9.1.1 СП 36.13330.2016 трубопроводы большого диаметра прокладываются на глубине 0,8–1 м. Согласно п. 12.2.12 [8] нагрузки и воздействия, связанные с осадками и пучениями грунта, оползнями, перемещением опор и т. д., должны определяться на основании анализа грунтовых условий и их возможного изменения в процессе строительства и эксплуатации трубопровода.

Согласно материалам выполненных изысканий, глубина промерзания грунтов на рассматриваемом участке составляет для супесей 2,5 метра, для глинистых грунтов 2 метра. Таким образом, основание трубопровода может быть подвержено воздействию сил морозного пучения, что приводит к потере устойчивости и должно учитываться при выполнении расчетов на прочность трубопровода согласно п.12.4.5 [8].

Согласно п. 5.17 [9] на участках трассы трубопроводов с наличием пучинистых грунтов, при строительстве необходимо выполнять мероприятия для уменьшения деформаций оснований.

Одним из таких мероприятий предлагается монтаж над трубопроводом защитного вала из непучинистого грунта с гидроизоляцией полимерными материалами, мониторинг и выполнение особых требований при строительстве и эксплуатации сооружения.

Оценка морозного пучения может быть также выполнена при моделировании нейросетевыми моделями. Моделирование должно учитывать все факторы входящие в модель методик [7] и [10], а также учитывать условия эксплуатации, изменение пространственной конфигурации трубопровода и свойств грунта. Мониторинг подвижек линейной части опасных производственных объектов совместно с моделированием грунтов оснований нейросетевыми моделями, дообучаемыми в процессе эксплуатации, позволит учесть влияние изменений температуры перекачиваемого продукта, температуры окружающей среды, количества осадков на состояние оснований сооружений. Результаты мониторинга, внутритрубной диагностики и математического моделирования грунтов, слагающих основания, позволят предотвратить недопустимые пластические деформации трубопровода и обеспечить его продольную и поперечную устойчивость.

Литература

1. Долгих С. Н. Особенности проектирования и эксплуатации ГТС промышленных комплексов в зоне вечномёрзлых грунтов // Гидротехника. 2 (63). 2021. С. 43–48.
2. СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. 239 с.
3. Хренов Н. Н. Сооружение северных трубопроводов. Взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами в макетах и на трассе. URL: <http://neftegaz.ru>
4. Амичба В.Д. Методы по упрочнению свойств оснований трубопроводов // Вестник магистратуры № 1–5 (112), 2021. С. 9–15.
5. Орлов В.А., Нечитаева В.А. Строительство и реконструкция трубопроводов в условиях вечной мерзлоты // СОК № 5, 2021. С. 18–23.
6. ОДМ 218.2.086-2019. Методические рекомендации по геокриологическому прогнозированию устойчивости дорожных сооружений при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог. 125 с.
7. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов /ПНИИИС. – М.: Строй-издат, 1986. 72 с.
8. СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. 92 с.
9. СП 410.1325800.2018 Трубопроводы магистральные и промышленные для нефти и газа. 18 с.
10. ГОСТ 28622-2012 Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости. М.: Стандартинформ, 2013. 7 с.

РЕНОВАЦИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ НОЖА СРЕДНЕГО ОТВАЛА ТЯЖЕЛОЙ ДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕЙСЯ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИСлепцов Г.Н.¹, Слепцов О.И.¹, Ноев И.И.^{1,2}, Солдатов К.В.¹¹ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,

г. Якутск

slepzovgn@mail.ru

В настоящей работе раскрыта особенность эксплуатации тяжелой дорожной техники на территории Якутии. Содержание автомобильных дорог в работоспособном состоянии, в экстремальных условиях Севера и Арктики, обеспечивается использованием автогрейдеров. Основным изнашиваемым рабочим органом данной тяжелой дорожной машины является средний нож отвала автогрейдера. Ввиду сезонностью эксплуатации, отсутствием специализированных сервисных центров, сложностью схемы логистики по доставке запасных частей из центральных областей России, одним из решений обеспечения работоспособности автогрейдера эксплуатирующими организациями является восстановление режущей кромки ножа среднего отвала автогрейдера с помощью ручной дуговой сварки.

Как известно, эксплуатация техники при экстремальных природно-климатических условиях Севера и Арктики значительно снижают работоспособность и долговечность технических систем и конструкций. Анализ отказов техники и конструкций на территории Якутии в зимнее время по сравнению с летним периодом показывает, что поток отказов ряда деталей, узлов техники и аварий конструкций увеличивается в 2–3 раза, а по некоторым данным до 6 раз, что наносит экономике России колоссальные убытки [1].

Сеть автомобильных дорог на территории Республики Саха имеет протяжённость свыше 30 тыс. км, из которых более половины представлены временными (сезонными) дорогами-автозимниками. В настоящее время в республике эффективное использование автомобильного транспорта резко снижается в связи сезонностью эксплуатации автомобильных дорог общего пользования, большая часть грузоперевозок ведётся по зимникам.

Например, за Казенным предприятием Республики Саха (Якутия) «Дороги Арктики» на праве оперативного управления закреплено 8 178,17 км автомобильных дорог общего пользования регионального и межмуниципального значения, из них 477,74 км – дороги с твердым покрытием, 7 700,43 км – автозимники (в т.ч. 886,93 км – объездные дороги), которые проходят по 9 Арктическим улусам РС(Я) (муниципальным районам региона) [2, 3].

Как видно из предоставленной информации, содержание указанных автомобильных дорог в работоспособном состоянии, в экстремальных условиях Севера и Арктики, обеспечивается специализированной тяжелой дорожной техникой, в частности автогрейдером. Основным изнашиваемым рабочим органом данной тяжелой дорожной машины является средний нож отвала автогрейдера. Причиной снижения ресурса эксплуатации средних ножей являются ударно-абразивный износ по разным категориям грунта и льда. Ввиду огромных расстояний применения автогрейдеров на арктических участках автодорог Якутии, существует проблема сложной логистики и своевременной доставки ножей. Единственным разумным решением для эксплуатирующих организаций является восстановление режущей кромки ножа среднего отвала автогрейдера на ремонтных мастерских дорожных участков, с помощью ручной дуговой сварки. Поэтому создание научно-обоснованной технологии реновации (восстановления) режущей кромки ножа при помощи ручной дуговой сварки является весьма актуальной для нашего региона.

Для исследования нам был предоставлен изношенный нож среднего отвала трехосного автогрейдера Volvo G930, весом 15,6 т., марки XCMG GR215 (арт. 040100011) производства КНР, состоящий из двух сегментов размерами 1825x170x154x18мм и 1825x152x82x18 мм (см. рис. 1, рис. 2). Как видно из рисунков 1 и 2, нож имеет неравномерный износ по всей длине, который показывает характер его использования на среднем отвале автогрейдера под скоком (углом) для выравнивания грунтовых и ледовых автодорог.



Рис. 1. Общий вид фрагментов ножей среднего отвала автогрейдера Volvo G930

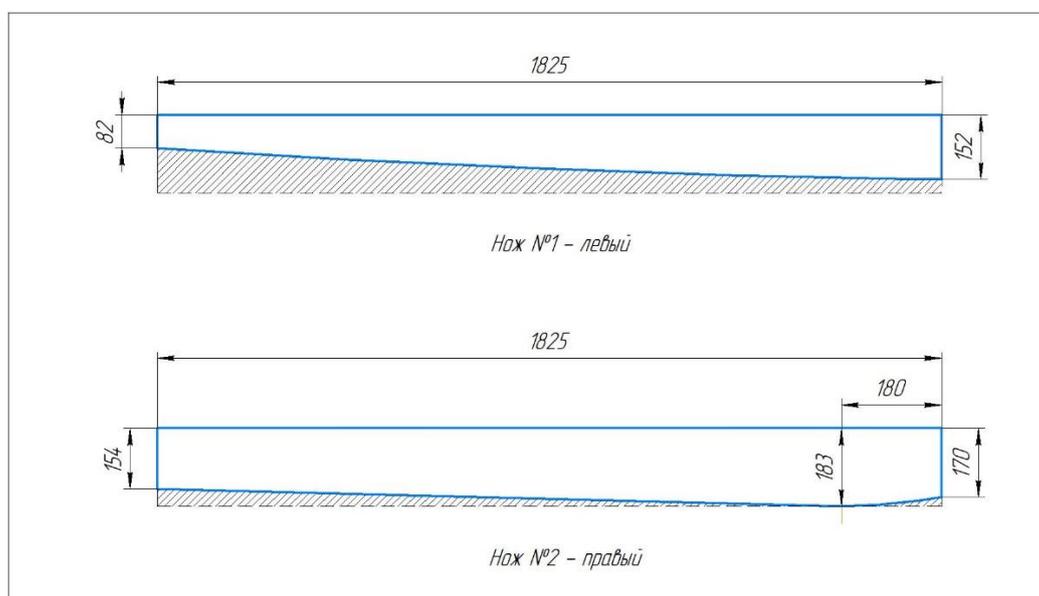


Рис. 2. Геометрические размеры изношенных ножей среднего отвала и профиль износа

Если рассмотреть процесс резания грунта средним отвалом автогрейдера несколько подробнее, то он выглядит следующим образом: в первую очередь, возникает контакт и вдавливание клина рабочего инструмента в грунт. По мере нарастания 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. В результате, такой процесс можно охарактеризовать как чередование пиков ударной нагрузки с периодами статического нагружения. 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. Вблизи режущей кромки нож контактирует своей поверхностью с частицами грунта, которые ещё являются частью грунтового массива (см. рис. 2). 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 перекачивание, что, конечно, уменьшает абразивное воздействие на плоскость резца, однако давление на грунт возрастает [4].

Средний срок службы режущей кромки очень сильно зависит от целого ряда показателей. К ним он относит тип грунта или льда, температура окружающей среды в котором работает техника, и материал самого ножа, толщина, а также навыки оператора. Ножи отвала относят к категории расходных материалов, средний срок службы в условиях работы Якутии составляет от 500 до 1000 моточасов [5].

Проведенный анализ фрагмента ножа на оптико-эмиссионном стационарном анализаторе СХР-980, ЦКП ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» показал, что маркой стали ножа среднего отвала автогрейдера является аналог стали 14Г2 (табл.1), с измеренной средней твердостью 400 НВ, что говорит о его соответствующей термообработке.

Таблица 1. Химический состав ножа автогрейдера

Материал	Наименование показателя, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu
№ 1	0,24	0,26	1,15	0,17	0,02	0,012	0,007	0,03
14Г2 ГОСТ 19281- 2014	0,12– 0,18	0,17– 0,37	1,2–1,6	≤0,30	≤0,30	≤0,03	≤0,035	≤0,30

Сталь 14Г2 является конструкционным низколегированным марганцовистой сталью с повышенной прочностью, которая применяется при производстве крупных листовых конструкций, работающих при низких температурах до -70°C .

Как известно свариваемость сталей оценивается такими признаками как склонность к образованию горячих и холодных трещин в сварном соединении. Вероятность появления при сварке или наплавке горячих трещин определяется по показателю Уилкинсона (*H.C.S.*) [6]:

$$H.C.S. = \frac{C \cdot (S+P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100})}{3Mn+Cr+Mo+V} \cdot 10^3 \quad (1)$$

Условием появления горячих трещин является $H.C.S. > 2$.

Для оценки склонности металла к появлению холодных трещин чаще всего используется углеродный эквивалент, которым можно пользоваться как количественным показателем, характеризующим свариваемость. Наиболее распространенным и приемлемым для сталей повышенной прочности, является следующее выражение:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cu}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (2)$$

Кроме углеродного эквивалента для определения и оценки свариваемости сталей, и также для расчета температуры предварительного подогрева существуют несколько параметрических формул, которые необходимо учитывать. Далее производится расчет количественного параметра трещиностойкости свариваемого материала P_w , который в мировой практике и в России широко известен под названием формулы Ито-Бессю [7].

$$P_{\text{см}} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (3)$$

$$P_w = P_{\text{см}} + \frac{t}{600} + \frac{H}{60} \quad (4)$$

где t – толщина свариваемого металла, мм; H – содержание водорода в металле шва.

Для расчета температуры предварительного подогрева мы использовали нашу апробированную формулу расчета температуры предварительного нагрева, с учетом ширины зоны нагрева, толщины листа, времени нагрева до заданной температуры, также температуры окружающей среды [8].

Расчет температуры предварительного подогрева был произведен по следующей формуле:

$$T_{\text{под}} = T_0 \frac{F_1 - F_2}{F_0} \exp(-bt) \quad (5)$$

где $\exp(-bt)$ – член, учитывающий теплоту рассеяния; $b = \frac{(2\alpha)}{c\gamma\delta}$; F_1 и F_2 – краевые условия уравнения теплопроводности.

По данным, полученным при определении химического состава (см. таблицу 2) и расчетам с применением формул 1–5, получены следующие данные:

Таблица 2. Расчетные данные по свариваемости

№	Наименование параметров	Описание
1.	$H.C.S.=1,24$	средняя вероятность возникновения горящих трещин при сварке
2.	$C_{экв} = 0,45$	ограниченно свариваемая, сварка с предварительным или сопутствующим подогревом до 250 ⁰ С. Строгое соблюдение режимов сварки
3.	$P_w = 0,43$	средняя вероятность риска возникновения холодных трещин в сварном соединении
4.	$T_{\text{под}} = 230$ °С	Расчетная температура предварительного подогрева

На основе проделанных работ нами предложена технологическая карта процесса реновации режущей кромки ножа среднего отвала тяжелой дорожной техники, где отражены соответствующие режимы наплавки, требования к помещению, способы и приспособления для получения оптимальной структуры восстанавливаемого объема изношенного рабочего органа тяжелой дорожной техники с использованием отечественных доступных сварочных материалов.

Заключение. Полученные расчетным путем данные, раскрывают основные параметры технологии наплавки и требуют выполнения следующих мероприятий:

1. Предварительный подогрев при сварке обязателен, так как сталь относится к ограниченно свариваемым сталям. Ширина зоны предварительного подогрева 50...150 мм в каждую сторону от оси наложения шва. Температура предварительного подогрева для изделий из данной марки стали не ниже 150 °С и не более 300 °С, сопутствующий подогрев 200 °С.

2. При реновации режущей кромки по разработанной технологии для восстановления геометрии изделия следует применять покрытые сварочные электроды типа Э50А, наплавку производить постоянным током обратной полярности;

3. Для упрочняющего слоя применять наплавочные электроды Т-590, Т-620 или ТЭТ-590, наплавку производить постоянным током прямой полярности. Толщина упрочняющего слоя 3–5 мм, не более 2 слоев наплавки;

4. Для исключения коробления, нож закрепляется в спецприспособлении и наплавляется участками, переворачивая, поочередно с одной и другой стороны. Толщина наплавочного слоя – 3–5 мм, а ширина полосы – 60 мм.

5. Обеспечить постепенное охлаждение наплавленного изделия, путем укрытия теплоизоляционными материалами или с помощью обдува газопламенной горелкой с постепенным понижением температуры нагрева после проведения сварки и наплавки.

На основе приведенных данных разработана операционная технологическая карта реновации (восстановления) рабочего органа тяжелой дорожной техники, которая соответствует всем существующим требованиям нормативно-технической документации РФ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТПС СО РАН, шифр проекта FRWS-2024-0034, номер государственной регистрации 1023031300029-4-2.3.1.

Литература

1. Слепцов О.И., Шульгинов Б.С., Михайлов В.Е., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. Новосибирск: Наука, 2012. 183 с.
2. Транспорт в Якутии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Транспорт_в_Якутии

3. Казенное предприятие Республики Саха (Якутия) «Дороги Арктики». URL: <https://дорогиарктики.рф/about>
4. Лукашук, О.А. Машины для разработки грунтов. Проектирование и расчет: учебное пособие. Екатеринбург: Урал. ун-т, 2018. 128 с.
5. Эксплуатация и выбор ножей (режущих кромок) отвала. Советы экспертов. https://exkavator.ru/main/news/inf_news/143062_ekspluatatsiya_i_vibor_nogey_regushchih_kromok_otvala_soveti_ekspertov.html
6. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 549 с.
7. Повышение прочности сварных соединений конструкций для Севера / Слепцов О.И., Михайлов В.Е., Петушков В.Г. и др. Новосибирск: Наука, 1989. 202 с.
8. Слепцов О. И., Слепцов Г.Н. Разработка математической модели расчета тепловых процессов при сварке с подогревом стальных листов // В книге: Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики. Тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д. т. н., профессора Э. А. Бондарева. Киров, 2021. С. 284–285

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-125-127

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ КВАЗИКЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗРЫВА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБРАЗЦОВ

Степанов В.Е.¹, Степанова К.В.¹, Ноев И.И.^{1,2}

¹ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

² ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск

Показано, что замена одного цилиндра на две равновеликих по объему цилиндра приводит к увеличению силы сопротивления образования шейки в 1,4 раза. Разработан первый этап геометрических методов оценки напряжений поперечных сечений цилиндрических образцов. Использован принцип отвердевания Тимошенко к числовым оценкам прочности цилиндров. Этот принцип позволяет использовать для анализа процесса разрыва цилиндра два воображаемых сечения образца, которые сопротивляются его растяжению.

Испытания образцов на разрывных машинах дают реальную картину разрушения материалов в динамике образования шейки и последующего разрыва. Целью работы является разработка геометрических методов оценки напряжений поперечных сечений цилиндрических образцов. Использован сформулированный Тимошенко Степаном Прокофьевичем принцип отвердевания: «Равновесное состояние деформированного упругого тела эквивалентно состоянию абсолютно твердого тела» [1]. Этот принцип позволяет вычислять результирующие моменты сил по различным сечениям твердого тела, которые обеспечивают состояние равновесия тела в результате действия сил реакции и приложенных внешних сил. Металлы, как и любые твердые тела, образованы из атомов, молекул и кристаллов в условиях равновесия двух сил: сил электрического притяжения соседних атомов и молекул и сил отталкивания, обусловленных их квантовыми волновыми свойствами. При этом силы притяжения соседних молекул имеют отрицательные численные значения энергий электрического взаимодействия, но при достаточном приближении молекул друг к другу вступают в игру большие силы квантового отталкивания. В результате каждая молекула оказывается на дне потенциальной ямы, и все такие молекулы образуют кристаллы и твердые тела [2]. Такие не совсем правильные с точки

квантовомеханических представлений модельные представления позволяют объяснить строение кристаллов. Но эта модельная картина строения твердых тел очень похожа на теорию одиночного атома, состоящего из отрицательно заряженного электрона и положительно заряженного ядра. Не удовлетворяющая требованиям строгой физической теории квазиклассическая теория атома Нильса Бора удивительно точно предсказала экспериментально наблюдаемые спектральные серии атома водорода [3]. По теории Бора на атомных орбитах укладывается целое число электронных волн, таким образом возникают дискретные уровни энергии излучения электрона при переходах с одной орбиты на другую. Когда электрон и протон с разноименными зарядами приближаются друг к другу, то их отрицательная энергия взаимодействия неограниченно возрастает, но при этом положительная разница энергий превращается в положительную кинетическую энергию движущегося электрона. В итоге сумма положительных кинетических энергий электрона и протона и отрицательной энергии их взаимодействия является постоянной и определяет по формуле Эйнштейна полную массу покоя атома водорода. В духе корпускулярно-волнового дуализма можно себе представить электрон, существующий в виде сферически симметричного электронного облака в основном состоянии (K – оболочка), но тогда придется ввести силу квантового волнового отталкивания электрона от положительно заряженного ядра. Эта модельная картина применима к твердому телу. Если тело разрежем мысленно на две половины, то мы получим два сечения, которые на самом деле состоят из атомов, эти атомы поляризованы и их силы притяжения образуют силу притяжения двух сечений. Эта сила должна быть уравновешена силой квантового волнового отталкивания атомов, которое быстро преобладает над силой электрического притяжения молекул, образующих два сечения твердого тела. Такое модельное объяснение механизма образования твердого тела с конечными большими размерами имеется, по сути, у А.П. Гуляева [2]. Наша модель отличается от его представлений только тем, что мы считаем уместным использовать для полной массы системы релятивистскую формулу Эйнштейна связи массы с полной энергией тела.

Применим эти модельные представления для описания явления растяжения цилиндрического металлического образца на разрывной машине типа «Инстрон 1175». При статическом растяжении цилиндрического образца сначала происходит упругое растяжение по линейному закону Гука, затем начинается образование «шейки» на месте будущего разрыва цилиндра [1, 2]. Рассмотрим два соседних сечения на месте этого будущего разрыва осесимметричного цилиндра. Внешняя сила будет совершать положительную работу, равную интегралу от произведения силы притяжения двух сечений на их перемещение в сторону увеличения расстояний. При этом их энергия взаимодействия уменьшается по абсолютной величине, а положительная работа внешних сил превратится в тепловую энергию места разрыва. Такой локальный нагрев образца при разрыве наблюдается на эксперименте.

Применим принцип отвердевания Тимошенко к числовым оценкам прочности цилиндров. Этот принцип позволяет использовать для анализа процесса разрыва цилиндра два воображаемых сечения образца, которые сопротивляются его растяжению.

Тут лучше всего рассмотреть числовой пример, цилиндр высотой в 130 мм и диаметром в 13 мм. Площадь поперечного сечения цилиндра равна

$$S = \pi r^2 = 132,665 \text{ мм}^2. \quad (1)$$

Длина окружности сечения, где образуется шейка, равна

$$L = 2\pi r = 40,82 \text{ мм}. \quad (2)$$

Сила сопротивления образованию шейки пропорционально длине шейки

$$F = k L. \quad (3)$$

Объем цилиндра равен

$$V = 17246,45 \text{ мм}^3. \quad (4)$$

Теперь заменим наш цилиндр на два цилиндра той же высоты, но с одинаковым суммарным объемом. Сумма длины шеек увеличится, также увеличится их сила сопротивления растяжению. Сила сопротивления разрыву двух цилиндров оказалась большей 1,4 раза по сравнению с одним цилиндром.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФТПС СО РАН, шифр проекта FRWS-2024-0034, номер государственной регистрации 1023031300029-4-2.3.1.

Литература

1. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов: учебник для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2002. 672 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Матвеев А.Н. Атомная физика: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1989. 439 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-127-129

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО МЕТАЛЛА ШВА ПОД ВЛИЯНИЕМ МОДИФИЦИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Степанова К.В., Степанов В.Е., Слепцов О.И., Слепцов Г.Н., Петров П.П.,

Эверстов М.М.

ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН

обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

sksenia81@mail.ru

В статье приведены результаты исследований микроструктуры и механических свойств металла шва, модифицированного природным концентратом редкоземельных элементов из Томторского редкометалльного месторождения. Доказано, что применение комплексной модифицирующей добавки без дорогостоящего обогащения при производстве сварочных электродов способствует получению сварного соединения с повышенными механическими свойствами.

Способы микролегирования сварочной ванны соединениями редких и редкоземельных элементов (РЭ и РЗЭ) известны еще с 70–80 годов [1, 2] и до настоящего времени вопрос влияния РЗЭ на сварное соединение как на комплексную систему, состоящую из самого шва, участка сплавления и зоны термического влияния, изучен крайне мало. В сварочном производстве, в основном, используют обогащенные соединенные иттрия, церия, лантана. Как показывает практика, природные комплексные руды без дополнительного обогащения не добавляются в сварочную ванну в роли модификаторов. В работе Ларионова В.П. [3] приведены результаты оценки применимости слабомагнитных фракций шлиховых концентратов золотоносных песков Алданского щита, содержащих РЗЭ и РЭ в качестве минерального сырья для изготовления покрытий электродов УОНИ и АНО-32. Показано, что изготовленные электроды соответствуют техническим условиям, а также существенно снижают температуру кристаллизации металла сварного шва.

В настоящей работе исследованы микроструктура и механические свойства сварного соединения, модифицированного природным концентратом редкоземельных элементов из Томторского редкометалльного месторождения, расположенного на северо-западе Республики Саха (Якутия). Изготовлены опытные сварочные электроды диаметрами 3 мм и 4 мм на основе покрытых электродов УОНИ 13/55. Доля комплексной модифицирующей добавки, содержащей лантан, церий, неодим, празеодим и ниобий, в шихте составляет 5% от общей массы обмазки, где доля редкоземельных элементов в шихте электрода составляет 0,26%. Получены сварные соединения из пластин стали марки 09Г2С толщиной 10 мм. Проведены испытания металла шва с РЗЭ по ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 6696-66 (таблица).

Таблица. Результаты механических испытаний металла шва

Сварочный материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²		
				T=+20°C	T=-40°C	T=-60°C
Опытный электрод с РЗЭ	474	595	23	T=+20°C	T=-40°C	T=-60°C
				237	157	116
УОНИ 13/55 (ESAB)	420	540	22	T=+20°C	T=-40°C	T=-60°C
				202	144	140

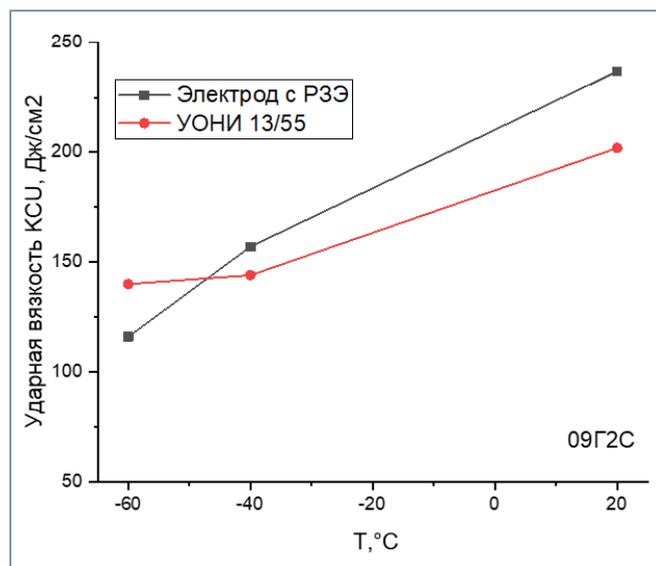


Рис. 1. Изменение ударной вязкости

По результатам исследований установлено повышение показателей механических свойств металла шва в среднем на 10%, также показателей ударной вязкости – на 10–15%, что свидетельствует о положительном влиянии РЗЭ на хладостойкость сварного соединения (рис. 1).

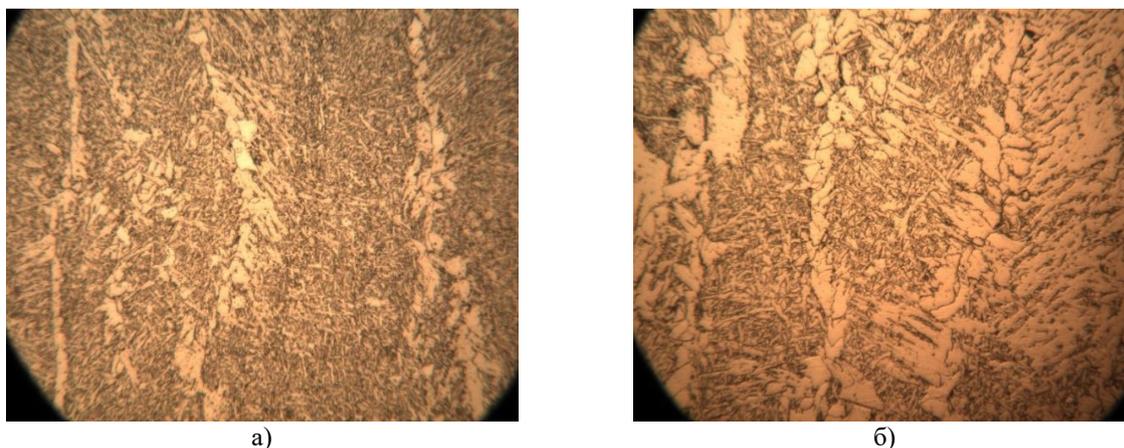


Рис. 2. Микроструктура зоны сварного шва: а – с РЗЭ, б – УОНИ 13/55

В околошовной зоне сварного соединения с РЗЭ в ходе остывания сварочной ванны сформирована мелкозернистая структура, образован мелкоигольчатый феррит, феррито-перлитные локализации равномерные (рис. 2 а). Микроструктура игольчатого феррита характеризуется преобладающим возникновением высокоугловых межфазных границ, последнее обеспечивает повышенную вязкость и хладостойкость металла.

Структурные изменения, происходящие при легировании металла шва РЗЭ, привели к повышению предела текучести металла шва (до 474 МПа) и предела прочности (до 595 МПа).

Выявлено, что значение расстояния между ферритными оторочками в шве УОНИ 13/55 составляет $114,5 \pm 18,9$ мкм, а в модифицированном шве – $90,9 \pm 9,1$ мкм. Таким образом, ширина расстояния между ферритными оторочками модифицированного шва уменьшается на 20% по сравнению со швом УОНИ 13/55.

Выводы:

1. Легирование металла шва РЗЭ при содержании их доли в шихте электрода в 0,26% масс. изменяет степень дисперсности феррита в областях наложения валиков.

2. Сварные швы, полученные с использованием опытных электродов с РЗЭ, показали повышенные значения ударной вязкости до -40 °С, в сравнении с использованием электродов УОНИ 13/55, что свидетельствует о положительном влиянии РЗЭ на хладостойкость сварного соединения при ручной дуговой сварке низколегированных сталей.

3. Структурные изменения, происходящие при легировании металла шва РЗЭ, приводят к повышению предела текучести металла шва (до 474 МПа) и предела прочности (до 595 МПа).

4. Комплексная редкоземельная добавка из Томторского месторождения в количестве 5% от общей массы шихты при ручной дуговой сварке на постоянном токе способствует получению сварного соединения с повышенными механическими свойствами без пор, несплошностей и других сварочных дефектов и обеспечивает формирование усиления без дефектов формы шва.

Таким образом, показано положительное влияние редкоземельных элементов в составе комплексной модифицирующей добавки на механических свойства металла шва, в частности на хладостойкость сварного соединения. Доказана применимость природного концентрата для нужд сварочного производства без сложной и дорогостоящей технологии выделения РЗЭ в чистом виде.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ по Государственному заданию за № НИОКТР 121032200057-3 (FRWS-2024-0034).

Литература

1. Ефименко Н.Г. Применение РЗМ в покрытиях сварочных электродов. // Сварочное производство. 1980. № 7. С. 28–29.

2. Ефименко Н.Г., Балан Л.Н., Бакакин Г.Н. Кафтанов С.В. Влияние иттрия на структуру металла шва при сварке плавлением. // Сварочное производство. 1985. № 4. С. 19–21.

3. Ларионов В.П., Зорин Е.Е. Применение редких и редкоземельных элементов для получения хладостойких конструкционных материалов // Сварочное производство. 2003. № 10. С. 42–44.

ПОВЫШЕНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛИРОВАННОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н.

Приведены исследования влияния параметров переменного сварочного тока на хладостойкость металла сварного шва легированных и углеродистых сталей при автоматической сварке под флюсом. Установлено, что применение переменного сварочного тока прямоугольной формы импульса по сравнению с постоянным током обратной полярности, позволяет снизить содержание кислорода в металле шва, что объясняется различием процессов взаимодействия расплавленной шлаковой и металлической фаз при использовании постоянного и переменного тока. Также выявлено снижение содержания кремния в металле шва в случае использования высококремнистого сварочного флюса за счет снижения интенсивности кремнийвосстановительного процесса. Содержание остальных примесных и легирующих элементов при этом остается неизменным. Снижение содержания кислорода в металле шва привело к повышению его ударной вязкости при отрицательных температурах. Прочие механические свойства остались на прежнем уровне. Проведенные исследования позволяют рекомендовать применение модулированного переменного тока при выполнении сварных соединений высокоответственного оборудования методом автоматической сварки под флюсом.

Введение. Автоматическая сварка под флюсом на сегодняшний день является наиболее широко применимым способом сварки при изготовлении толстостенных сосудов давления в таких отраслях, как нефтехимическое производство, тепловая и ядерная энергетика.

Обеспечение высокой хладостойкости сварных соединений такого оборудования, изготавливаемого из углеродистых, кремниймарганцовистых и низколегированных сталей, на сегодняшний день является актуальной задачей. Требования к хладостойкости предъявляют в тех случаях, когда предполагается эксплуатация оборудования на открытом воздухе, например, реактора и ректификационные колонны нефтеперерабатывающих заводов, либо же когда под воздействием эксплуатационных факторов работы оборудования (высокая температура, флюенс нейтронов) имеет место деградация механических свойств сварных соединений – снижение их сопротивления хрупкому разрушению.

В отечественном машиностроении сейчас наиболее распространены источники питания сварочной дуги постоянным током, так как считается, что при сварке на постоянном токе обратной полярности в наибольшей степени удастся обеспечить стабильность процесса сварки.

В работах [1–3] показано, что применение современных источников питания переменным током позволяет обеспечить надлежащее качество сварного соединения, при этом, повысить производительность процесса сварки за счет выделения большего количества теплоты на плавящемся электроде.

Исследованиями работами [4 и 5] показано, что применение переменного тока, в сравнении с постоянным током обратной полярности, при автоматической сварке под флюсом Cr-Mo-V и Cr-Ni-Mo теплоустойчивых сталей позволило понизить исходную критическую температуру хрупкости, являющуюся характеристикой сопротивления хрупкому разрушению для материалов корпуса ядерного реактора.

Современные источники питания сварочной дуги при автоматической сварке под флюсом позволяют выполнять управление процессом сварки за счет управления формой сварочного тока. Недостаточно изучено влияние параметров переменного тока на хладостойкость металла шва.

Задача исследования – определение влияния параметров переменного тока на механические свойства, включая хладостойкость, металла шва при автоматической сварке под флюсом.

Материалы и методика исследования. Исследования сварочно-технологических свойств при использовании переменного тока различных параметров проводили при наплавке валиков на поверхность пластины из легированной стали 15Х2МФА толщиной 20 мм.

Использовали сварочную головку А6SESAB (Швеция) с источником питания ESAB Aристо 1000 AC/DC, обеспечивающим возможность проведения сварки как на переменном, так и на постоянном токе. В случае использования переменного тока настройками источника задавали прямоугольную форму импульса, как показано на рис. 1.

При наплавке варьировали одну из следующих характеристик:

- частоту от 10 до 100 Гц;
- баланс от 25 до 75% (рис. 1 а);
- смещение импульса напряжения от -10 до 10 В (рис. 1 б).

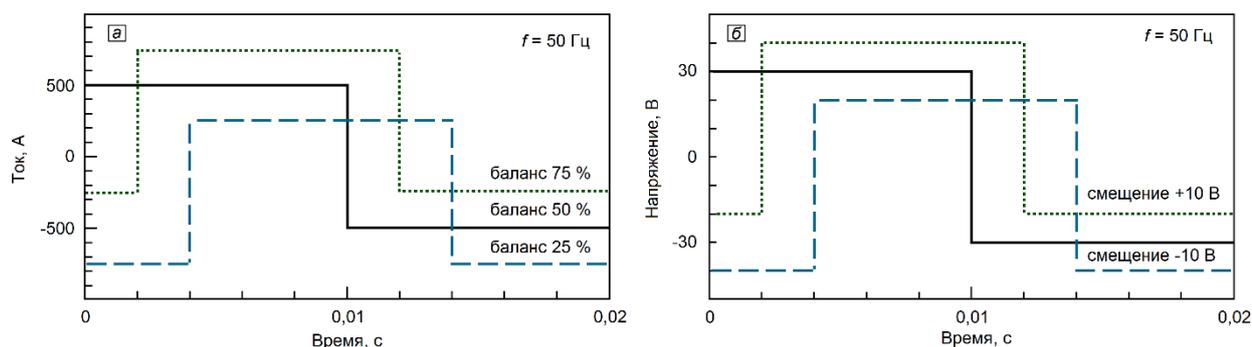


Рис. 1. Сварочные ток с измененным балансом (а) и смещенным импульсом напряжения (б)

Постоянными оставались настройки сварочного оборудования: сварочный ток 500 А, напряжение дуги 30 В и скорость сварки 42 см/мин. Диаметр электрода во всех случаях составлял 4 мм.

В процессе наплавки контролировали следующие сварочно-технологические свойства: гладкость поверхности валика, наличие дефектов в виде подрезов, пор и трещин, легкость отделения шлаковой корки. Глубину проплавления, ширину и высоту наплавленных валиков контролировали на поперечных шлифах.

При использовании нескольких вариантов параметров сварки на переменном токе, выбранных по критерию обеспечения наиболее высоких сварочно-технологических свойств, изготовлены сварные пробы. Конструктивные элементы подготовки кромок и сварного шва приведены на рис. 2.

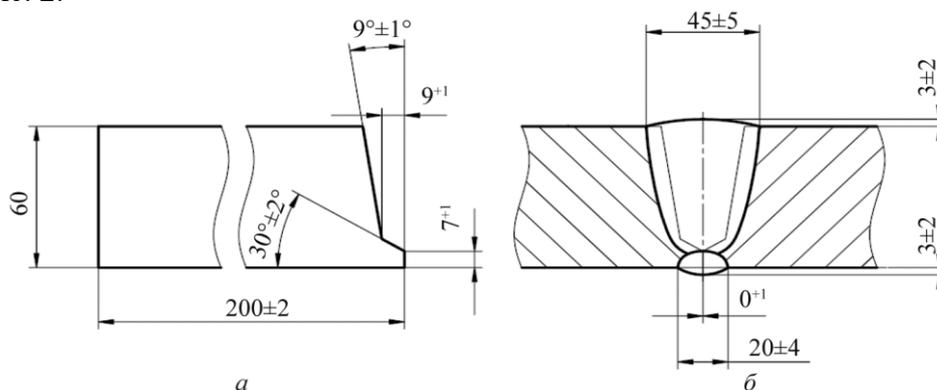


Рис. 2. Конструктивные элементы подготовки кромок (а) и сварного шва (б)

Из сварного шва отбирали образцы Шарпи на ударный изгиб тип IX ГОСТ 6996-66 в количестве по 10 шт., макрошлифы для структурных исследований и замера твердости в количестве по 1 шт., а также образцы для определения химического состава наплавленного металла.

При использовании параметров сварки, обеспечивающих наиболее высокие значения ударной вязкости, выполняли сварные пробы с применением различных сварочных материалов, используемых при изготовлении корпусов сосудов давления из углеродистой и низколегированной стали различных марок.

Сочетания основных и сварочных материалов, а также параметры послесварочной термической обработки сварных соединений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сочетание основных и сварочных материалов, параметры термической обработки

№	Марка стали	Сварочная проволока, флюс	Параметры термической обработки (окончательный отпуск)	
			Температура, °С	Продолжительность, ч
1	15Х2НМФА	Св-09ХГНМТАА-ВИ, ФЦ-16А	650	9
2	15Х2МФА	Св-15ХГМТА, 48АФ-71	670	10
3	10ГН2МФА	Св-10ГН1МА, ФЦ-16А	650	13
4	20, 22К	Св-08ГС, 48АФ-71	-	-

Из сварных соединений отбирали образцы для проведения следующих испытаний:

- испытание на растяжение металла шва при комнатной температуре;
- испытание на ударный изгиб и определение критической температуры хрупкости металла шва;
- испытание на статический загиб сварного соединения;
- определение химического состава металла шва;
- металлографические исследования.

Отбор образцов проводили по ГОСТ 6996-66. Химический состав металла шва определяли с помощью оборудования Faundry-Master, анализатора кислорода RO-400, а также анализатора углерода CS-230. Металлографические исследования проводили с помощью комплекса программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet. Определение твердости по методу Виккерса ГОСТ 2999-75 проводили с помощью твердомера DuraScan20. Образцы Шарпи испытывали на ударный изгиб при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по 5 образцов при каждой температуре) на маятниковом копре LabTest. Испытания на растяжение проводили на электромеханической машине HUS 2010z. Определение критической температуры хрупкости металла шва проводили по методике [6]. Фрактографические исследования проводили на обломках испытанных образцов Шарпи с помощью стереомикроскопа DiscoveryV8 с программным комплексом Thixomet.

Во всех случаях использовали оборудование исследовательского центра Филиала АО «АЭМ технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск.

Результаты исследований и их обсуждение. В процессе исследований сварочно-технологических свойств при сварке на переменном токе (Alternating Current, AC) с различными параметрами на поверхность стальной пластины наплавляли 18 валиков. Также для сравнения были наплавлены валики на постоянном токе обратной полярности (Direct Current Reversed Polarity DCRP) и прямой полярности (Direct Current Straight Polarity DCSP). Поперечные шлифы некоторых валиков приведены на рис. 3. Используемые параметры сварочного тока при наплавке валиков приведены в табл. 2. Наплавку валиков проводили с использованием агломерированного сварочного флюса марки 48АФ-71 и плавленого сварочного флюса марки ФЦ-16А.

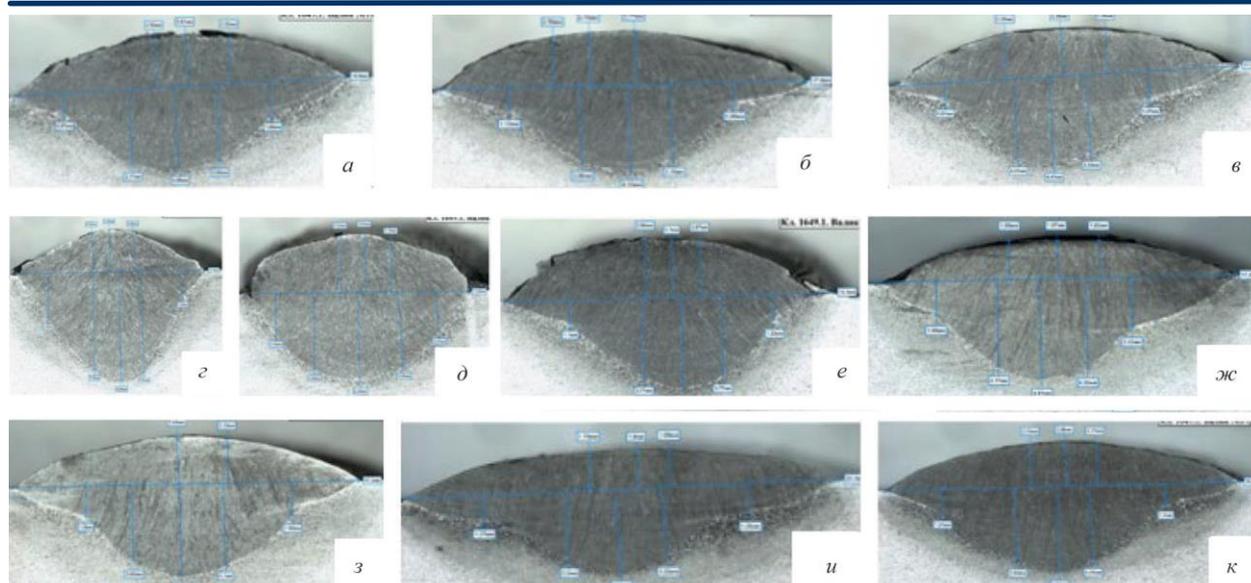


Рис. 3. Поперечные шлифы наплавленных валиков (см. табл. 2)

Таблица 2

№	Обозначение валика	Марка флюса	Род тока	Частота, Гц	Баланс, %	Смещение импульса, В
1	Рис. 3а	48АФ-71	АС	20	50	0
2	Рис. 3б		АС	50	25	0
3	Рис. 3в		АС	50	75	0
4	Рис. 3г		АС	50	50	+10
5	Рис. 3д		АС	50	50	-10
6	Рис. 3е		DCSP	-	-	-
7	Рис. 3ж		DCRP	-	-	-
8	Рис. 3з		АС	50	50	0
9	Рис. 3и	ФЦ-16А	DCRP	-	-	-
10	Рис. 3к		АС	50	50	0

Установлено следующее: при частоте тока менее 50 Гц (рис. 3 а), а также при смещении баланса тока (рис. 3 б, в) стабильное формирование валика не обеспечено. Смещение импульса переменного тока (по напряжению) как в меньшую, так и в большую сторону (рис. 3 г, д) привело к нарушению формирования наплавленного валика. При DCSP (рис. 3 е) выявлена повышенная чешуйчатость валика. Что же касается прочих сварочно-технологических характеристик, установлено, что замена DCRP на АС, за исключением вышеописанных случаев с нарушением формирования наплавленного валика, не привела к появлению подрезов, пор, трещин, какому-либо ухудшению отделимости шлаковой корки с поверхности валика.

Замена DCRP на АС, при сохранении равных характеристик силы тока, напряжения дуги и скорости сварки, привело к повышению площади сечения валика, в среднем, на 10%. При этом уменьшения глубины проплавления зафиксировано не было, что согласуется с данными работы [7]. Ширина валика также существенно не поменялась, тогда как высота валика увеличилась с 1,9–2,4 до 2,4–2,8 мм.

Результаты определения химического состава металла шва, выполненного сварочной проволокой Св-15ХГМТА под флюсами 48АФ-71 и ФЦ-16А при сварке с применением DCRP на АС частотой 50 Гц и 100 Гц приведены в табл. 3. Там же приведены нормативные значения [8] для сочетания сварочной проволоки Св-15ХГМТА и флюса 48АФ-71. Указанная сварная проба была подвержена термической обработке по режиму: 655 °С (5 ч) + 675 °С (10 ч), рекомендованному для сварных соединений стали 15Х2МФА-А.

Таблица 3. Химический состав металла шва при использовании сварочного тока различных параметров

№ варианта	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	O
Нормативные значения [6]	≤0,15	≤0,50	0,50–1,30	≤0,015	≤0,012	1,1–2,0	0,60–0,80	0,40–0,70	-
1. Флюс 48АФ-71, DCRP	0,067	0,11	1,00	0,008	0,006	1,63	0,78	0,54	0,032
2. Флюс 48АФ-71, АС (50 Гц)	0,072	0,14	0,87	0,008	0,005	1,63	0,72	0,52	0,023
3. Флюс 48АФ-71, АС (100 Гц)	0,100	0,11	0,86	0,006	0,005	1,62	0,74	0,52	0,024
4. Флюс ФЦ-16А, DCRP	0,072	0,31	0,88	0,007	0,005	1,64	0,80	0,54	0,041
5. Флюс ФЦ-16А, АС (50 Гц)	0,087	0,24	0,88	0,006	0,004	1,66	0,68	0,52	0,026

Установлено, что замена DCRP на АС существенным образом не отразилась на изменении содержания легирующих и примесных элементов в наплавленном металле. Основное различие заключается в содержании кислорода: в случае DCRP оно составляет 0,032%, тогда как в случае АС – 0,023–0,024% при использовании агломерированного флюса. При использовании плавного флюса это различие еще более высоко: 0,041% и 0,026% соответственно.

Замена флюса 48АФ-71 на флюс ФЦ-16А привела к некоторому повышению содержания кремния в наплавленном металле. Это объясняется активизацией протекания кремнийвосстановительного процесса по реакции (1):



где в круглых скобках – химическое соединение в шлаковой фазе, в квадратных – в металлической.

Указанное уменьшение содержания кислорода, по видимости, объясняется снижением интенсивности окислительно-восстановительной реакции при взаимодействии расплавленных металлической и шлаковой фаз.

Результаты определения твердости по Виккерсу приведены на рис. 4.

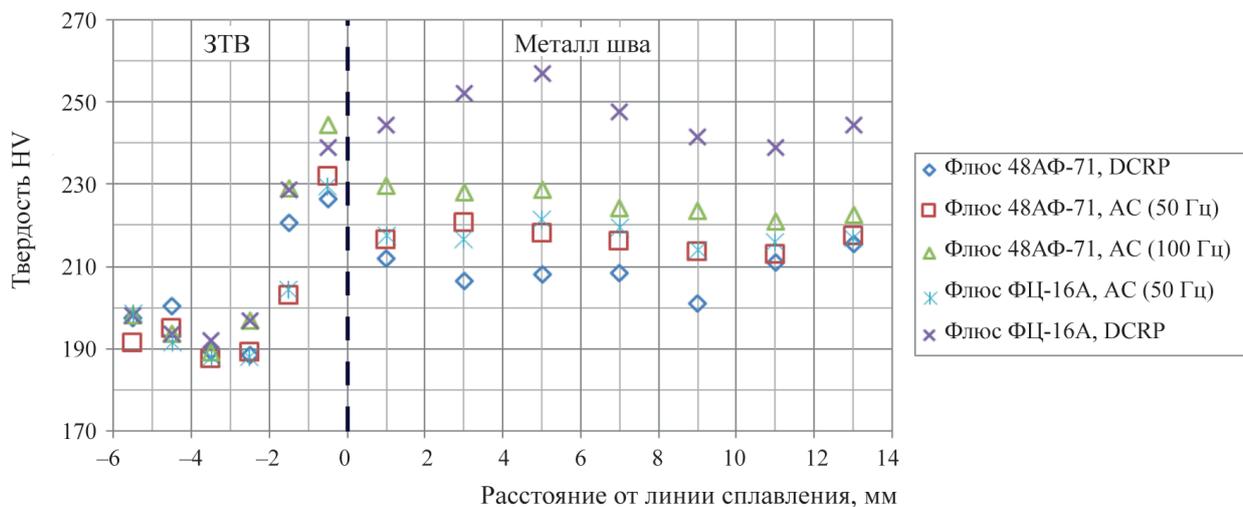


Рис. 4. Распределение твердости по сечению наплавленного металла и ЗТВ

В случае использования плавного флюса ФЦ-16А в наплавленном металле наблюдается повышение твердости до значений 263 единицы, что по-видимому, объясняется процессом дисперсионного твердения при термической обработке за счет относительно высокого содержания кремния в наплавленном металле. По зоне термического влияния каких-либо различий в значениях твердости не выявлено.

Результаты испытаний образцов Шарпи на ударный изгиб приведены на рис. 5.

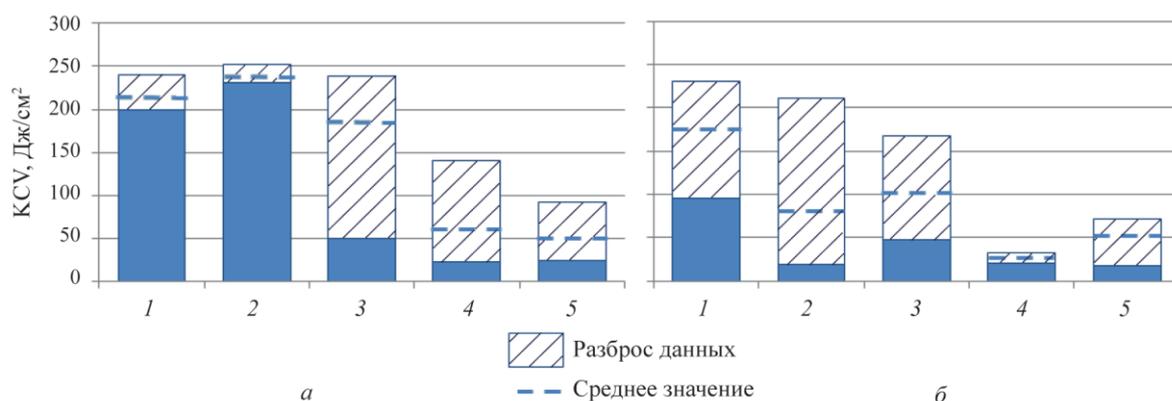


Рис. 5. Результаты испытаний на ударный изгиб при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б) (по оси абсцисс – номер варианта параметров сварки, см. табл. 3)

Наибольшие значения ударной вязкости при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ были получены при использовании переменного тока как при сварке под агломерированным, так и плавленным сварочным флюсом. Это, по-видимому, объясняется повышением чистота металла по неметаллическим включениям, что подтверждается низким содержанием кислорода (табл. 3), поскольку неметаллические включения в наплавленном металле, являясь концентраторами напряжений при разрушении образца на ударный изгиб, способствуют снижению значения его ударной вязкости [9–13].

При температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшие значения ударной вязкости наплавленного под агломерированным флюсом металла были получены при использовании DCRP, что не согласуется с данными результатов испытаний на ударный изгиб при температуре испытаний $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Повышение частоты сварочного тока с 50 до 100 Гц не привело к повышению значений ударной вязкости наплавленного металла. При температуре испытаний $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения ударной вязкости оказались ниже, чем при использовании DCRP.

Проведенный фрактографический анализ не позволил выявить какие-либо принципиальные различия в механизмах разрушения образцов Шарпи металла шва, показавших низкие значения ударной вязкости, при использовании DCRP И АС. Во всех рассмотренных случаях, в хрупкой части разрушения внутрезеренные.

Очагом разрушения являются неметаллические включения (рис. 6).

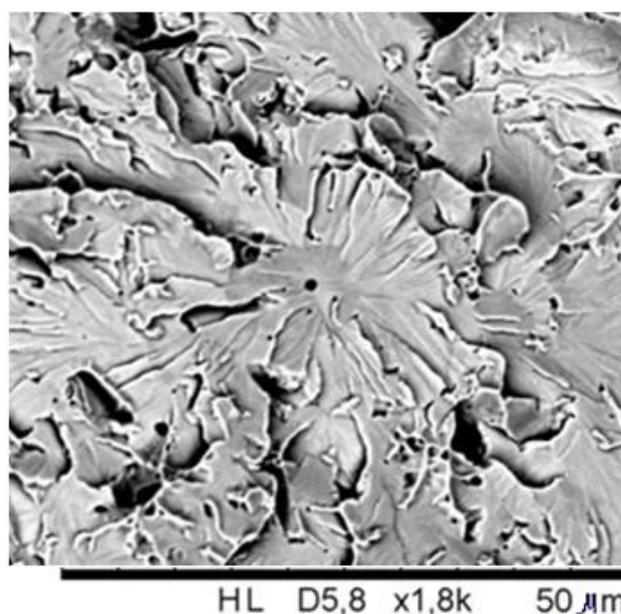


Рис. 6. Очаг разрушения на поверхности образца Шарпи, имеющего $KCV^{-50}=19\text{ Дж/см}^2$

Применение АС взамен DCRP не приводит к появлению каких-либо сегрегаций на границах зерен, способствующих снижению ударной вязкости на образцах Шарпи.

Для продолжения исследований – подтверждения характеристик металла шва требованиям нормативной документации – использовали технологические параметры переменного тока, обеспечивающие наибольшие показатели ударной вязкости наплавленного металла: сбалансированный ток частотой 50 Гц.

Изготовлены контрольные сварные соединения из низколегированных и углеродистых сталей с использованием сочетания сварочных материалов, приведенных в табл. 1.

Неразрушающий контроль выполненных сварных соединений, проведенный методами визуального осмотра, ультразвуковой, капиллярной и радиографической дефектоскопии показал соответствие требованиям нормативного документа [8] для сварных швов первой категории.

Результаты испытания металла шва на растяжение, а также определения критической температуры хрупкости приведены на рис. 7.

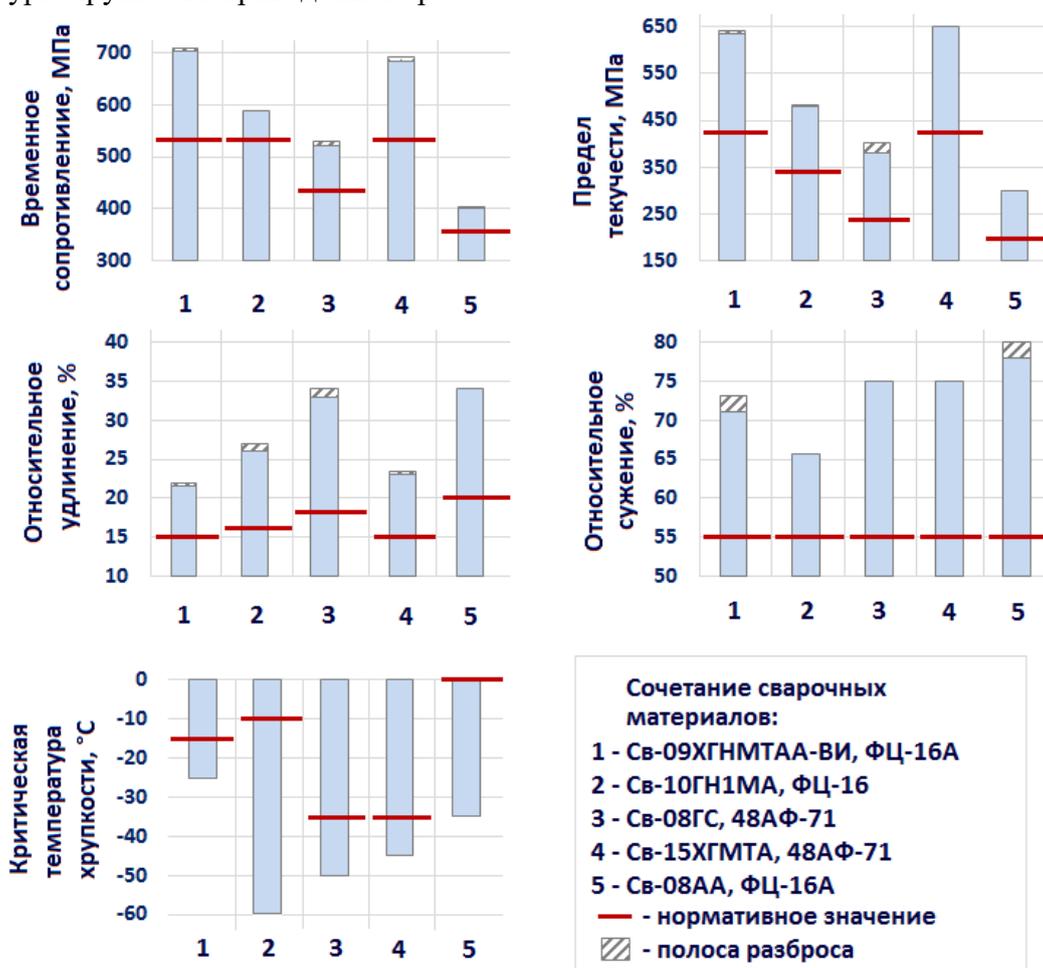


Рис. 7. Результаты определения механических свойств металла шва, выполненного различными сочетаниями сварочных материалов, с использованием переменного тока

При испытании образцов на статический изгиб до угла не менее чем 60 °С каких-либо дефектов не было выявлено во всех случаях.

Все полученные результаты испытаний свидетельствуют о соответствии металла шва и сварного соединения, выполненного с применением переменного тока, требованиям нормативной документации [8].

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать проведение автоматической сварки под флюсом на переменном токе при изготовлении оборудования АЭУ из сталей перлитного класса для следующих сочетаний сварочных материалов:

- проволока Св-09ХГНМТАА-ВИ, флюс ФЦ-16А;
- проволока Св-10ГН1МА, флюс ФЦ-16А;

- проволока Св-08ГС, флюс 48АФ-71;
- проволока Св-15ХГМТА, флюс 48АФ-71;
- проволока Св-08АА, флюс ФЦ-16А.

Выводы

1. По итогам исследования сварочно-технологических свойств при наплавке валиков методом автоматической сварки под агломерированным и плавленными флюсами различных марок на поверхность стальной пластины установлено, что применение технологии автоматической сварки под флюсом на переменном токе обеспечивает сварочно-технологические свойства, не уступающие аналогичным при сварке на постоянном токе обратной полярности. При этом, при обеспечении прочих равных параметров сварки, применение переменного тока позволяет повысить коэффициент наплавки приблизительно на 10%.

2. Исследования характеристик наплавленного металла показали, что применение переменного тока позволяет снизить содержание кислорода в наплавленном металле, что приводит к повышению ударной вязкости, в особенности, в случае использования плавленого флюса.

3. Замена постоянного тока обратной полярности на переменный ток позволяет повысить значения ударной вязкости металла шва. Наиболее предпочтительным с точки зрения обеспечения высоких значений ударной вязкости является применение переменного тока частотой 50 Гц с балансом 50% без смещения импульса.

4. Испытания сварных проб, выполненных автоматической сваркой под флюсом различных сочетаний материалов, используемых для изготовления оборудования из сталей перлитного класса, показали полное соответствие механических свойств металла шва и сварного соединения требованиям нормативной документации, а также отсутствие каких-либо дефектов в металле шва.

5. На основании результатов выполненных исследований рекомендуется применение технологии автоматической сварки под флюсом на переменном токе

для следующих сочетаний сварочных материалов:

- проволока Св-09ХГНМТАА-ВИ, флюс ФЦ-16А;
- проволока Св-10ГН1МА, флюс ФЦ-16А;
- проволока Св-08ГС, флюс 48АФ-71;
- проволока Св-15ХГМТА, флюс 48АФ-71;
- проволока Св-08АА, флюс ФЦ-16А.

Литература

1. Z. Baba, N. Nagashima, M. Nakanishi et al. Four-wire submerged arc welding process with DCEP-AC power combination for production of high toughness line pipe // Transactions ISIJ. – 1986. – Vol. 26. – P. 373–378.

2. Кархин В. А., Жарков С. В., Степанов П. П. Влияние формы переменного сварочного тока на эффективность плавления электродной проволоки при многодуговой сварке под флюсом // Сварка и диагностика. – 2020. № 3. С. 21 – 24.

3. Коберник Н. В., Чернышов Г. Г., Гвоздев П. П., Линник А. А. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом // Сварка и диагностика. – 2011. № 5. С. 24–27.

4. Тимофеев М. Н., Галяткин С. Н. Особенности применения переменного тока при автоматической сварке под флюсом оборудования АЭУ из теплоустойчивых сталей // Сварочное производство. – 2019. № 8. С. 22–28.

5. Шубин О. В., Филинков А. О., Жидков М. Е., Тимофеев М. Н. Исследование свойств металла сварных швов оборудования АЭУ сталей перлитного класса, выполненных автоматической сваркой под флюсом на переменном токе // Тяжелое машиностроение. – 2023. № 11–12. С. 9 – 16.

6. ПНАЭГ-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.

7. Сидоров В. П. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом // Сварка и диагностика. – 2013. № 3. С. 20–23.

8. НП-105-18. Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2018.
9. Polar A., Indacochea J. E., Blander M. Electrochemically generated oxygen contamination in submerged arc welding // Welding research supplement. 1990. Feb. P. 68–74.
10. Li H. G., Wu C. F., Zhao D., Zheng S. B., Zhai Q. J. Thermodynamic analysis of ultra-line Ti oxide inclusion precipitation during steels solidification // Shanghai Metal. 2011. V. 33, iss. 2. P. 36–39.
11. Xia W. Y., Wang Y. C., Wang M. L., Qiu S. T. Behavior of oxide precipitation in solidification process for aluminium–titanium deoxidized steels // Journal of Iron and Steel Research. 2011. V. 23, iss. 8. P. 11–15.
12. Zhuo X. J., Wang X. H., Wang W. J., Lee H. G. Thermodynamic calculations and MnS solubility of Mn–Ti oxide formation in Si–Mn–Ti deoxidized steel // Journal of Iron and Steel Research. 2010. V. 17, iss. 2. P. 10–17.
13. Носов С. И., Старченко Е. Г., Пронин В. П. Неметаллические включения в сварных соединениях корпусных С–Mn–Ni–Mo–V-сталей для сосудов высокого давления // Тяжелое машиностроение. 2010. № 9. С. 23–26.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-138-142

СТРУКТУРНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ МЕТАЛЛА ТРУБ КАК ПРИЧИНА ПОТЕРИ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА

Ялыгин С.А.¹, Шапошников Н.О.², Слепцов О.И.³, Ермаков Б.С.², Швецов О.В.²

¹ ООО «НТЦ ГАЗПРОМНЕТЬ», Санкт-Петербург

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

ermakov55@bk.ru

Тенденция переноса добывающих производств в Арктическую и Субарктическую зону РФ, рост аварийности трубопроводных систем и строительных конструкций в условиях экстремально низких климатических температур потребовало разработать новый подход к оценке качества сварных труб различного назначения, использующихся как в системах добычи и транспортировки продуктов, например нефти и газа, так и при обустройстве месторождений. В работе выполнен анализ и показано, что повышенный уровень структурной неоднородности металла труб, не оказывающий существенного влияния при их эксплуатации в зоне умеренных широт является критически важным фактором при прогнозе работоспособности трубопроводных систем и строительных конструкций в регионах с низкими климатическими температурами.

В настоящее время одной из мировых тенденций в промышленности является нарастание потребления таких энергоносителей, как нефть и газ, а соответственно отмечается развитие транспортных систем их доставки, что приводит к росту мощностей сопутствующих производств, в частности производства стали, проката и труб. Нефтегазовая индустрия является основой мировой экономики и по-прежнему остается высокотехнологичной и наукоемкой отраслью промышленности, однако, на сегодняшний день большинство «классических» месторождений истощены и нефтегазовым компаниям приходится переходить к освоению новых месторождений, расположенных в труднодоступных северных регионах. В большей степени такие месторождения размещены на территории Крайнего Севера и акваториях Арктического шельфа. Выявленные и потенциальные запасы углеводородного сырья в российском секторе сосредоточены

в зоне континентального склона, континентального подножья, шельфа и зоны за пределами континентального склона. В Арктической зоне находится 90% извлекаемых ресурсов углеводородов всего континентального шельфа России, ведется добыча 91% природного газа и сконцентрировано 80% общероссийских разведанных запасов газа промышленных категорий [1, 2].

На данный момент в стране активно ведутся разработки труднодоступных сырьевых месторождений Дальнего Востока, Восточной Сибири, Ямала и континентального шельфа, основными особенностями которых являются сложные климатические условия, отсутствие или крайне слабое развитие путей снабжения. Это требует повышения надежности и долговечности материалов и конструкций, используемых при обустройстве этих объектов. Прокладка трубопроводов их эксплуатация и эксплуатация площадных объектов месторождений, идет в широкой географии геологических и климатических условий зачастую близких к экстремальным (сейсмическая активность и тектонические разломы, вечная мерзлота и низкотемпературные условия эксплуатации). При работе оборудования в данных обстоятельствах могут возникать сложности связанные с перепадом температуры, воздействием агрессивных сред и усиленной знакопеременной нагрузкой. В этой связи достижение однородных свойств и металлургического качества при изготовлении сварных прямошовных труб и оборудования из них для нефте- и газопромысловых объектов принимает критически важный характер. К таким трубам выдвигаются повышенные требования к прочностным свойствам, вязкости и трещиностойкости при пониженных температурах, высокого уровня пластичности, сопротивления повторным нагрузкам, хорошей свариваемости и т. д.

Однако, оценка долговечности и собственно качества основного металла и сварных соединений труб для трубопроводов и строительных конструкций нефте- и газопромыслов по существующим нормативным документам весьма ограничена и недостаточна, о чем свидетельствуют повышенная аварийность трубопроводных и строительных трубчатых элементов объектов, возведенных на месторождениях, при полном соответствии листового проката, методов и технологий формовки и сварки труб, из которых они изготовлены, требованиям существующей нормативно-технической документации. Это говорит о том, что виды и объем испытаний возможно недостаточны для обеспечения надежности, особенно в условиях низкотемпературной работы оборудования [3, 4].

Исходя из существующих трендов освоения территории с преимущественно низкотемпературной эксплуатацией в данной работе изучены основные структурные факторы, влияющие на работоспособность и надежность трубной продукции. К ним можно отнести оценку полосчатости, структурной однородности, контроль неметаллических включений и влияние этих факторов на механические свойства и стойкость к коррозионному разрушению. Целью данной работы явилось обоснование необходимости совершенствования нормативно-технической документации, определяющей технические требования к материалам труб, эксплуатация которых планируется в условиях северных широт, и показать, что для реализации планов по освоению Арктики (с температурой эксплуатации до минус 50 – минус 60 °С) и многолетнемерзлых грунтов необходимо более детально учитывать стабильность структурных факторов металла при пониженных температурах и их влияние на механические свойства, коррозионную стойкость и трещиностойкость металла трубной продукции.

Анализ отечественной и ряда источников зарубежной литературы, а также наши исследования повреждений трубопроводов и строительных конструкций показал, что одной из основных причин повышенной аварийности нефтепроводов различного назначения и строительных конструкций в Арктической зоне являются неметаллические включения и неравномерность структуры металла труб – полосчатость и разнородность микроструктуры, которые приводят к возникновению сложнапряженных состояний в структуре металла, снижают динамические механические свойства, коррозионную стойкость и хладостойкость сталей, практически не оказывая воздействия на их прочностные характеристики [2, 5].

В соответствии с СП16.3330.2017 «Стальные конструкции» прямошовные трубы могут поставляться по ГОСТ 20295-85 только в термически обработанном состоянии после ТВЧ-сварки, или без термической обработки после сварки плавлением. Исследование влияния структурной неоднородности металла труб на их механические и коррозионные свойства было

изучено на металле вырезок из сварных (под флюсом) прямошовных труб 219x8 мм, изготовленных из стали 09Г2С (ГОСТ 20295–85) в исходном состоянии. Разброс значений механических свойств металла труб при 20 °С укладывался в 10% и соответствовал ГОСТ 20295 ($\sigma_{0,2}$ – 430–494 МПа, σ_B – 570–640 МПа, KCV при 20 °С – 50–61 Дж/см², при минус 20 °С – 47–51 Дж/см²). В то же время ударная вязкость при минус 60 °С составила от 12 до 46 Дж/см², трещиностойкость металла труб δ_{\min} (CTOD_{min}) уже при минус 20 °С – от 0,09 до 0,64 мм (см. табл.).

Анализ данных испытаний показал, что в зоне температур умеренного холода свойства материала всех исследованных труб близки между собой, в то же время наблюдается значительный разброс значений ударной вязкости и трещиностойкости при дальнейшем понижении температуры. Таким образом понижение температуры испытаний до минус 40 и минус 60 °С оказывает совершенно разное влияние на свойства одной и той же марки стали, произведенной по одному и тому же стандарту. Это проявляется в резком снижении ударной вязкости и трещиностойкости стали одних труб (трубы № 3 и № 5) и практически сохранением свойств других (трубы № 2 и № 4) – внутри одной произвольно выбранной партии. Такой разброс значений, характеризующих сопротивляемость низким температурам, предопределяет появление в действующих конструкциях зон, склонных к хрупкому низкотемпературному разрушению, снижению надежности и долговечности всей конструкции в целом и связан с особенностями структурного состояния металла каждой из использованных труб.

Таблица. Взаимосвязь микроструктуры и свойств металла труб из стали 09Г2С

Труба №	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	KCV при T,		δ_{\min}	D*max	Dсред	Полосчатость /балл	К-во НВ**	V***	К-во блистеров
	При 20 °С			20 °С	-60 °С	мм						
	МПа		%	Дж/см ²		мм	мкм	шт/мм ²		мм/год	шт/см ²	
1	640	485	28	53	34	0,41	18,3	14,0	A1.7/3-4	3	0,36	5
2	621	494	30	50	41	0,64	12,4	8,9	A1.5/1	2	0,29	1
3	580	430	29	58	12	0,09	48,9	11,8	A1.9/5	6	0,41	11–14
4	595	455	33	61	46	0,56	14,7	9,3	A1.6/2	1	0,31	0
5	610	460	31	58	19	0,10	51,9	12,1	A1.8/4-5	7	0,39	10–13

* D – размер зерен: max – средний диаметр 5 самых крупных зерен в поле видимости шлифа при увеличении x100; средний размер зерен по ГОСТ 5639. ** включения диаметром более 10 мкм;

*** испытания в среде 5% NaCl+CO₂

Исследования микроструктуры стали были проведены в поверхностных слоях и ½ толщины стенки трубы. Показано, что для микроструктуры металла исследованных труб с низкими характеристиками низкотемпературных трещиностойкости и ударной вязкости характерна значительная разнотернистость – результаты анализа структурного состояния, в соответствии с ГОСТ Р 54570–2011, приведены в табл. 1. Установлено, что в трубах с высоким уровнем ударной вязкости – форма ферритных зерен, в основном, гранулярная, разнотернистость минимальная. Ранжирование труб по полосчатости показало, что максимальный уровень полосчатости структуры 5 балл (ГОСТ 5640), был обнаружен в ½ толщины трубы № 3 – трубы с минимальной ударной вязкостью и трещиностойкостью; минимальный – у труб № 2 и 4 (1–2 балл ГОСТ 5640). Было обнаружено, что в трубе № 2 (CTOD_{min} = 0,09) разница между диаметрами пяти самых крупных зерен в плоскости шлифа и средним диаметром зерна в той же плоскости превысила 250%, в трубе № 5 (CTOD_{min} = 0,10) – более 330%; перлитная полосчатость в этих трубах оказалась на уровне 4–5 балла; в то же время для труб № 2 и 4 (CTOD_{min} – 0,64 и 0,56 соответственно) – разница диаметров оказались на уровне 35–50%, а балл полосчатости на уровне первого – второго..

На основании результатов исследований, была выявлена однозначная зависимость низкотемпературных вязкости и трещиностойкости металла труб стали 09Г2С от неравномерности ее структуры. Еще одним фактором, охрупчивающим металл труб являются неметаллические включения, которые являются концентраторами напряжений и электродами, вокруг которых возникают электрохимические взаимодействия металла и агрессивных флюидов перекачиваемой среды, приводящие к возникновению коррозионных и коррозионно-механических дефектов. Анализ распределения коррозионно-активных металлических включений в трубах

показал, что металл всех труб загрязнен неметаллическими включениями, максимальное количество которых зафиксировано в металле трубы № 3, а минимальное – в трубе № 2.

Таким образом полностью подтверждается взаимосвязь между структурной неоднородностью металла труб и их низкотемпературными механическими свойствами, ранее подробно описанная в работе [2].

Учитывая особенности эксплуатации оборудования месторождений, высокую коррозионную активность добываемых флюидов и внешней среды (связанной, например, со значительными площадями кислых заторфованных грунтов в северных регионах страны) были проведены испытания, позволившие определить взаимосвязь структурного состояния металла труб и их коррозионной стойкости. Исследования были выполнены в соответствии со стандартами ASTM G3, G5, G59, G102 – определение скорости коррозии и NACE TM-0177 – стойкость к сульфидному растрескиванию под напряжением. При измерении поляризационных сопротивлений и дальнейших расчетах скоростей коррозии получены результаты, показавшие, что максимальная скорость коррозии была отмечена у сталей с высокой структурной неоднородностью (№ 5 и № 3) – минимальные у сталей № 2 и № 4.

Одной из особенностей северных месторождений нефти является то, что в составе добываемого флюида содержится достаточно высокая концентрация весьма агрессивного продукта – сероводорода. Воздействие сероводорода на коррозионное растрескивание изучено достаточно подробно и позволяет оценить этот фактор как один из наиболее значимых в процессе ускоренного разрушения промышленных и строительных объектов, связанных с перекачкой нефти, например, промысловых трубопроводов. Хотя известно [9], что сталь 09Г2С обычно не склонна к сульфидному растрескиванию, однако структурная неравновесность металла может оказать определенное негативное влияние на сопротивляемость к образованию и развитию коррозионных трещин, поэтому в работе была выполнена оценка влияния структурной неоднородности на сопротивляемость металла труб сульфидному растрескиванию. Испытания показали, что металл всех труб не склонен к сульфидному растрескиванию, однако, у сталей с высоким содержанием крупных (более 20 мкм) неметаллических включений имеются множественные блистеры. В трубах, где такие включения в металле отсутствуют – блистеры не обнаружены, что подтверждается данными ряда авторов, в том числе [6]. Развитие блистеров происходит в местах расположения крупных неметаллических включений, причем было показано, что межфазная граница между включением и матрицей растравлена, а в теле самого включения обнаружены микротрещины. Совокупность растравленных границ и микротрещин служит инициатором развития хрупкого трещинообразного дефекта и приводит к ускоренному разрушению трубы.

Результаты исследований указывают, на важную роль структурных (металлургических) факторов в формировании комплекса низкотемпературных свойств стали 099Г2С, которые обязательно должны контролироваться при поставке труб в регионы Арктики, Крайнего Севера и Сибири. Зафиксированный разброс значений низкотемпературных механических свойств и трещиностойкости приводит к снижению надежности трубопроводов и строительных конструкций, изготовленных из трубных элементов в условиях низкотемпературной эксплуатации, и требует разработки дополнительных методов и объемов контроля металла труб, поставляемых для строительства нефтепроводов и обустройства месторождений в северных регионах страны.

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).

Литература

1. Лаверов, Н.П. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов Арктического шельфа России / Н.П. Лаверов, А.Н. Дмитриевский, В.И. Богоявленский // Арктика: экология и экономика. 2011. – № 1. – С. 26 – 37.
2. Шапошников Н.О. Исследование основных структурных факторов, влияющих на надёжность труб из стали 10Г2ФБ, в условиях низкотемпературной эксплуатации нефтегазовой инфраструктуры. / Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., СПбПУ, Санкт-Петербург, 2022, 22 с.
3. Дадонов Ю.А. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС / Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров, Д.В. Дегтярев, С.И. Сумской // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 6. – С. 2 – 6.
4. Ялыгин С.А. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буропускных свай. / Ялыгин С.А., Ермаков Б.С., Столяров А.В., Койнов Е.Г., Швецов О.В., Шапошников Н.О., Токарев В.О., Голиков Н.И.// ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. Т. 9, № 1, 2024, с.173–182.
5. Ермаков, Б.С. Влияние технологических факторов на формирование свойств металла труб магистральных нефтепроводов / Б.С. Ермаков, Н.О. Шапошников // Metallurg. – 2018. – № 8(62). – С. 39–43.
6. Альхименко А.А. «Совершенствование метода испытаний на коррозионное растрескивание трубных сталей нефтегазового назначения в агрессивных газовых средах»/ Дисс. На соиск.уч.ст. к.т.н., Санкт-Петербург, СПбПУ Петра Великого, 2022, 148 с.

СЕКЦИЯ 2. ЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОФИЗИКА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Секция посвящена памяти и 70-летию со дня рождения ведущего учёного в области теплообменных процессов при низких температурах, доктора технических наук Е. Г. Старостина

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-143-146

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ И ГРУНТОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ БУХТЫ «ТИКСИ»

Ерофеевская Л.А., Соколова М.Д.

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

lora-07.65@mail.ru

Исследование микробиологической активности мерзлотных почв и грунтов бухты Тикси Булунского района Республики Саха (Якутия) выявило некоторые особенности состава микроорганизмов, приспособленных к экстремальным условиям холода. Доминирование психрофильных микроорганизмов, адаптированных к низким температурам, и активность актинобактерий и дрожжей подчеркивают их адаптационные стратегии в уникальной арктической экосистеме. Сниженная численность гетеротрофных микроорганизмов по сравнению с олиготрофными бактериями и грибами указывает на то, что в исследуемых почвах преобладают виды микроорганизмов, способные обходиться с минимальным количеством органического вещества для своего развития. Кроме этого, микроорганизмы в исследуемых почвах не выполняют свои функции полностью или не обеспечивают эффективное разложение органических веществ, об этом свидетельствует низкий коэффициент минерализации (менее 1 условной единицы). Это свидетельствует о низком уровне органического обогащения почвенной среды и характеризует почвы, как слабообогащенные.

Введение. Изучение микробиологической активности в мерзлотных почвах арктических регионов является актуальной и важной задачей, позволяющей лучше понять функционирование экосистем и адаптации живых организмов к изменениям в условиях антропогенного и природного воздействия, что имеет существенное значение для охраны окружающей среды (ООС), поскольку мерзлотные почвы являются крупным резервуаром углерода, разложение которого под воздействием микроорганизмов может привести к выбросу парниковых газов [1, с. 92–99]. Кроме этого, в условиях изменяющегося климата и роста человеческой активности в арктических регионах возрастает риск распространения инфекций, возбудители которых могут не один десяток лет сохранять свою жизнеспособность в условиях криолитозоны [2, с. 145–155]. Поэтому изучение микробиологической активности в мерзлотных почвах может помочь предсказать и предотвратить возможные эпидемии, а знание о вкладе микробных сообществ в процессы круговорота элементов и поддержания биологического разнообразия поможет разрабатывать устойчивые подходы к использованию природных ресурсов и охране экосистем в арктических условиях.

Целью данного исследования являлось изучение микробных сообществ мерзлотных почв прибрежной зоны бухты «Тикси», потенциальных для биотехнологических применений, таких как биodeградация загрязнений, включая нефть и нефтепродукты (НП).

Задачи исследования:

1. Проведение анализа состава микробных сообществ в мерзлотных почвах с использованием классического микробиологического метода посева на питательные среды;

2. Оценка способности микробных сообществ к деградации нефти в лабораторных условиях;
3. Идентификация выделенных микроорганизмов по морфо-культуральным и физиолого-биохимическим характеристикам;
4. Определение оптимальных условий окружающей среды (температура, влажность, рН, содержание в среде соли) для активации микробных сообществ и повышения их активности при биодеградации нефти в условиях лабораторного опыта;
5. Исследование потенциала микроорганизмов для синтеза биополимеров и других ценных продуктов, которые могут быть использованы в биотехнологии и экологии;

Материалы и методы исследований. Для проведения микробиологического исследования использованы образцы мерзлотных почв и грунтов, отобранные в прибрежной зоне бухты Тикси-1 (71°39'47" с. ш.; 128°48'42" в. д. и 71°41'25,5" с.ш.; 128°52'9" в. д.); Тикси-3 (71°38'14,93" с.ш.; 128°51'52.1" в.д.) и фоновые пробы (70°41'43" с.ш.; 127°22'54" в.д.).

Лабораторные исследования выполнены в соответствии с общеутвержденными в микробиологии методами [3, 394 с.; 4, 464 с.; 5, 175 с.; 6, 131 с.; 7, 104 с.; 8, 248 с.].

Результаты исследования. Согласно полученным результатам исследования почвы и грунты в прибрежной зоне бухты Тикси по содержанию гетеротрофных микроорганизмов классифицируются от средне обогащенных до очень бедных (табл. 1).

Таблица 1. Средние показатели общей численности гетеротрофных и олиготрофных микроорганизмов в почвах и грунтах прибрежной зоны бухты Тикси

Код пробы	Группа микроорганизмов	миллион КОЕ/г АСВ		Степень обогащенности почв по Звягинцеву [9, с.48–54]
		Олиготрофы	Гетеротрофы	
Тикси-1 П-1	Мезофилы	0,2111±0,001	0,0228±0,001	Бедная
	Психрофилы	3,6333±0,015	1,0033±0,05	Средне обогащенная
Тикси-1 П-2	Мезофилы	0,1042±0,005	0,0333±0,001	Бедная
	Психрофилы	0,3130±0,0015	0,0399±0,001	Бедная
Тикси-1 П-3	Мезофилы	0,0323±0,0015	0,0030±0,00301	Очень бедная
	Психрофилы	0,0799±0,003	0,0224±0,001	Очень бедная
Тикси-1 П-4	Мезофилы	0,0820±0,004	0,0218±0,001	Бедная
	Психрофилы	0,0824±0,004	0,0339±0,001	Бедная
Тикси-1 П-5	Мезофилы	0,0810±0,004	0,0520±0,002	Бедная
	Психрофилы	0,7999±0,03	0,5519±0,002	Бедная
Тикси-1 П-6	Мезофилы	0,4995±0,02	0,0305±0,001	Бедная
	Психрофилы	0,0309±0,001	0,0002±0,00001	Средне обогащенная
Тикси-1 П-7	Мезофилы	0,0090±0,0004	0,0030±0,0001	Очень бедная
	Психрофилы	1,4225±0,05	1,0220±0,05	Средне обогащенная
Тикси-1 П-8	Мезофилы	0,0600±0,003	0,0311±0,001	Бедная
	Психрофилы	0,8822±0,004	0,0222±0,001	Бедная
Тикси-3 П-9	Мезофилы	0,0099±0,0004	0,0032±0,0001	Очень бедная
	Психрофилы	0,0800±0,004	0,0422±0,002	Бедная
Фон	Мезофилы	4,2242±0,02	1,2283±0,01	Средне обогащенная
	Психрофилы	8,1010±0,04	3,1812±0,01	Средне обогащенная

Низкая обогащенность почв и грунтов гетеротрофными микроорганизмами может быть обусловлена различными факторами, включая экстремальные климатические условия, ограниченная доступность питательных веществ и медленные биохимические процессы в условиях постоянного мерзлого грунта. Это влияет на биологическую активность и метаболические потребности микроорганизмов, что отражается на общей обогащенности сообществ.

Стоит отметить, что психрофильные группы микроорганизмов превышают по численности мезофильную группу бактерий и грибов (табл. 1). Что характеризует их, как организмы, обладающие адаптационными стратегиями. К механизмам адаптации психрофилов можно отнести изменения в структуре мембран и метаболизме, позволяющие им эффективно функционировать в арктической среде.

Исследования показали, что в условиях низких температур гетеротрофные микроорганизмы на исследуемой территории менее распространены, чем олиготрофные виды. Это свидетельствует о специализированных стратегиях выживания микроорганизмов в условиях ограниченности ресурсов. Кроме этого, микроорганизмы в исследуемых почвах и грунтах не обеспечивают эффективное разложение органических веществ, об этом свидетельствует низкий коэффициент минерализации (менее 1 условной единицы). Это свидетельствует также о низком уровне органического обогащения почвенной среды и характеризует почвы, как слабообогатенные.

Из почв прибрежной зоны бухты Тикси-1 в районе расположения полузатонувшего судна «Днепр» выделены микроорганизмы, обладающие потенциалом для использования их в очистке загрязненных территорий, включая участки с морскими нефтяными разливами. Углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ), обнаруженные в такой уникальной среде, обладают адаптивными свойствами, которые делают их перспективными для разработки биотехнологических методов утилизации нефти в условиях криолитозоны. Этот вид исследований имеет большое значение для экологической безопасности при работе с загрязненными территориями, а также может способствовать развитию новых технологий в области биоремедиации. Дальнейшие исследования и тестирование выделенных микроорганизмов могут привести к созданию эффективных и экологически безопасных методов утилизации нефтяных загрязнений в прибрежной зоне бухты Тикси-1 и подобных Северных морских территориях.

Выводы:

1. Микроорганизмы, выделенные из мерзлотных почв и грунтов бухты Тикси, обладают потенциалом для биотехнологического применения в утилизации нефтезагрязнений.
2. Изучение микроорганизмов, способных к разложению углеводородов, имеет важное значение для разработки методов очистки от загрязнений и восстановления экосистем в условиях нефтяных разливов.
3. Анализ адаптивных свойств и механизмов действия выделенных микроорганизмов позволит лучше понять их потенциал для использования в биотехнологических процессах.
4. Дальнейшее исследование и тестирование обнаруженных микроорганизмов могут привести к разработке эффективных и экологически безопасных методов утилизации нефтяных загрязнений в зоне бухты Тикси-1 и арктических регионах в целом.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011200369-1) и Программы комплексных научных исследований в РС (Я) по проекту: «Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды в ареале воздействия заброшенных судов в арктической зоне Республики Саха (Якутии) и разработка способа очистки арктических почв от нефтепродуктов» с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. Ерофеевская Л. А., Саввинов Д. Д., Тарабукина Н. П. Целлюлозолитические микроорганизмы – как тест для определения биологической активности мерзлотных почв Центральной Якутии // Дальневосточный журнал инфекционной патологии. 2006, № 8(8). С. 92–99.
2. Салтыкова, А. Л. Культурально-биохимические свойства близкородственных к *Bacillus anthracis* спорообразующих бактерий, выделенных из палеонтологических образцов // Всероссийский научный форум студентов и учащихся: сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 30 сентября 2021 года. Том Часть 1. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2021. С. 145–155. – DOI 10.46916/04102021-5-978-5-00174-331-6.
3. Лабинская А.С. Микробиология с техникой микробиологических исследований. Издание 4-е, переработ. и дополн. М.: Медицина, 1978. 394 с.
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. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 175 с.

6. Лабораторный практикум по общей микробиологии / Градова Н.Б. [и др.]. М.: ДеЛи принт, 2001. 131 с.
7. 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.
8. Гаузе Г.Ф. и др. Определитель актиномицетов: Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia* / Г.Ф. Гаузе. М.: Книга по Требованию, 2014. 248 с.
9. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение, 1978. № 6. С. 48–54.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-146-149

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Ефремов В.Н.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

vnefremov@mpi.ysn.ru

По результатам мониторинга рассматривается влияние температуры приземного воздуха, высоты снегового покрова и дождевых осадков на УЭС слоя переходной промороженности многолетнемерзлых грунтов, как наиболее подверженного опасности деструкции в результате потепления климата. На основе сравнительного анализа изменения УЭС на глубине 1, 2 и 3 м в 2009 и 2010 годах, сделаны выводы о причинах аномального растепления грунтов и о сохранении промороженности грунтов под воздействием климатических факторов.

С 2006 г. нами, проводится фоновый радиоэлектромагнитный мониторинг на территории стационара ИМЗ «Туймаада» сначала радиоимпедансным зондированием [1], а с 2017 г. – РМТ зондированием [2]. Грунты на экспериментальных площадках стационара представлены многолетнемерзлыми отложениями песков средней крупности, подстилаемыми на глубине более 30 м алевритами. Зондирования производились горизонтальными магнитными антеннами и электрическими незаземленными приемными линиями с длиной одного плеча 5 м – для радиоимпедансного зондирования в диапазоне частот 10–1000 кГц, и 10 м – для РМТЗ в диапазоне частот 1–1000 кГц.

В результате мониторинговых исследований сезонных изменений геоэлектрического разреза (ГЭР), по данным радиоимпедансного зондирования, получена модель геоэлектрического строения мерзлых грунтов на стационаре ИМЗ СО РАН, которую здесь иллюстрирует сезонное изменение ГЭР во времени (рис. 1).

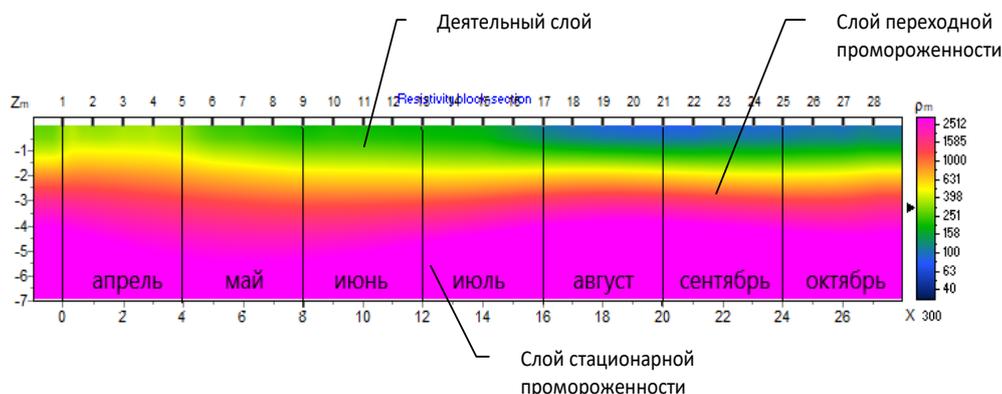


Рис. 1. Временной ряд сезонных изменений геоэлектрического разреза мерзлых грунтов до глубины 7 м, в период с апреля по октябрь

Модель представляется состоящей из трех основных горизонтов: деятельный слой (ДС) (зимой – сезонно-мерзлый, летом – сезонно-талый); слой переходной промороженности (СПП), имеющий градиентное изменение льдистости; слой стационарной промороженности (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).

Здесь ДС четко выделяется удельным электрическим сопротивлением (УЭС) от 50 до 500 Ом·м, мощностью от 1 до 2 м и низкоомной водонасыщенной верхней его частью, вызванной дождевыми осадками в августе-октябре. Подстилающий его СПП выделяется значениями УЭС от 500 до 2500 Ом·м и мощностью от 2 до 4 м. Опорный слой ССП имеет УЭС более, чем 2500 Ом·м.

В СПП льдистость грунтов повышается с понижением температуры грунтов, чем и объясняется градиент повышения его УЭС. С понижением температуры грунтов, сначала промерзает свободная вода, затем рыхлосвязанная и, наконец, связанная вода, определяя, тем самым, максимальную промороженность данных грунтов, в зависимости от общей влажности и минерального состава. В ССП льдистость постоянна и прочность грунтов с изменением климата не вызывает особых опасений. Поэтому, именно СПП, наряду с ДС, представляется основным объектом наблюдения при мониторинге изменения состояния многолетнемерзлых грунтов, в связи с опасностью перехода из твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое.

Состояние многолетнемерзлых грунтов, определяемое их промороженностью и зависящее, в первую очередь, от температуры приземного воздуха и от теплопроводности грунтов, подвержено и влиянию климатических факторов, таких как выпадение осадков в виде снега и дождя, либо их отсутствие. Сочетание по количеству и времени проявления в теплом периоде одного года (апрель-сентябрь) таких климатических факторов, как высота снегового покрова и количество дождевых осадков, либо их отсутствие, могут, наряду с температурой приземного воздуха привести и к аномальному растеплению грунтов. Впервые, это было отмечено, нами в теплый период 2007 года [3]. Грунты СПП, при аномальном растеплении, рискуют, в первую очередь, перейти из твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое, снижающее их прочность.

Влияние высоты снегового покрова, дождевых осадков, либо их отсутствия, хотя и не совместное и не такое яркое, но примечательное, отмечалось нами и в 2009–2010 годах. Оно опосредовано просматривается через изменение УЭС грунтов в теплые периоды этих лет (рис. 2).

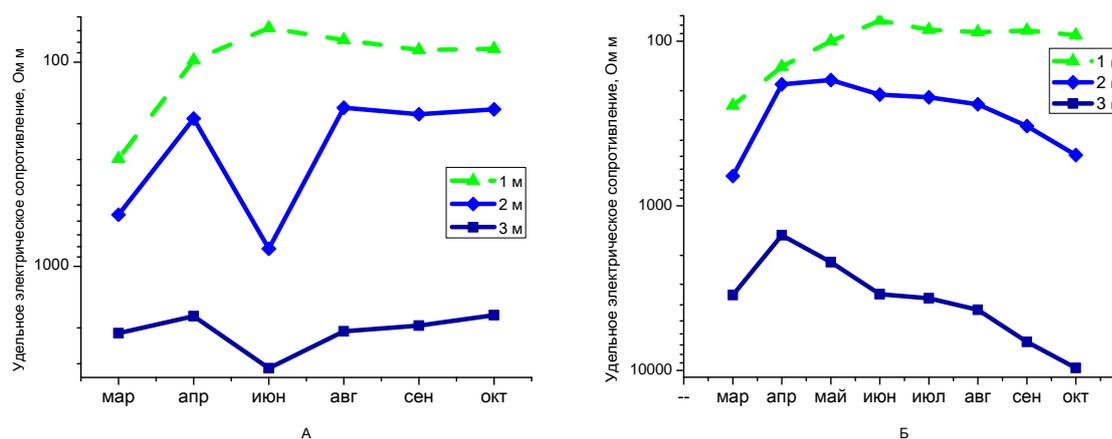


Рис. 2. Изменение удельного электрического сопротивления грунтов деятельного слоя и слоя переходной промороженности на различной глубине в 2009 (А) и 2010 (Б) годах

По нашим данным, смещение максимума среднемесячной температуры приземного воздуха (на высоте 2 м) от июня, в 2009, к июлю в 2010 отразилось в общем повышении УЭС грунтов СПП, а значит, и их промороженности в августе-октябре этого года (рис. 2). Получается, что промороженность грунтов СПП возрастала уже в августе-сентябре, при еще положительных температурах приземного воздуха, за счет охлаждения подстилающими грунтами

ССП. Таким образом, при определенных условиях, происходит промерзание верхней части многолетнемерзлых грунтов не только сверху, но и снизу.

Влияние высоты снегового покрова определяется его теплоизоляционными свойствами. Высокий снеговой покров, в силу своей низкой плотности и, соответственно, низкой теплопроводности, оказывает значительное препятствие промерзанию грунтов сверху в холодный период года (октябрь-апрель) и играет, в этом смысле, деструктивную, для мерзлоты роль. Меньшая его высота способствует естественному промерзанию грунтов, играя уже конструктивную роль. Максимальная его высота (25,6 см в 2009) достигается в марте, снижаясь в апреле (21,3 см в 2010). Мартовские значения УЭС грунтов на трех значениях глубины 1, 2 и 3 м (рис.2) меньше в 2009, при средней высоте снегового покрова 25,6 см, чем в 2010, при 19,8 см этого параметра. Если до марта высокий снеговой покров препятствует промерзанию грунтов, то в апреле он способствует уже сохранению их промороженности. Малая высота снегового покрова в 2010 способствовала значительному увеличению промороженности грунтов СПП к марту, выраженному увеличением УЭС и не менее значимому ее снижению в апреле, выраженному снижением УЭС.

Дождевые осадки, изменяя теплопроводность грунтов ДС, влияют на грунты СПП, в разные годы и в разные месяцы неоднозначно. В 2009 максимальное их количество (41 мм) наблюдалось в августе, когда оно способствовало снижению УЭС грунтов СПП, как следствию их растепления при пониженных уже температурах приземного воздуха. В 2010 максимальное количество дождевых осадков (41 мм) выпало в мае, что поспособствовало раннему растеплению грунтов СПП. Засуха в июне 2009 (3,3 мм осадков) привела к резкому повышению УЭС грунтов СПП, вызванному их дополнительной промороженностью, особенно в верхней части СПП, на глубине 2 м. Августовское снижение дождевых осадков до 9,5 мм в 2010 вызвало рост УЭС, за счет промерзания грунтов СПП при еще положительных температурах приземного воздуха, в результате снижения теплопроводности ДС.

Заключение. Геофизический мониторинг, показывая фактическую промороженность многолетнемерзлых грунтов, позволяет оценить влияние климатических факторов на состояние многолетнемерзлых грунтов и оперативно спрогнозировать результат их воздействия на основания зданий и инженерных сооружений.

Слой переходной промороженности многолетнемерзлых грунтов является наиболее важным объектом внимания геофизического мониторинга, поскольку грунтам именно этого слоя грозит, при потеплении климата, переход из твердомерзлого состояния в пластично-мерзлое.

Положение и величина максимума среднемесячной температуры приземного воздуха характеризуют изменение промороженности грунтов в летний период года.

Высота снегового покрова, сформировавшегося за зимний период, определяет состояние грунтов слоя переходной промороженности многолетнемерзлых грунтов в предстоящий летний период.

Выпадение дождевых осадков, равно как и их отсутствие, изменяя теплопроводность грунтов, вносят некоторую корректировку ситуации, значительным изменением промороженности слоя переходной промороженности.

Аномальному растеплению многолетнемерзлых грунтов способствует совместная реализация следующих климатических факторов: большая высота снегового покрова зимой, весенние дожди и продолжительные летние дожди.

Сохранению промороженности многолетнемерзлых грунтов слоя переходной промороженности в летний период года, в первую очередь способствует уменьшение температур приземного воздуха в целом, положение и величина их максимума. Во-вторых, этому помогает, особенно в начале лета, накопленная к апрелю за весь предыдущий зимне-весенний период, высота снегового покрова. И в-третьих, условиям сохранения промороженности грунтов способствует соответствующее изменение теплопроводности грунтов деятельного слоя, определяемое дождевыми осадками. Точнее временем и количеством их выпадения, либо временем их отсутствия.

Литература

1. Ефремов В.Н. Радиоимпедансное зондирование мерзлых грунтов. Якутск: Издательство ФГБУН Институт мерзлотоведения, 2013, 123 с.
2. Ефремов В.Н., Баишев Н.Е., Данилов К.П. Сезонный радиоэлектромагнитный мониторинг состояния мерзлых грунтов РМТ зондированием // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: материалы Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 2020.- С. 100–104.
3. Ефремов В.Н. Геофизическая оценка и индикация результата воздействия климатических факторов на состояние мерзлых грунтов // БСТ. Бюллетень строительной техники. том 1024, № 12. 2019 – С. 46–50.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-149-151

НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМОВ ШТАБЕЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КУЧНОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Каймонов М.В.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск

gtf@igds.ysn.ru

В современных экономических условиях проектирование горных предприятий должно осуществляться в кратчайшие сроки и с сохранением при этом высокой точности и достоверности результатов, с глубокой, зачастую многовариантной проработкой проектных решений. Представлены результаты разработки методики построения 3Д геоинформационной модели объектов горного производства. В качестве примера рассматривается прогноз теплового режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в условиях холодного климата.

«Цифровой двойник» рудного штабеля построен в программном комплексе Frost 3D. Введение «элементарных» блоков позволяет рассматривать различные варианты его формирования, режимов эксплуатации, орошения, теплоизоляции и др. Это позволяет выявить закономерности изменения теплового режима рудного штабеля, разработать рекомендации по управлению тепловым режимом, повысить экономическую эффективность данной технологии и применять её в условиях крайнего Севера.

На рис. 1 представлен вариант расчёта теплового режима штабеля в теле которого сформирован наклонный технологический съезд. Съезд имеет уклон 70 град, борта съезда – 75 град. Начало расчёта 01.02.2022 г.; конец расчёта 15.07.2024 г. Промежуточные значения на 01 и 15 число каждого месяца.

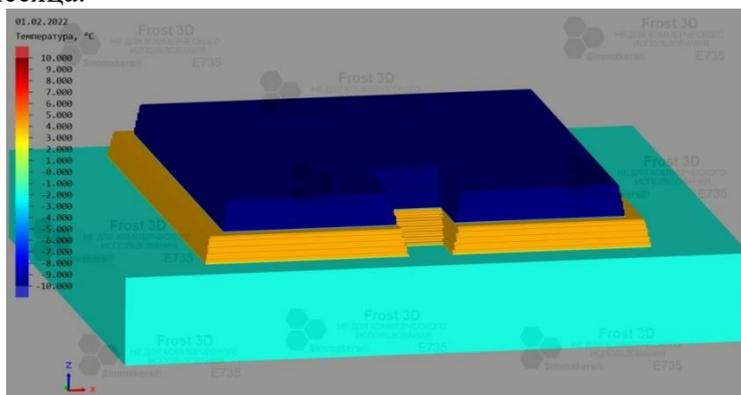


Рис. 1. Общий вид штабеля со съездом

На рис. 2–3 представлены продольные срезы в виде температурных диаграмм тела штабеля на различные даты при скорости фильтрации $v = 2.0$ м/сут и при круглогодичном орошении. В зимний период поверхность штабеля теплоизолируется льдом толщиной 10 см с воздушным прослоем 5 см между породами штабеля и льдом. Нижний ярус имеет начальную положительную температуру $+4$ °С, верхний ярус сформирован зимой и имеет начальную отрицательную температуру -10 °С. В зимний период температура раствора $+8$ °С. В летний период орошения штабеля с 15 апреля до 15 октября температура раствора близка к температуре воздуха.

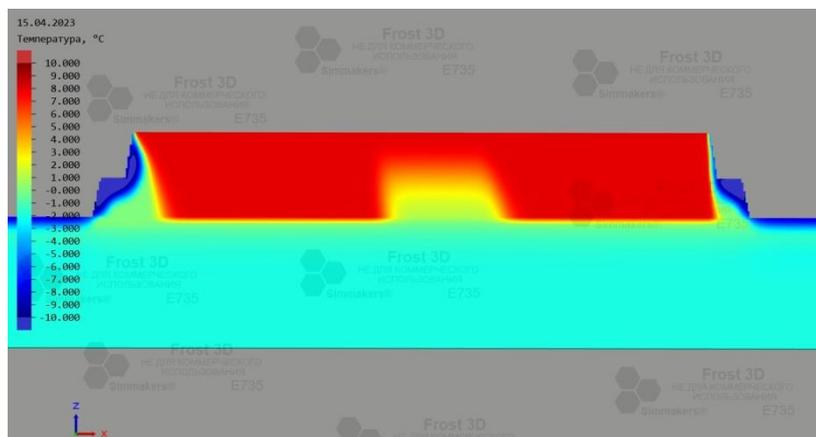


Рис. 2. Температурная диаграмма продольного среза штабеля на 15.04.2023 г при скорости фильтрации $v = 2.0$ м/сут при круглогодичном орошении, в зимний период температура раствора $+8$ °С

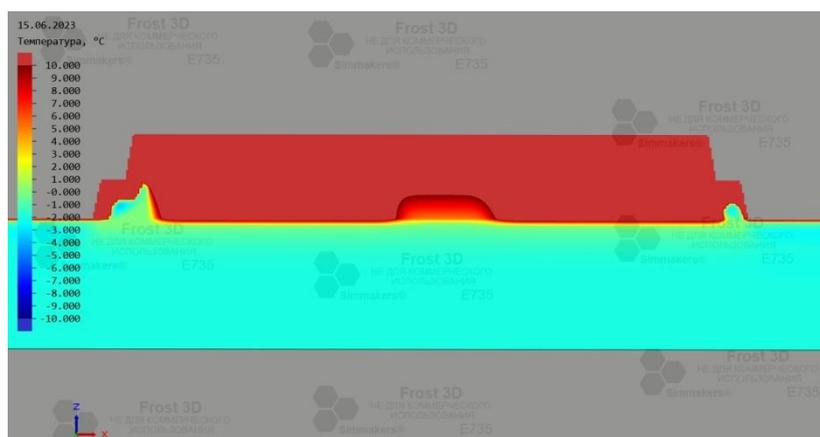


Рис. 3. Температурная диаграмма продольного среза штабеля на 15.06.2023 г при скорости фильтрации $v = 2.0$ м/сут при круглогодичном орошении, в зимний период температура раствора $+8$ °С

Как видно из температурных диаграмм продольного и поперечного срезов штабеля на различные даты (рис. 2–3), тело штабеля находится в устойчивой температуре выше $+6$ °С весь зимний период. Но в нижнем ярусе наблюдается переохладение пород штабеля под бермами. На рис. 2 можно видеть, что есть снос температурного поля вправо по оси X. Это объясняется условием расчёта, что вектор скорости по оси X и оси Y имеет небольшой уклон в сторону растворосборника, расположенного справа. На рис. 3 представлено температурное поле в теле штабеля на 01.06.2023 г. Из рис. 3 видно, что к началу лета в теле штабеля в нижнем ярусе сохраняются устойчивые зоны с пониженной температурой. Такие же устойчивые зоны переохлаждённых пород наблюдаются в теле штабеля и под технологическим съездом.

На рис. 4 представлен температурная диаграмма поперечного среза штабеля в районе технологического съезда на 15.06.2023 г. при скорости фильтрации $v = 2.0$ м/сут при круглогодичном орошении, в зимний период температура раствора $+3$ °С.

Как показывают расчёты, тело штабеля находится при устойчивой температуре выше $+2$ °С весь зимний период. Но в нижнем ярусе наблюдается переохладение пород штабеля

под бермами. В отличие от предыдущего варианта (раствор в зимний период $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается более значительное промерзание пород штабеля со стороны бортов. Как видно из рис. 4, к началу лета в теле штабеля в нижнем ярусе сохраняются устойчивые зоны с пониженной температурой, и они больше, чем для предыдущего варианта расчёта. Такие же устойчивые зоны переохлаждённых пород наблюдаются в теле штабеля и под технологическим съездом.

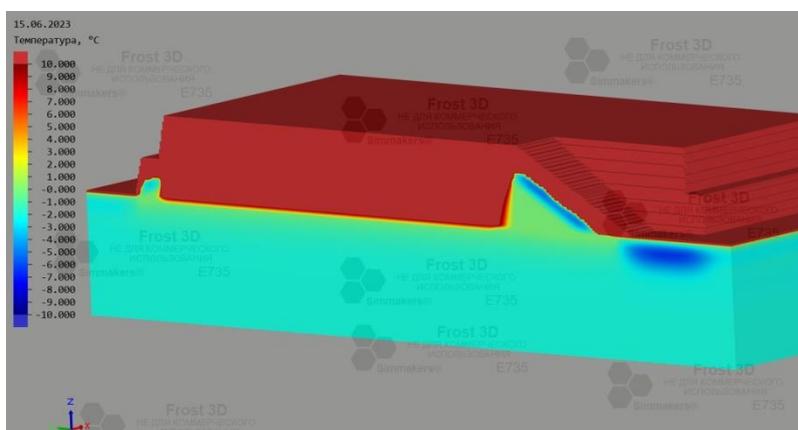


Рис. 4. Температурная диаграмма поперечного среза штабеля в районе технологического съезда на 15.06.2023 г при скорости фильтрации $v = 2.0\text{ м/сут}$ при круглогодичном орошении, в зимний период температура раствора $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-151-155

ОСОБЕННОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В КРИОЛИТОЗОНЕ

Калачева Л.П., Иванова И.К., Портнягин А.С., Иванов В.К.,
Бубнова А.Р., Аргунова К.К.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск

lpko@mail.ru

Рассмотрены факторы, влияющие на фильтрационно-емкостные свойства и устойчивость пород, деградацию мерзлоты при закачке диоксида углерода в водоносные пласты с целью его захоронения в гидратном состоянии. Методом дифференциального термического анализа определены равновесные условия гидратообразования CO_2 в модельных системах и определены границы зоны стабильности гидрата с учетом термического профиля геолого-разведочной площади № 41 «Уордахская».

Одним из факторов, влияющих на глобальное потепление климата, является повышение концентрации углекислого газа в атмосфере. Для захоронения углекислого газа в геологических формациях рассматриваются соленые водоносные горизонты, истощенные месторождения нефти и газа, соляные и угольные пласты. В осадочных бассейнах, расположенных в арктических регионах, в частности, на территории Республики Саха (Якутия), водоносные пласты характеризуются низкими температурами и высокими гидростатическими давлениями, которые способствуют образованию гидрата диоксида углерода при его закачке.

Диоксид углерода в природе может существовать в газообразном, жидком, сверхкритическом и растворенном состояниях. При закачке CO_2 в геологические формации на глубинах от 500 до 750 м при низких температурах CO_2 может перейти в жидкое, а по достижении 800 м и температуре, превышающей $31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, – в сверхкритическое состояние [1, 2]. Границу фазового перехода диоксида углерода из газообразного в жидкое состояние необходимо определять в каждом конкретном случае с учетом изменения пластовых температур и давлений, так

как фазовое состояние CO_2 влияет на равновесные условия и кинетические параметры гидратообразования.

В отличие от природного газа, диоксид углерода растворяется в воде и пластовых водах, изменяя их термодинамическое равновесие. Растворение углекислого газа в воде и в водах хлоридно-кальциевого типа приводит к уменьшению рН среды [3–6], а в растворах гидрокарбоната натрия, в зависимости от концентрации, рН среды может изменяться от кислой до слабощелочной [3]. Подкисление пластовых вод при закачке диоксида углерода в водоносные горизонты может привести к растворению минералов в породах, вызывая нарушение их устойчивости, или к выпадению осадков, изменяя их фильтрационно-емкостные свойства [7].

С другой стороны, при закачке углекислого газа в силикатные породы, содержащие значительные количества оксидов магния или кальция, при $\text{pH} > 9$ протекают реакции карбонатизации, в результате которых образуются такие минералы, как кальцит, магнезит и доломит [8, 9]. Таким образом, при фильтрации воды, насыщенной углекислым газом, через терригенные породы-коллекторы может происходить уменьшение объема порового пространства, что приведет к снижению проницаемости пород.

В криолитозоне соленые водоносные горизонты, подходящие для закачки диоксида углерода и его хранения в виде гидратов, находятся под толщей многолетнемерзлых пород (ММП), которые могут служить естественным экраном при эмиссии газа. В работе [10] была показана принципиальная возможность захоронения диоксида углерода в гидратной форме в Вилюйской синеклизе. Нижние границы зоны стабильности гидрата (ЗСГ) диоксида углерода могут достигать от 500 до 1600 м [10], на этих глубинах подмерзлотные водоносные горизонты могут охватывать отложения мела и юры, которые представлены в основном песчаниками, пористость которых изменяется от 26 до 35%, а проницаемость – $2 \div 7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Пластовые воды относятся к хлоридно-кальциевым (подгруппа натриевая) (минерализация до 100 г/л) и гидрокарбонатно-натриевым (минерализация до 20 г/л) типам [11].

В настоящей работе методом дифференциального термического анализа экспериментально определены равновесные условия гидратообразования диоксида углерода в системах: « CO_2 – песок – H_2O »; « CO_2 – песок – 0.25% мас. раствор NaHCO_3 »; « CO_2 – песок – 2% мас. раствор NaHCO_3 »; « CO_2 – песок – 3% мас. раствор NaCl »; « CO_2 – песок – 5% мас. раствор NaCl »; « CO_2 – песок – 10% мас. раствор NaCl ». В качестве пористой среды использован бидисперсный кварцевый песок с преобладанием частиц 0.5–0.1 мм (96%), пористость в плотном сложении – 37%. Концентрации растворов соответствуют минерализации пластовых вод подмерзлотных водоносных горизонтов Вилюйской синеклизы.

Для захоронения диоксида углерода в качестве перспективных были рассмотрены геологоразведочные площади в Вилюйской синеклизе: № 1 «Вилюйский тракт 23 км», № 2 «Вилюйский тракт 40 км», № 15 «Кенкеменская», № 22 «Намская», № 28 «п. Магарас», № 41 «Уордахская».

На рис. 1 для определения верхней и нижней границ ЗСГ экспериментально определенные точки равновесных условий гидратообразования в исследованных модельных системах сопоставлены по глубине и температуре с термическим профилем геологоразведочной площади № 41 «Уордахская» [89]. Точки пересечения этих кривых определяют границы ЗСГ и их положение в зависимости от концентрации растворов. Для определения фазового состояния диоксида углерода и процессов, протекающих при его закачке в пласт, с учетом термического градиента на рис. 1 нанесены кривая равновесия CO_2 (газ) \leftrightarrow CO_2 (жид) и нижняя граница ММП на данной площади.

Анализ диаграммы (рис. 1) показывает, что верхняя граница ЗСГ диоксида углерода на площади № 41 располагается в области ММП на глубине ~120 м (для пород, насыщенных пресной водой) и опускается с увеличением концентрации раствора, насыщающего пористую среду. Нижняя граница (для пород, насыщенных пресной водой) – на глубине ~1000 м и при повышении концентрации раствора хлорида натрия до 10% смещается вверх до ~650 м. Таким образом, ЗСГ диоксида углерода на площади № 41 охватывает как мерзлые, так и талые по-

роды, а также в пределах ЗСГ происходит фазовый переход CO_2 (газ) \leftrightarrow CO_2 (жидк.). Следовательно, гидратообразование диоксида углерода возможно из воды/льда и жидкого/газообразного CO_2 в зависимости от глубины.

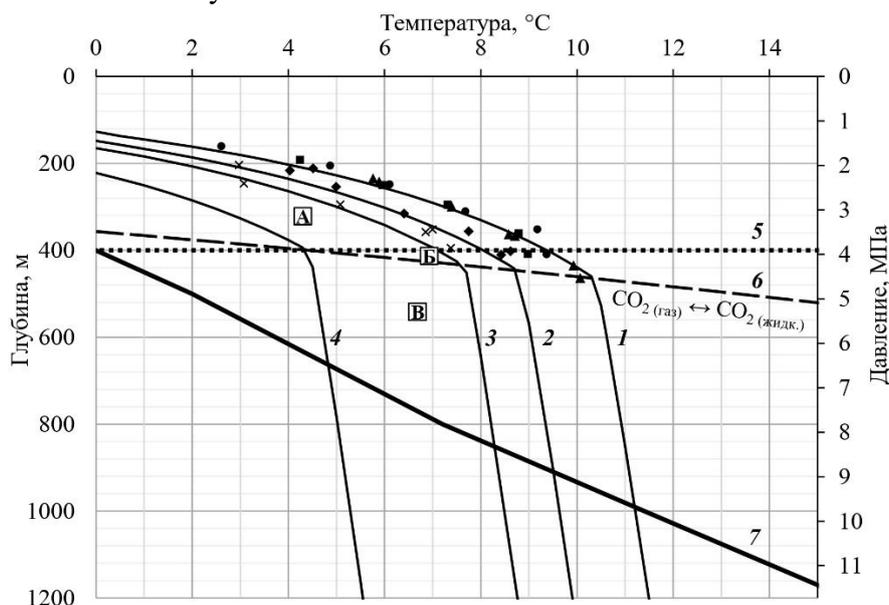


Рис. 1. Зона стабильности гидрата диоксида углерода на площади № 41 «Урдакская»
 Расчетные кривые гидратообразования: 1 – CO_2 + вода; 2 – CO_2 + 3% NaCl; 3 – CO_2 + 5% NaCl; 4 – CO_2 + 10% NaCl; линии: 5 – нижняя граница ММП; 6 – фазовое равновесие CO_2 (газ) – CO_2 (жидк.); 7 – термический профиль площади № 41 «Урдакская»; экспериментальные точки гидратообразования в системах: ▲ – CO_2 + песок + вода; ● – CO_2 + песок + 0.25% NaHCO_3 ; ■ – CO_2 + песок + 2% NaHCO_3 ; ◆ – CO_2 + песок + 3% NaCl; × – CO_2 + песок + 5% NaCl; зоны гидратообразования: А – CO_2 , газ – $\text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$ – CO_2 , гидрат; Б – CO_2 , газ – $\text{H}_2\text{O}_{\text{жид}}$ – CO_2 , гидрат; В – CO_2 , жид – $\text{H}_2\text{O}_{\text{жид}}$ – CO_2 , гидрат

В зоне ММП будет протекать образование гидрата углекислого газа из льда: $\text{CO}_{2,\text{газ}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{лед}} \leftrightarrow \text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. В талой зоне при низких давлениях гидрат углекислого газа образуется по схеме: $\text{CO}_{2,\text{газ}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{жид}} \leftrightarrow \text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в очень ограниченном пространстве в интервале температур $+5 \div +10.2$ °C и давлений $3.9 \div 4.5$ МПа. При возрастании давления плотность CO_2 увеличивается и на глубинах от 400 до 520 м происходит переход углекислого газа в жидкое состояние, а процесс гидратообразования описывается схемой: $\text{CO}_{2,\text{жид}} + \text{H}_2\text{O}_{\text{жид}} \leftrightarrow \text{CO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Область протекания данного процесса охватывает широкие интервалы температур (до $+11.2$ °C) и давлений (от 3.9 до ~ 11.5 МПа).

При гидратообразовании в мерзлой зоне необходимо учитывать влияние CO_2 на температуру таяния льда, от которого зависит устойчивость мерзлоты и положение границ залегания многолетнемерзлых пород [12]. При плавлении объем льда уменьшается (рис. 2, кривая 1) и, в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона, $\frac{dT}{dP} = -0.01057 \cdot 10^{-5}$ °C/Па [13]. Как было показано в работе [12], углекислый газ понижает температуру плавления льда (рис. 2, кривая 2), так в атмосфере углекислого газа $\frac{dT}{dP} = -0.1581 \cdot 10^{-5}$ °C/Па. То есть температура плавления льда в присутствии углекислого газа понижается практически в 15 раз, что может вызвать быструю деградацию ММП.

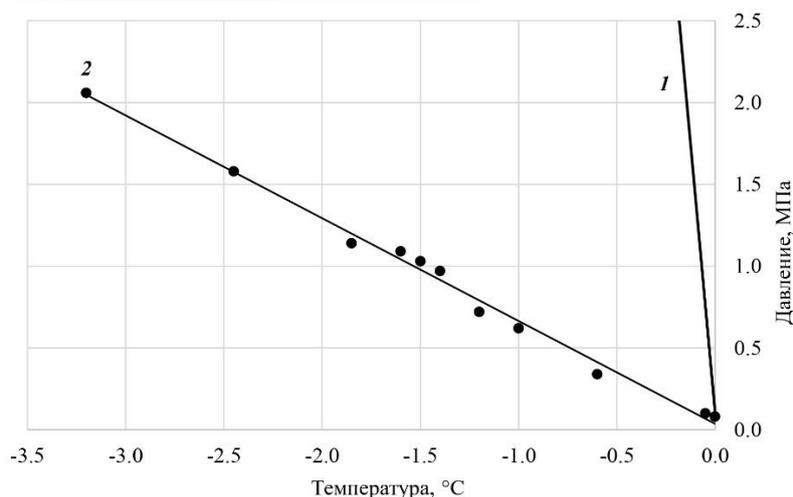


Рис. 2. Зависимость температуры плавления льда от давления: 1 – в атмосфере воздуха [13]; 2 – в атмосфере углекислого газа [12]

Таким образом, при захоронении диоксида углерода в геологических формациях в зонах распространения ММП необходимо учитывать исходные термобарические условия водоносных горизонтов, фильтрационно-емкостные свойства вмещающих пород, а также состав и минерализацию пластовых вод с целью исключения разрушения и карбонатизации пород.

На основании вышеприведенных данных, для закачки углекислого газа с целью его захоронения в гидратной форме, необходимо выбирать терригенные коллекторы с гидрокарбонатно-натриевым типом вод. Для предотвращения быстрой деградации мерзлоты под воздействием углекислого газа и теплоты, выделяемой в процессе гидратообразования, хранилища необходимо сооружать на достаточно большой глубине от нижней границы ММП.

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (Рег. № 122011100157-5) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. Borm G., Hawkins D., Lee A. Chapter 5: Underground geological storage // IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press. 2002. P. 195–276.
2. Benson S.M. Carbon dioxide capture and storage: Overview with an Emphasis on Geological Storage // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94, Issue 10. P. 795–1805.
3. Li X., Peng Ch., Crawshaw J.P., Maitland G.C., Trusler J.P.M. The pH of CO₂-saturated aqueous NaCl and NaHCO₃ solutions at temperatures between 308 K and 373 K at pressures up to 15 MPa // Fluid Phase Equilibria. 2018. Vol. 458. P. 253–263.
4. Carlson H.A. The pH of water from gas-condensate well saturated with carbon dioxide at various pressures // Petr. Eng. 1946. Vol. 18, No. 2. P. 160–164.
5. Справочник химика: в 7 т. / гл. ред. Б.П. Никольский. – 2-е изд., перераб. и дополн. М., Л.: Химия, 1965. Т. 3: Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. 1008 с.
6. Kimuro H., Kusayanagi T., Yamaguchi F., Ohtsubo K., Morishita M. Basic experimental results of liquid CO₂ injection into the deep ocean // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1994. Vol. 9, No. 4. P. 732–735.
7. Anabaraonye B.U., Crawshaw J.P., Trusler J.P.M. Brine chemistry effects in calcite dissolution kinetics at reservoir conditions // Chemical Geology. 2019. Vol. 509. P. 92–102.
8. Lackner K.S., Wendt C.S., Butt D.P., Sharp D.H., Joyce E.L. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals // Energy. 1995. Vol. 20, No. 11. P. 1153–1170.
9. Попов С.Н. Проявление механико-химических эффектов при экспериментальных исследованиях изменения упругих и фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов

под воздействием фильтрации воды, насыщенной углекислым газом // Актуальные проблемы нефти и газа. 2021. Вып. 2(33). С. 3–14.

10. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Соколова Л.С., Семенов В.П. Зоны стабильности гидратов метана и диоксида углерода в осадочном чехле Вилуйской синеклизы // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII, № 6. С. 19–26.

11. Kalacheva L.P. Ivanova I.K., Portnyagin A.S., Rozhin I.I., Argunova K.K., Nikolaev A.I. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters // SOCAR Proc., Special. 2021. № 2. P. 1–11.

12. Мельников В.П., Нестеров А.Н., Поденко Л.С., Решетников А.М. Влияние диоксида углерода на плавление подземного льда // Доклады академии наук. 2014. Т. 459, № 3. С. 337–339.

13. Hodgman C.D. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 44th Ed. Cleveland: Chemical Rubber Co, 1961. 2850 p.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-155-158

ТЕПЛОТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВОДЫ КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Кузьмин Г.П., Куваев В.А.

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск

eametlaeva@mpi.ysn.ru

Отмечается, что в условиях криолитозоны существует возможность эффективного использования криоэнергетических ресурсов, в том числе теплоты кристаллизации воды. Излагаются технология отопления некоторых видов производственных, спортивных и других помещений теплотой кристаллизации воды. Приведены основные результаты испытания технологии для отопления опытного гаража. Представлено описание круглогодично действующего охлаждающего устройства в диапазоне положительных температур и способа снижения воздействия морозного пучения грунтов на свайные фундаменты и опоры сооружений, в которых также используется теплота кристаллизации воды.

Введение. В период современного интенсивного освоения северных территорий уделяется повышенное внимание ученых и практиков проблеме использования криогенных ресурсов. Различные аспекты проблемы изучают во многих научно-исследовательских учреждениях.

В условиях криолитозоны существует необходимость и возможность эффективного использования энергии возобновляемых природных источников. Сезонные переходы положительных и отрицательных температур атмосферного воздуха обуславливают необходимость охлаждения и нагревания природно-технических систем. В Институте мерзлотоведения (ИМЗ) СО РАН были разработаны и испытаны аккумуляторные охлаждающие устройства и технологии [1–4]. Система охлаждения подземных сооружений в криолитозоне [4] в течение 12 лет успешно функционирует в Федеральном хранилище семян растений в г. Якутске. В данной работе излагаются разработки по использованию теплоты кристаллизации воды: технология отопления помещений [5], устройство и работа круглогодично действующего охладителя в диапазоне положительных температур [6] и способ снижения воздействия морозного пучения грунтов на свайные фундаменты и опоры сооружений [7].

Технологии использования теплоты кристаллизации воды

Отопление помещений. Технология отопления помещений теплотой кристаллизации воды [5] включает этапы аккумулялирования энергии путем плавления льда в теплое время года и использования накопленной энергии при замерзании воды в холодное время года. При этом в помещении устанавливается высокая отрицательная температура, близкая к температуре

кристаллизации воды. Положительные температуры в помещении можно получить с помощью «теплового насоса». Этот вариант технологии отопления помещений теплотой кристаллизации воды в работе не рассматривается.

Металлические емкости с пресной водой, названные водяными аккумуляторами тепла (ВАТ), устанавливаются внутри или в подвальной части помещения. Суммарное количество воды в ВАТ V подразделяется на основное V_{oc} и вспомогательное $V_{вс}$.

В г. Якутске с 2018 г. проводятся опытно-промышленные испытания гаража площадью 108 м^2 , отапливаемого теплотой кристаллизации воды. На рисунке 1 представлены графики изменения зимних температур воздуха в помещении (а) и наружного воздуха (б). Как видно из графиков, температура в помещении при одинаковом V зависит от температуры наружного воздуха вследствие изменения $V_{вс}$, влияющего на площадь поверхности теплообмена на границе вода-лед. При $V=50 \text{ м}^3$ и средних значениях температуры наружного воздуха в зимнее время 2019–2020 гг. минус $20,7 \text{ }^\circ\text{C}$, 2020–2021 гг. – минус $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ и 2021–2022 гг. – минус $21,2 \text{ }^\circ\text{C}$ средние зимние температуры в помещении составили соответственно минус $1,9$; $3,6$ и $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Значения объема вспомогательной воды составили: $V_{вс} = V - V_{oc}$.

Для определения V_{oc} , $V_{вс}$ и параметров ВАТ разработана методика расчета, которая заключается в следующем. Объем воды V_{oc} определяется из условия равенства суммарных потерь тепла из помещения в окружающую среду в течение всего холодного периода года. Исходными данными являются данные климатических условий, заданная средняя зимняя температура в помещении, параметры и термическое сопротивление ограждающих конструкций. Объем воды $V_{вс}$ рассчитывается по эмпирической зависимости, полученной обработкой результатов многолетних испытаний опытного помещения.

На рисунке 1 представлены графики изменения температуры в опытном гараже t_2 и температуры наружного воздуха t_1 при испытаниях в 2019–2022 гг в г. Якутске.

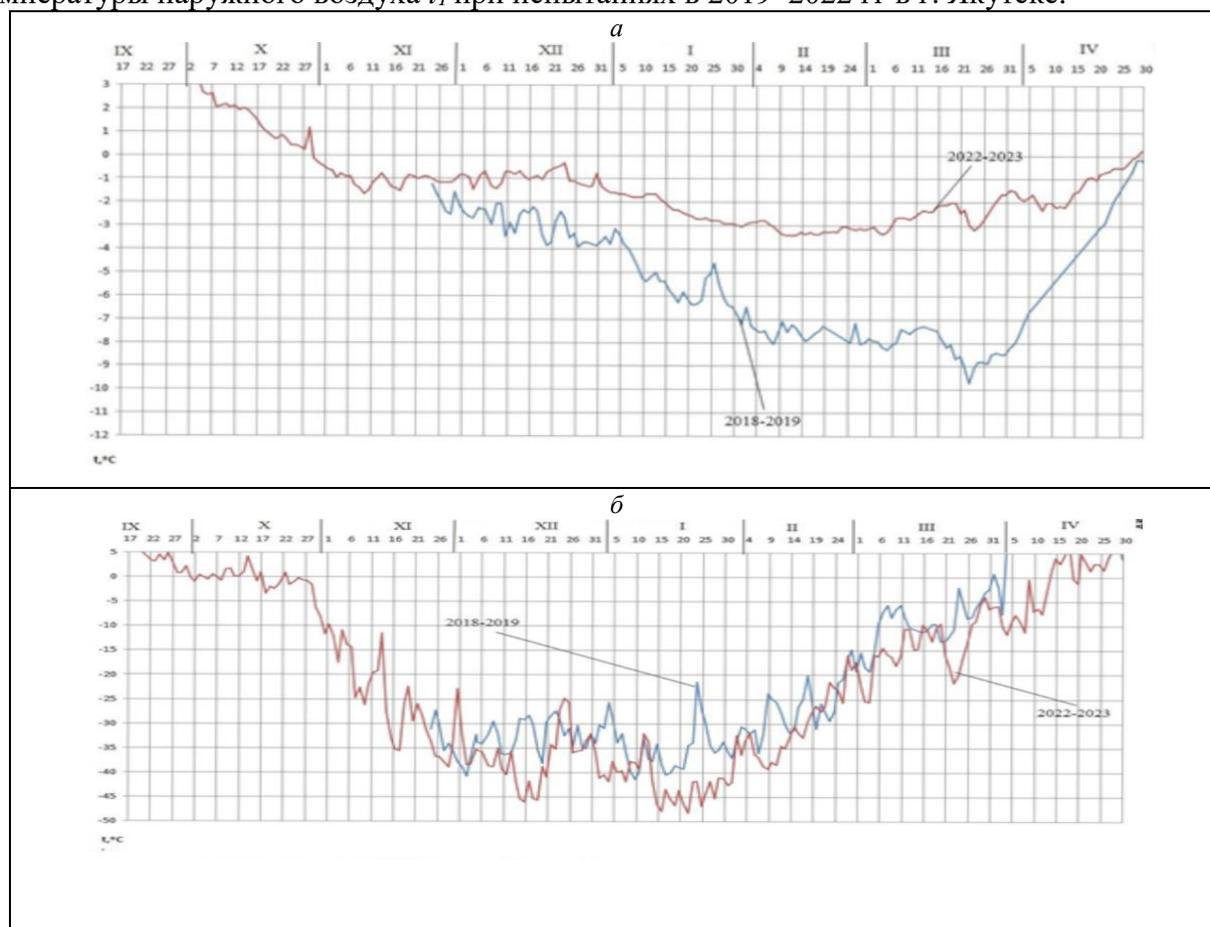


Рис. 1. Графики температур воздуха внутри (а) и снаружи (б) опытного гаража в г. Якутске при $V \sim 50 \text{ м}^3$:
 1 – 2019–2020 гг: $t_1 = -20,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = -1,9 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – 2020–2021 гг: $t_1 = -23,8 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_2 = -3,6 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – 2021–2022 гг:
 $t_1 = -21,2 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = -2,6 \text{ }^\circ\text{C}$

Как видно из рисунка, температура в помещении, обогреваемого теплотой кристаллизации воды, значительно выше температуры наружного воздуха и изменяется в соответствии с ее колебаниями. Результаты пятилетних опытно-промышленных испытаний опытного объекта подтвердили возможность отопления ряда видов производственных, спортивных и вспомогательных помещений, в которых высокие отрицательные температуры являются оптимальными или допустимыми.

Круглогодичное охлаждающее устройство. Устройство предназначено для охлаждения продукции пищевой отрасли до низких положительных температур в течение всего года (рисунок 2).

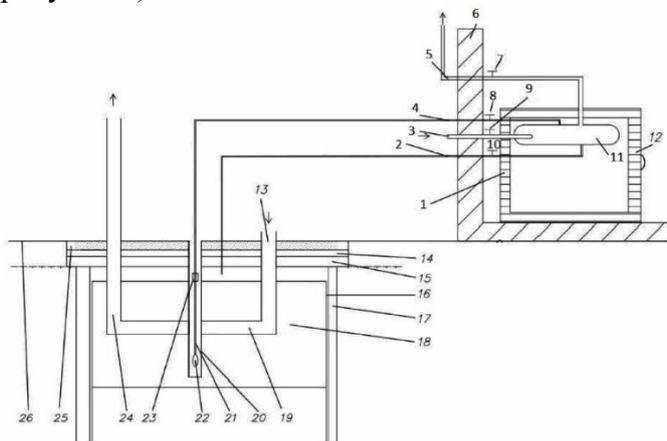


Рис. 2. Круглогодичное охлаждающее устройство на основе использования холодного наружного воздуха

В зимнее время через теплообменник, смонтированный в холодильной камере, пропускается холодный воздух с помощью конвективной установки. В летнее время включается водяная циркуляционная система. Холодная вода из подземного котлована со льдом, намораживаемым в зимнее время холодным воздухом с помощью также конвективной установкой. Нагретая в теплообменнике вода возвращается в котлован. Электрическая энергия расходуется только для работы насоса циркуляционной системы.

Испытания охлаждающего устройства еще не проведены. Однако, эффективность работы устройства в зимнее время не вызывает сомнения, а высокая эффективность работы его в летнее время доказана опытно-промышленными испытаниями подобного устройства [2].

Способ снижения воздействия морозного пучения на свайные фундаменты. В настоящее время развивается малоэтажное строительство с использованием легких строительных материалов. Малонагруженные сваи и опоры сооружений подвержены выталкивающему воздействию пучения грунтов при промерзании сезонно-промерзающего и сезоннооттаивающего слоев. В работе [8] предложен способ замедления процесса сезонного промерзания грунтов вокруг сваи нагреванием теплотой грунтов талой части основания. В результате этого уменьшаются касательные силы пучения и их воздействие на сваю. Передача теплоты из талой зоны в промерзающий слой осуществляется с помощью сезонно действующего охлаждающего устройства. Способ применим только в условиях сезонного промерзания, а теплопередающее устройство подвержено действию неравномерного пучения. В ИМЗ СО РАН разработан другой способ нагревания промерзающих грунтов как сезоннопромерзающего, так и сезоннооттаивающего слоя вокруг сваи и опор сооружений теплотой кристаллизации воды [7] (рисунок 3).

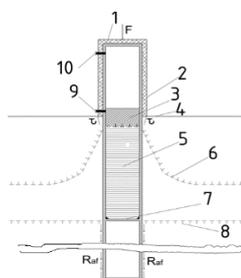


Рис. 3. Теплотехническое устройство для защиты свайных фундаментов от морозного пучения

Подземная часть сваи и опоры на всю глубину или в пределах промерзающего слоя выполняется из стальных труб с закрытым дном и заполняется водой. Теплота, выделяемая при кристаллизации воды, задерживает промерзание грунта около стенки сваи и тем самым уменьшает касательные силы пучения и их выталкивающее воздействие.

Заключение. Криоэнергетические ресурсы в криолитозоне могут найти широкое использование в различных целях. Установлена возможность разнообразного и эффективного использования теплоты кристаллизации воды с помощью простейших и надежных технологий, наносящих минимальные нарушения окружающей среды.

Литература

1. Кузьмин Г.П. Подземные сооружения в криолитозоне. – Новосибирск. Наука, 2002. – 176 с.
2. Патент на полезную модель. № 120111. Устройство для охлаждения вечномёрзлых грунтов. Бюл. № 25, опубликовано 10.09.2012 г. Соавторы Чжан Р.В., Яковлев А.В.
3. Патент 2517844 Российская Федерация, МПК F 25D A01J Устройство теплообмена жидкостей и газов. Кузьмин Г.П., Чжан Р.В., Яковлев А.В.; заявитель и патентообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). – № 2012129380, 11.07.2012; опубл. 10.06.2014; бюл. № 16
4. Патент № 2621912 Российская Федерация, МПК «Способ охлаждения подземных сооружений в массиве многолетнемерзлых горных пород и устройство для его осуществления». Кузьмин Г.П., Панин В.Н., заявитель и патентообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 08.06.2017 г.
5. Патент № 2617579 Российская Федерация, МПК «Устройство для поддержания околонулевой температуры в закрытых помещениях» Кузьмин Г.П., заявитель и патентообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 25.04.2017.
6. Патент 2785027 Российская Федерация, МПК «Круглогодичное охлаждающее устройство на основе использования холодного наружного воздуха». Кузьмин Г.П., Куваев В.А., заявитель и патентообладатель ФГБУ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 02.12.2022.
7. Патент 2817932 Российская Федерация, МПК «Способ снижения воздействия касательных сил морозного пучения на свайные фундаменты». Кузьмин Г.П., Набережный А.Д., заявитель и патентообладатель Учреждение РАН – Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Опубл. 23.04.24.
8. Патент 2320821 Российская федерация, МПК. «Способ замедления процесса сезонного промерзания». Остробородов С.В., Пустовойт Г.П., Хариевский О.Л. и др. Опубл. 24.03.2008.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-158-161

ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ПОЧВ ОТ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТАХ НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕКОЛЫМСКОЙ НЕФТЕБАЗЫ

Лифшиц С.Х., Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н., Зуева И.Н.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

lifsara@yandex.ru

Проведены натурные эксперименты по биоремедиации нефтезагрязненных почв на Нижнеколымской нефтебазе. Показано, что в условиях действующего техногенного объекта эффект от очистки может быть нивелирован вторичными загрязнениями. Согласно коэффициенту биодеградации большую эффективность проявил сухой биопрепарат, иммобилизованный на цеолит, в сравнении с жидкой фазой. Отмечена низкая активность биологических методов очистки в арктической зоне и необходимость разработки эффективных способов очистки.

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами (НП) стало в настоящее время одним из наиболее распространенных. Это касается и почв Арктического региона. Здесь нефтезагрязнение пока в основном сосредоточено на объектах нефтегазового комплекса (нефтебазы, автозаправки) и на причалах (берег, донные отложения), где ведется разгрузка НП. Однако высокая способность углеводородных поллютантов к миграции и очень низкие скорости их трансформации в арктических почвах ведут к вторичным загрязнениям окружающей среды, включая природные объекты [1]. Вследствие этого необходимо своевременное восстановление нефтезагрязненных почв. Для северных регионов после механического сбора, разлитых нефти или НП рекомендована биологическая очистка, как наиболее эффективная и экологичная.

Для изучения динамики процессов биоремедиации нефтезагрязненных почв в Арктической зоне были поставлены натурные эксперименты на территории Нижнеколымской нефтебазы. Были выделены четыре экспериментальных участка, которые были обработаны по следующей схеме: первый участок – жидким биопрепаратом [2]; второй – сухим (жидкий биопрепарат иммобилизован на сорбент-носитель, в данном случае природный цеолит) [2]; третий участок был засеян травосмесью толерантных к нефтезагрязнению растений; четвертый участок ничем не обрабатывался и служил контролем. Пробы почв отбирались в начале эксперимента, через 3, 7 и 16 дней после обработки. Затем обработка участков № 1 и № 2 биопрепаратами была повторена. И через два месяца (60 дней) – конец эксперимента, пробы почв вновь были отобраны на анализ. Уровень нефтезагрязнения определяли методом холодной хлороформенной экстракции по выходу хлороформенных экстрактов (ХЭ). Далее ХЭ изучали методами жидкостно-адсорбционной хроматографии и хромато-масс-спектрометрии.

Динамика изменения уровня загрязнения участков в ходе эксперимента представлена на рисунке 1. Видно, что уровень нефтезагрязнения в начале эксперимента очень сильно менялся. На участках № 3 и № 4 резко падал в первые три дня, а на участках № 1 и № 2 возрастал в первые 3 ÷ 7 суток. Такие резкие скачки повышения уровня нефтезагрязнения в столь короткое время могут быть вызваны повторным загрязнением участков. Работы проводились на действующей нефтебазе. По-видимому, где-то произошла утечка нефтепродуктов, которые вследствие рельефа местности достигли экспериментальных участков. Первыми получили повторное загрязнение участки № 3 и № 4, затем № 1 и, наконец, № 2. Уровень нефтезагрязнения на участках № 3 и № 4 за три дня уменьшился практически вдвое. Это может быть связано с испарением легких фракций углеводородов, а также с их дальнейшей миграцией.

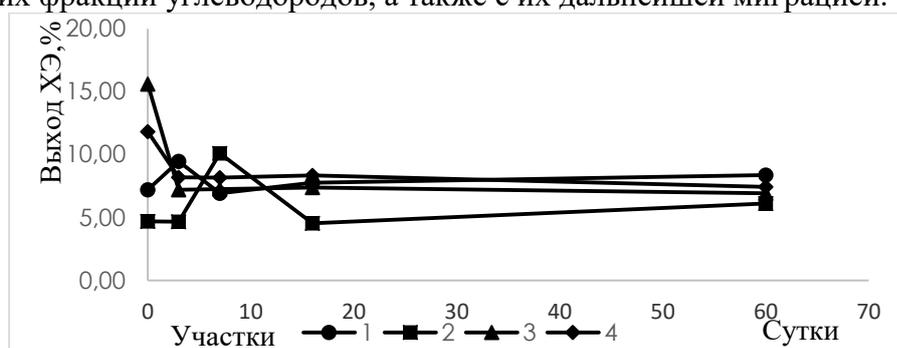


Рис. 1. Динамика изменения уровня нефтезагрязнения участков в ходе эксперимента

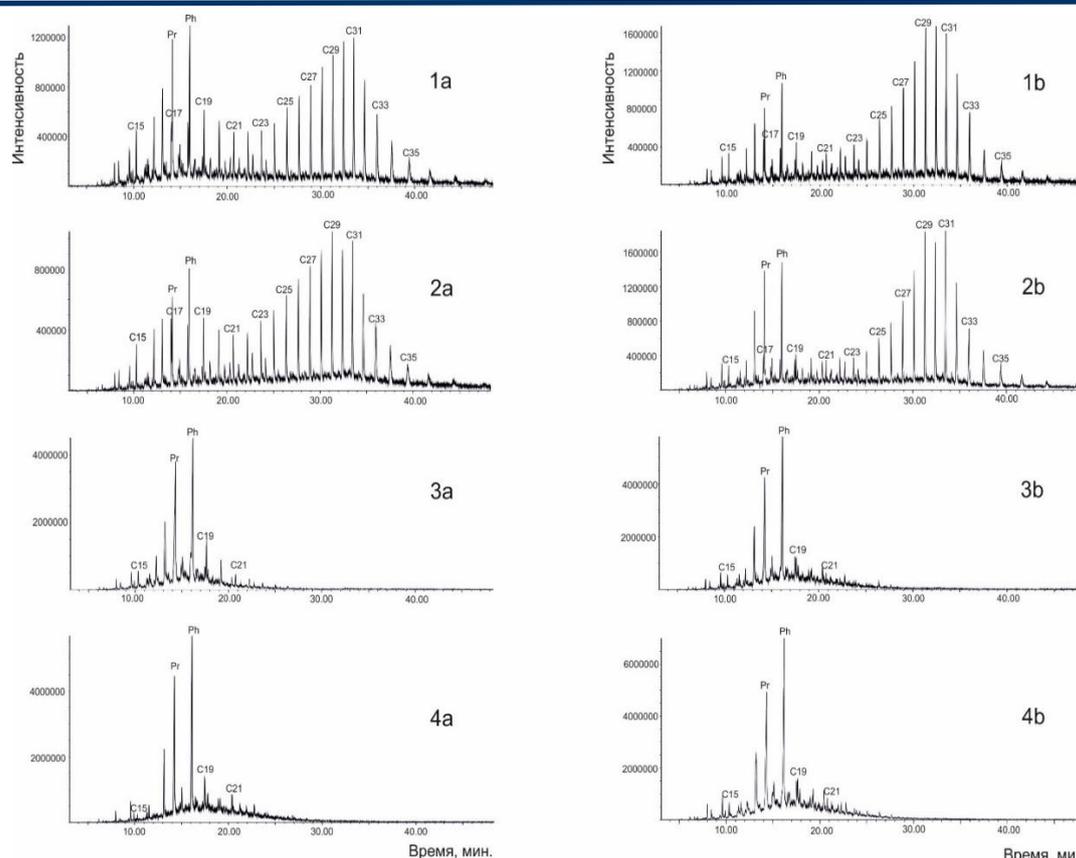


Рис. 2. Масс-хроматограммы углеводородных фракций ХЭ. 1 ÷ 4, номера участков; а – до обработки, б – после обработки

Результаты хроматомасс-спектрометрии показали (рис. 2, с и d), что эти участки вероятно были загрязнены дизельным топливом, легкие фракции которого достаточно быстро испарились.

Совершенно другую картину загрязнения мы видим на участках № 1 и № 2 (рис. 2, а и б). Здесь загрязнение более легкими нефтепродуктами (дизельное топливо) наложилось на загрязнение тяжелыми фракциями нефти, то есть имеет место быть смешанное загрязнение.

В таблице представлен групповой состав ХЭ, согласно которому на протяжении всего эксперимента загрязнение носило четко выраженный углеводородный характер (высокая доля углеводородов: 73,1 ÷ 82,7%). При этом состав ХЭ был практически одинаковый для каждого участка до и после эксперимента. Так как в процессах биodeградации содержание углеводородов всегда уменьшается, то, можно предположить, что либо процессы биodeградации вообще не протекали, либо их результат был нивелирован поступлением новых порций углеводородных поллютантов на экспериментальные участки.

Таблица 1. Результаты экспериментов по очистке почв от нефтезагрязнений ($p < 0,05$)

Уч.	Обработка	Экспоз. месяц	Выход ХЭ, %	Состав ХЭ, %					К _{биод.} %
				УВ	бенз.см	сп.бенз. см	∑ смол	асф-ны	
1	ж. б/пр.	0	7,20	74,4	6,5	17,2	23,7	1,9	1,7
		2	8,36	73,2	8,2	16,1	24,3	2,5	2,6
2	сух. б/пр.	0	4,69	74,4	5,1	14,8	19,9	3,0	2,1
		2	6,09	73,1	5,1	17,7	22,8	4,1	5,9
3	фиторем	0	15,61	80,5	3,4	11,2	14,6	4,9	8,4
		2	6,93	80,6	3,3	11,2	14,5	4,9	14,8
4	без обр.	0	11,82	82,1	1,4	11,5	12,9	5,0	1,2
		2	7,44	82,7	4,4	10,2	14,6	2,7	16,9

Условные обозначения: ж. б/пр. – жидкий биопрепарат; сух. б/пр. – сухой биопрепарат; фиторем. – фиторемедиация; без обр. – без обработки; УВ – углеводороды, бенз.см. – бензолные смолы; сп.бенз.см. – спиртобензолные смолы; асф-ны – асфальтены; К_{биод.} – коэффициент биodeградации

О протекании процессов биодegradации можно судить по изменению индивидуального состава углеводородных фракций ХЭ. В конце эксперимента на участках № 1 и 2 в индивидуальном составе углеводородов почти в два раза уменьшилось содержание относительно низкомолекулярных n-алканов (с 0,23 до 0,12 на первом участке и с 0,19 до 0,09 на втором). Эти углеводороды в первую очередь подвергаются процессам окислительной биодegradации под влиянием углеводородоокисляющих микроорганизмов. Особенно это касается nC_{17} и nC_{18} . Вследствие этого процессы биодegradации нефтезагрязнения часто оценивают по коэффициенту биодegradации, равному отношению суммы изопреноидов пристана и фитана к сумме нормальных n-алканов nC_{17} и nC_{18} [3]. Из данных, приведенных в таблице, видно, что коэффициент биодegradации при смешанном типе загрязнения больше вырос на участке № 2, который был обработан сухим биопрепаратом. То есть процессы биодegradации протекали на обоих участках, но активность биопрепарата, иммобилизованного на цеолит, оказалась выше, чем у жидкого. Это может быть связано с тем, что цеолит разрыхляет почву, улучшает ее водно-воздушный режим. Однако уровень нефтезагрязнения на этих участках к концу эксперимента не только не уменьшился, но еще и вырос. То есть во время эксперимента экспериментальные участки подвергались вторичному загрязнению поллютантами с других территорий.

На участках № 3 и № 4 процессы биодegradации, по-видимому, протекали близким образом. На обоих участках высокие коэффициенты биодegradации. Однако уровень нефтезагрязнения в конце эксперимента приблизительно тот же, что и через 3 дня после его начала (рис. 1). Доля углеводородных фракций в составе ХЭ этих образцов не только не уменьшилась в ходе эксперимента, что характерно для процессов биодegradации, а даже чуть возросла (табл. 1). То есть, можно предположить, что на фоне протекания процессов биодegradации на эти участки также поступали новые порции углеводородных поллютантов. Высевание растений не оказало дополнительного положительного влияния на эффективность очистки. Возможно, примененная травосмесь оказалась плохо адаптированной к климатическим условиям арктической среды. То есть во всех случаях эффект очистки был нивелирован вторичным поступлением углеводородных поллютантов. Столь низкие скорости биологической очистки, возможно, связаны с климатическими условиями региона. Любое вмешательство в экосистему арктических почв может быть чревато не только положительными, но и отрицательными эффектами [4]. Известно, что даже внесение удобрений может нарушить хрупкий северный почвенный биоценоз. Вследствие этого некоторые исследователи полагают, что биоремедиацию почв лучше всего проводить методом активации собственной почвенной углеводородоокисляющей микрофлоры [4].

Таким образом, биологические способы очистки почв от нефтезагрязнений, применяемые в регионах с более мягким климатом, мало эффективны в зоне Арктики. Кроме того, проведение восстановительных мероприятий на территориях действующих техногенных объектов, сталкивается с дополнительной трудностью – повторными загрязнениями участков вследствие свежих разливов, что нивелирует результативность обработки и затрудняет оценку ее эффективности. Необходимо своевременно собирать пролитые нефтепродукты и разрабатывать эффективные способы очистки арктических почв от нефтезагрязнений.

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.

Литература

1. Lifshits S., Glyaznetsova Yu., Erofeevskaya L., Chalaya O., Zueva I. Effect of oil pollution on the ecological condition of soils and bottom sediments of the arctic region (Yakutia) // Environmental Pollution. 2021. V. 288. P. 117680. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117680> ГОСТ 17.4.4.02-2017
2. Ерофеевская Л.А., Глязнецова Ю.С., Зуева И.Н., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х. Биоремедиация нефтезагрязненных почв в климатических условиях Крайнего Севера. Новосибирск: СО РАН, 2022. 132 с.
3. Оборин А. А., Хмурчик В. Т, Иларионов С. А., Маркарова М. Ю., Назаров А. В. Нефтезагрязненные биоценозы. Пермь: УрО РАН; Перм. гос. ун-т; Перм. гос. техн. ун-т, 2008. 511 с.
4. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПЛОСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЫЛЬНОЙ СТОРОНЫ ДВУХСТОРОННИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

Местников Н.П.^{1,2,3}, Васильев П.Ф.², Корякин А.К.⁴, Реев В.Г.^{1,2}

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

³ Якутский институт водного транспорта, Якутск

⁴ Арктический государственный агротехнологический университет, Якутск

sakhacase@bk.ru

Статья посвящена изучению возможности применения плоских отражателей солнечного излучения для двухсторонних фотоэлектрических панелей солнечных электростанций на территории Северо-Восточной части России. Установлено, что после применения данных отражателей выработка электроэнергии увеличилась на 10...17% в при безоблачной погоде и на 4...6% при облачной погоде. Зафиксировано, что при ветреной погоде повышается риск поломки конструкции плоского отражателя и его светотражающего материала. В последующих исследованиях планируется добавить элементы для усиления конструкции отражателя.

Фотоэлектрические станции (далее – ФЭС) – это совокупность фотоэлектрического, электротехнического и силового оборудования, преобразующий энергию солнечного излучения в электрическую энергию с возможностью передачи постоянного или переменного тока. Данные объекты на территории Северо-Восточной части России, как правило, применяются при комбинировании с дизельными электростанциями (далее – ДЭС) в технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах (далее – ТИТЭС) в целях снижения объемов потребления дорогостоящего дизельного топлива и выбросов CO₂ в окружающую среду [1–2].

На сегодняшний день на территории Республики Саха (Якутия) (далее – РС(Я)) эксплуатируются 27 ФЭС с суммарной установленной мощностью более 3 МВт. ФЭС в РС(Я) применяются в ТИТЭС, которые размещены, как правило в северной части Якутии, где отсутствует технологическое присоединение к сетям Единой энергетической системы России (далее – ЕЭС России) [3–4].

Вследствие применения данных объектов среднегодовое снижение потребления дизельного топлива составило около 500 тн., которая в денежном эквиваленте составляет более 75 млн рублей. По причине значительной экономии топлива среднестатистический срок окупаемости ФЭС в условиях РС(Я) составляет от 10 до 14 лет [5–6].

В целях увеличения производительности ФЭС рекомендуется применение не односторонних фотоэлектрических панелей (далее – ФЭП), а двухсторонних. Сущность функционирования двухсторонних ФЭП заключается в использовании отраженной от поверхности Земли энергии солнечного излучения для тыльной стороны панелей. К примеру, КПД односторонних монокристаллических ФЭП составляет 14...16%, а двухсторонних – 20...21% [7–8]. Внешний вид и принцип работы двухсторонних ФЭП представлены на рис. 1.

Существует возможность применение различных прикладных способов повышения энергоэффективности двухсторонних ФЭП, одним из которых является применение плоских отражателей энергии солнечного излучения (далее – ПО). Данные отражатели можно применить для передней, так и тыльной стороны ФЭП. Сущность данного способа заключается в увеличении доли отраженной энергии солнечного излучения путем применения специальных светоотражающих материалов в ПО. Данные отражатели можно использовать в течение летне-осеннего периода, а в зимний период возможно применение естественных отражателей светового излучения – конструкции из льда и снегового покрова. На рис. 2 представлена схема ПО для выполнения исследований.

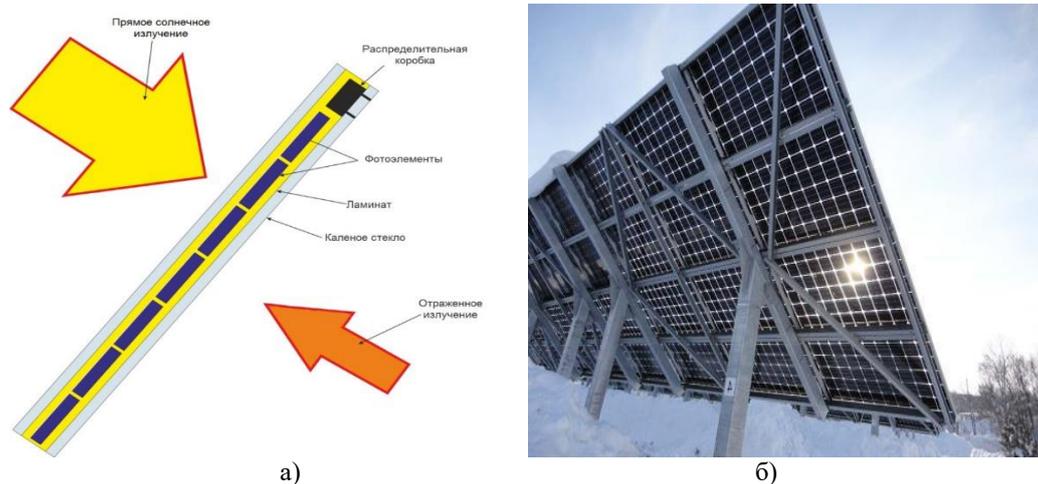


Рис. 1. Принцип работы и внешний вид двухсторонней фотоэлектрической панели:
а) принцип работы; б) внешний вид

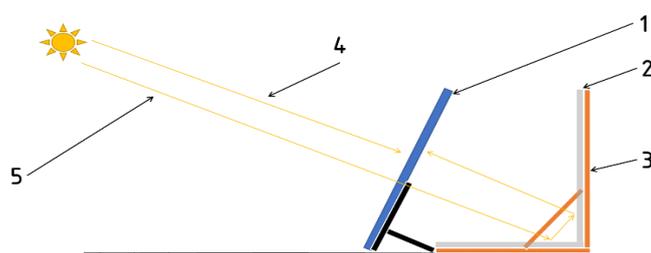


Рис. 2. Конструкция плоского отражателя для двухсторонней фотоэлектрической панели, где:
1 – фотоэлектрическая панель; 2 – светоотражающий материал; 3 – конструкция плоского отражателя;
4 – солнечное излучение; 5 – отраженное солнечное излучение

В течение летнего периода 2024 года проведены натурные исследования для идентификации эффекта применения ПО для двухсторонних ФЭП относительно ее тыльной стороны в центральной части Якутии.



Рис. 3. Натурные исследования с плоским отражателем

На рис. 3 представлены фотоматериалы процедуры замера электроэнергетических параметров работы двухсторонних ФЭП с ПО. Эффект применения отражателей определялся путем сопоставления параметров работы до и после применения ПО на двух панелях.

По итогам натурных исследований получены следующие результаты:

1. Выработка электроэнергии от двухсторонней ФЭП увеличилась на 10...17% в при безоблачной погоде после применения ПО.

2. Выработка электроэнергии от двухсторонней ФЭП увеличилась на 4...6% в при облачной погоде после применения ПО.
3. При ветреной погоде повышается риск поломки конструкции плоского отражателя и его светотражающего материала. В связи с этим рекомендуется усилить конструкцию ПО и механизм крепления светотражающего материала.

Литература

1. Оценка функционирования солнечных электростанций в климатических условиях Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, Н. С. Бурянина [и др.] // Грозненский естественно-научный бюллетень. – 2022. – Т. 7, № 2(28). – С. 101–110. – DOI 10.25744/genb.2022.37.74.011.
2. Местников, Н. П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микро-мощности в условиях Севера / Н. П. Местников. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. – 155 с. – ISBN 978-5-7513-3359-1.
3. Местников, Н. П. Разработка способа защиты поверхности солнечной панели от снежного покрова в условиях Севера / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, И. И. Куркина // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 1. – С. 46–55. – DOI 10.34286/1995-4646-2022-82-1-46-55.
4. Mestnikov, N. Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of Far east of Russia / N. Mestnikov, F. A. Hassan, A. Alzakkar // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 114–118. – DOI 10.1109/ICI-EAM51226.2021.9446439.
5. Местников, Н. П. Исследование влияния резко-континентального климата Якутии на функционирование монокристаллических панелей / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики : Тезисы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д. т. н., профессора Э. А. Бондарева, Якутск, 12–17 июля 2021 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2021. – С. 164–166.
6. Королюк, Ю. Ф. Децентрализованная система электроснабжения малочисленных населенных пунктов Якутии с использованием гибридных станций с солнечными панелями и суперконденсаторами / Ю. Ф. Королюк, Н. П. Местников // Проблемы и перспективы освоения Арктической зоны Северо-Востока России: Материалы Международной научно-практической конференции, Анадырь, 05–06 апреля 2018 года / Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова. – Анадырь: ООО «Буки Веди», 2018. – С. 138–139.
7. Местников, Н. П. Исследование влияния резко континентального климата Якутии на функционирование монокристаллических панелей / Н. П. Местников, П. Ф. Васильев, А. М. Н. Альзаккар // Наука и образование: актуальные вопросы теории и практики: материалы Международной научно-методической конференции, Оренбург, 23 марта 2021 года / Оренбургский институт путей сообщения. – Оренбург: Оренбургский институт путей сообщения – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения», 2021. – С. 261–265.
8. Местников, Н. П. Исследование влияния холодного климата Якутии на функционирование монокристаллической солнечной системы генерации электроэнергии / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 28–30 апреля 2021 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью Полиграфическая компания «Астор и Я», 2021. – С. 256–260. – EDN MYAEDR.

УСТАНОВЛЕНИЕ ВОДООХРАННЫХ ЗОН ДЛЯ РЕК, ПЕРЕСЕКАЕМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАССОЙ НА ТЕРРИТОРИИ РС(Я) (НА ПРИМЕРЕ Ж/Д ПУТИ «УЛАК-ЭЛЬГА»)

Ноговицын Д.Д., Сергеева Л.П., Шейна З.М., Пинигин Д.Д., Никулин К.В.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

dmitry-nogovitzyn@yandex.ru

Статья посвящена исследованию вопроса установления ширины водоохранной зоны для 21 малых рек и озер, пересекаемых или затрагиваемых трассой железнодорожного пути «Улак-Эльга» в Южной Якутии. Важным моментом является то, что трасса ж/д пути проходит в условиях сложного развития многолетнемерзлых пород, где любое техногенное вмешательство требует строго учета развитых здесь особых процессов.

Введение. Актуальность темы обусловлена тем, что развитие угледобывающего комплекса на территории Южной Якутии связано с реализацией крупных инфраструктурных проектов, таких как Тихоокеанская железная дорога и ж/д путь «Улак-Эльга». В связи с этим необходимо уделять особое внимание экологическим аспектам строительства линейных объектов, учитывая крайнюю уязвимость природных компонентов региона. Немаловажным фактором здесь является то, что исследуемая территория это уникальный, слабоизученный природный комплекс.

Районом исследования принята правобережная часть бассейна р. Алгамы. В районе исследования проходит граница ООПТ «Восток», в непосредственной близости расположен заказник «Большое Токо». Район расположен в зоне сплошного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, что оказывает существенное влияние на водный и ледовый режим исследуемой территории.

Водоохранным зонам водных объектов на Крайнем Севере посвящено очень мало работ. Непосредственно на малых водотоках, где в значительной мере сосредоточены промышленные предприятия, гидрологические исследования ранее не проводились. Материалы по малым рекам в основном носят общий характер, в связи с чем эта тема изучена недостаточно.

Цель – научное обоснование создания водоохранных зон, как наиболее важных мер охраны природы для водотоков, пересекаемых или затрагиваемых ж/д пути «Улак-Эльга» к Эльгинскому месторождению каменных углей, поскольку исследование и сохранение малых рек, как первичных звеньев гидрологических сетей, является первостепенной задачей в экологии водных систем.

Материалы и методы исследования. Базовыми материалами для исследования послужили «Требования законодательства в области охраны вод при проведении строительных и иных работ в водоохранных зонах, границах водных объектов» (ст. 65 Водного кодекса Российской Федерации) [1], а также материалы наблюдений на сети станций и постов Росгидромета, сведения полевых экспедиционных работ, а также научные литературные источники.

Охрана водных ресурсов с учетом возможного негативного воздействия производственных процессов, а также в целях сохранения здоровья населения в долгосрочной перспективе, федеральным законодательством предусмотрено образование территорий с особым правовым режимом – водоохранные зоны. Такие территории примыкают к границе водного объекта, а ширина устанавливается в соответствии с Водным кодексом Российской Федерации, ст. 65.

Рассматриваемые водные объекты расположены в пойме р. Алгамы, относятся к категории малых водотоков сезонного типа, водотоки ежегодно промерзают до дна (рис. 1).

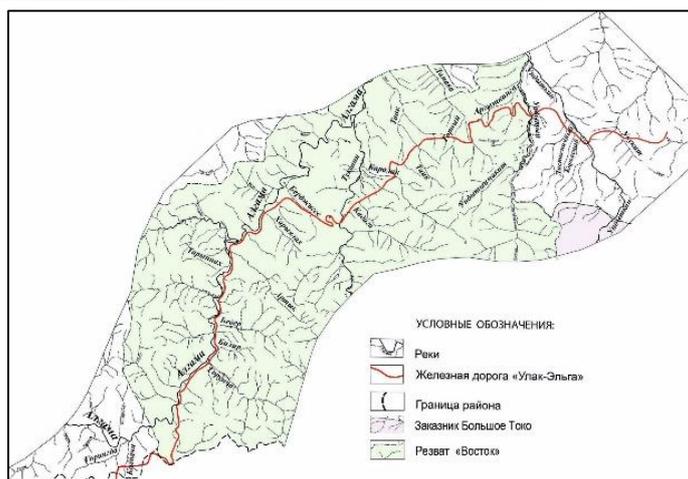


Рис. 1. Обзорная карта-схема района исследования

По соотношению гидрологических постов на 1 км² площади водосбора данная территория относится к недостаточно изученной: в среднем здесь на один пост приходится 5000 км². Для малых водотоков с периодическим режимом стока, район практически является неизученной территорией. Названия 21 водотоков, пересекаемых или затрагиваемых ж/д путем «Улак-Эльга» к Эльгинскому угольному месторождению на территории РС(Я) приведена в таблице № 1.

Таблица 1. Водотоки, пересекаемые или затрагиваемые ж/д путем «Улак-Эльга» на территории РС(Я)

№ п/п	Водный объект	№ п/п	Водный объект
1.	р. Алгама (приблжение трассы к реке)	13.	р. Кадага
2.	р. Горунча	14.	р. Каралак
3.	Приток р. Алгама Билир	15.	р. Таик
4.	р. Бедер	16.	р. Горный
5.	Приток р. Алгамы (без названия)	17.	р. Ламака
6.	р. Алгама (приближение к трассе, 209–220 км трассы)	18.	р. Ундытынмакит
7.	р. Артык	19.	р. Ундытын
8.	Приток р. Алгамы (217 км трассы)	20.	р. Лиственничный
9.	р. Харыялах	21.	р. Каркасный
10.	Приток р. Алгама (225 км трассы)	22.	р. Ундыткан
11.	р. Берджигес	23.	р. Укикит
12.	р. Туксани		

Река Алгама в месте, где железнодорожная трасса вплотную подступает к реке в период замеров имела ширину 50–60 м с глубинами 0,5–0,7 м. Дно русла и берега сложены крупными валунами. От меженного уреза воды до подошвы крутого склона расстояние более 400 м. Склоны горы и надпойменные террасы сплошь покрыты лесом преимущественно лиственницей (Рис.2).



Рис. 2. Река Алгама и ее правый берег. (30.07.2000 г) Фото Д.Д. Ноговицына

Река Горунча. Практически все русло реки протекает в пределах Станового хребта. Исток реки расположен в верховьях Станового хребта на водоразделе с рекой Улягир (приток реки Ток бассейна р. Амур) на отметках 1300–1400 м над уровнем моря. Протяженность реки 27 км, площадь водосбора 191 км². Трасса ж/д пути пересекает реку Горунча в устьевой части. Река протекает в глубокой долине, сплошь покрытой лесом, преимущественно лиственницей (Рис. 3).



Рис.3. Долина и русло реки Горунча в ее устьевой части. Фото Д.Д. Ноговицына

Горунча впадает в реку Алгама тремя рукавами. Ширина русла в составе трех рукавов 30 м. Ширина поймы колеблется в устье от 170 до 200 м. Глубина реки Горунча достигает 0,6–0,7 м. Дно русла и берега сложены крупными валунами. Ширина водоохранной зоны составляет 100 м. Водоохранная зона покрыта лиственничным лесом средней густоты.

Ручей Билир впадает в Алгаму с правого берега. Длина его 7,5 км, площадь водосбора 18,0 км². Расходы воды 50% обеспеченности составляют 0,23 м³/с. Ширина 7 м, глубина 0,3–0,4 м. Дно русла и берега сложены крупными валунами.

Ширина водоохранной зоны составляет 50 м. Береговая полоса в черте водоохранной зоны покрыта густым лесом лиственницей, тополем, березой.

Ручей Бедер. Трасса пересекает ручей Бедер на 199 км. Впадает в реку Алгама на 349 км от устья. Длина ручья 10 км, площадь водосбора 55,8 км². Ширина русла 18 м, глубина потока 0,5 м, скорость течения около 2,5 м/с. Ширина поймы 27–30 м. Дно русла и берега сложены валунами. Правый берег – отмель из крупных валунов, затем крутой склон коренного берега. Левый берег обрывистый высотой до 1,9–2,0 м.

Отметка поверхности поймы возвышается над меженным уровнем на 1,9–2,0 м. Ширина водоохранной зоны ручья Бедер составляет 100 м. Водоохранная зона с левого берега покрыта относительным негустым лесом – лиственницей, преимущественно горелой. На территории водоохранной зоны правого берега – густой лиственничный лес.

Ручей Без названия впадает в р. Алгама. Длина ручья всего 6 км, площадь водосбора 11,5 км². Водосбор ручья граничит с водосборами ручьев Бедер, Артык и небольшого ручья длиной около 3 км.

Средний годовой расход воды ручья Без названия составляет 0,15 м³/с. Устье ручья малозаметно.

В месте где трасса вплотную приближается к реке Алгама правый склон, по которой пройдет трасса крутой и покрыт редким лиственничным лесом. Ширина Алгамы в этом месте около 70 м, наибольшая глубина в период замеров (2 августа 2000 г.) не превышала 3,0–3,5 м. Ширина водоохранной зоны 200 м.

Ручей Артык впадает в р. Алгама. Длина водостока 18 км, площадь водосбора 47,9 км². Средний годовой расход воды составляет около 0,61 м³/с.

Ширина ручья 13 м, глубина 0,3 м, скорость течения 2,0–2,5 м/с. Отметка поверхности поймы возвышается над меженным уровнем на 1,35 м. Правый берег крутой покрыт густым лесом, левый берег более пологий и также покрыт густым лиственничным лесом. Ширина водоохранной зоны составляет 100 м.

Ручей Без названия находится по трассе и с правого берега впадает в Алгаму ниже сравнительно большого левого притока р. Чайдах. Длина ручья 6 км, площадь водосбора 10,0 км². Средний годовой сток около 0,13 м³/с. Долина вся покрыта густым лиственничным лесом, ширина водоохранной зоны составляет 50 м.

Ручей Харыйалах впадает в р. Алгاما с правого берега. Пересекает трассу. Длина ручья 10 км, площадь водосбора 26,6 км². Средний годовой сток составляет около 0,34 м³/с. Ширина русла 4,2 м, отметка поверхности поймы возвышается над меженным уровнем на 4 м. Скорость течения воды на момент замеров 3 августа 2000 г. была незначительной, 0,5 м/с. Глубина водного потока по ширине русла практически одинакова и меняется от 0,22 до 0,28 м, в среднем составляя 0,25 м.

Река Туксани пересекается трассой. Длина реки 90 км. Вся площадь водосбора р. Туксани 1590 км², в месте пересечения трассой 1390 км². Средний годовой сток примерно равен 18,4 м³/с (в месте пересечения с трассой).



Рис. 4. Река Туксани. Фото Д.Д. Ноговицына

Ширина реки на момент промеров составляла 55 м, наибольшая глубина 1,67 м, средняя – 0,93 м. Скорости течения колебались по ширине русла от 1 м/с до 2,2 м/с. Поверхность поймы возвышается над меженным уровнем воды на 2,4–2,5 м. Правый берег отвесная скала, левый берег пологий, выше сильно заросший кустарником и лесом. Дно русла и берега Туксани сложены крупной галькой и валунами (рис. 4).

На участке промеров уклон водной поверхности Туксани составил 5,6%. Ширина водоохранной зоны определена равной 200 м.

Заключение. Установленная ширина водоохранных зон для 21 водных объектов, пересекаемых или затрагиваемых железнодорожной трассой на территории Республики Саха (Якутия), в естественных условиях колеблется от 50 до 200 м в зависимости от протяженности водостока от его истока (табл. 2).

Таблица 2. Ширина водоохранных зон рек, пересекаемых или затрагиваемых ж/д путем «Улак–Эльга» на территории Республики Саха (Якутия)

№ п/п	Водный объект	Водоохранная зона (м)
1.	р. Алгاما (приближение трассы к реке)	200
2.	р. Горунча	100
3.	р. Билир	50
4.	р. Бедер	100
5.	Приток р. Алгамы (без названия)	50
6.	р. Алгاما (приближение к трассе, 209–220 км.трассы)	200
7.	р. Артык	100
8.	Приток р. Алгамы (217 км. трассы)	50
9.	р. Харыялах	50
10.	Приток р. Алгاما (225 км. трассы)	50
11.	р. Берджигес	50
12.	р. Туксани	200

13.	р. Кадага	50
14.	р. Каралак	100
15.	р. Таик	50
16.	р. Горный	50
17.	р. Ламака	50
18.	р. Ундытынмакит	100
19.	р. Ундытын	100
20.	р. Лиственничный	50
21.	р. Каркасный	50
22.	р. Ундыткан	100
23.	р. Укикит	100

Размеры водоохраных зон, приведенных в таблице № 2 в период дальнейших научно-исследовательских работ, могут измениться, так как реки практически не изучены (могут быть установлены участки водных объектов, имеющих особо ценное рыбохозяйственное значение (места нереста, зимовальные ямы, нагульные участки и др.).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FWRS-2024-0031.

Литература

1. «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения: 27.08.2024).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.04.2016 № 377, от 30.11.2019 № 1547 от 10 января 2009 г. № 17 г. Москва «Об утверждении Правил установления границ водоохраных зон и границ прибрежных защитных полос водных объектов».

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-169-171

ЭНЕРГЕТИКА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ): РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РАЗВИТИЯ

Павлов Н.В., Иванова А.Е., Старостина А.Е.

ИФТПС СО РАН, г. Якутск
pavlov_nv@iptpn.ysn.ru

Республика Саха (Якутия) обладает значительным энергетическим потенциалом, который многократно превышает её потребности. Развитие ТЭК региона осложнено суровым климатом и транспортной изолированностью, что требует уникальных решений для повышения энергоэффективности. Важным направлением является разработка и совершенствование подходов для устойчивого развития энергетики с учетом технологических тенденций.

Республика Саха (Якутия) – один из ключевых регионов Российской Федерации, обладающий значительным энергетическим потенциалом. Этот потенциал многократно превышает текущие и прогнозируемые потребности региона, что позволяет Якутии играть важную роль в формировании топливно-энергетического баланса (ТЭБ) не только на уровне Дальнего Востока и Восточной Сибири, но и России в целом. Для эффективного развития регионального топливно-энергетического комплекса (ТЭК) важно придерживаться системного подхода к анализу и обоснованию предлагаемых решений, рассматривая ТЭК как целостную систему взаимосвязанных предприятий и компаний, связанных между собой производством и потреблением энергоресурсов [1].

Топливо-энергетический комплекс Республики включает все ключевые отрасли, за исключением атомной энергетики. Это угольная, нефтяная, газовая промышленности, электро- и тепло-энергетика, а также системы снабжения потребителей. ТЭК является основой экономической и социальной стабильности региона, обеспечивая его потребности в энергетических ресурсах [2–6].

Энергетическая система северных регионов, в том числе Якутии, существенно отличается от аналогичных систем страны. Важнейшая задача энергетической политики на Севере – обеспечение надежного и бесперебойного снабжения энергоресурсами потребителей, а также поддержка социального и экономического развития посредством обеспечения энергией на перспективу потребителей региона. Одновременно необходимо учитывать экологические требования, ужесточая контроль за воздействием энергетики на окружающую среду и здоровье человека [7, 8].

Рассмотрим особенности отдельных аспектов, включенных в иерархию задач разработки стратегии развития энергетики северных регионов [7]. На основе многолетних исследований Петровым Н.А. обоснована схема формирования энергетической политики региона и ее реализации начиная с анализа специфических тенденций в развитии энергетики регионов Севера, с учетом их природно-климатических и социально-экономических особенностей, обоснования возможных сценариев их социально-экономического развития и заканчивая механизмом реализации энергетической стратегии, обеспечивающей условия такого развития. Схема постоянно актуализируется.

Развитие топливно-энергетического комплекса Якутии сопряжено с рядом проблем. Это низкий уровень освоения природных ресурсов, недостаточная транспортная инфраструктура, высокие тарифы на энергоносители и значительная зависимость от федерального бюджета. Усложняют ситуацию суровые климатические условия и географическая удаленность населенных пунктов. Все эти факторы требуют особого подхода к развитию энергоснабжения региона, где применение стандартных решений зачастую неэффективно.

Топливо-энергетический баланс Якутии также характеризуется разделением на зоны централизованного и децентрализованного энергоснабжения. В зоне централизованного энергоснабжения, которая занимает лишь 36% территории республики, проживает 85% населения. Зона децентрализованного электроснабжения охватывает оставшиеся 64% территории, на которых живет лишь 15% населения. Основной проблемой этих районов является сложная транспортная доступность, что увеличивает расходы на топливоснабжение и усложняет реализацию инфраструктурных проектов. Эксплуатация энергетического оборудования в условиях экстремального климата сопровождается значительными расходами на обслуживание электросетей, ускоренным износом оборудования и увеличением эксплуатационных затрат. В этих условиях обеспечение надежного теплоснабжения населения и промышленных объектов приобретает критическое социально-экономическое значение. Однако высокая степень территориальной рассредоточенности объектов теплоснабжения существенно ограничивает возможности для устойчивого и эффективного энергоснабжения. Технические проблемы, накопившиеся за годы, связаны с тем, что развитие теплоснабжающей инфраструктуры в регионе было ориентировано на применение упрощенных и экономически минимизированных решений. Особую уязвимость демонстрируют труднодоступные и энергетически изолированные районы, которые оказываются в неравных условиях по сравнению с территориями, обладающими более развитой инфраструктурой. В условиях сложной логистики и несовершенства экономических механизмов северного завоза для обеспечения энергетической безопасности и стабильного функционирования предприятий требуются значительно большие усилия и ресурсы [9–11].

Анализ существующих исследований, направленных на изучение систем энерго- и топливоснабжения северных регионов, демонстрирует необходимость дальнейшего развития методов комплексного анализа, учитывающих природно-климатические, социально-экономические и энергетические, экологические особенности этих территорий. Совершенствование моделей прогнозирования требует интеграции этих факторов, что особенно важно в контексте технологических тенденций и их влияния на разработку и реализацию региональной энергетической политики на Севере. Учитывая специфические условия жизни и труда, ресурсную базу и особенности социально-экономического развития северных регионов, необходимо дифференцированное применение подходов к их хозяйствованию и планированию энергетических процессов.

Заключение. Анализ топливно-энергетического комплекса Республики Саха (Якутия) выявил ключевые проблемы и особенности, которые необходимо учитывать при формировании стратегии развития региона. Эти факторы включают социально-экономические, природно-климатические и отраслевые аспекты, а также энергетические и экологические особенности. Этап с 2035 по 2050 годы предусматривает инновационное развитие энергетики, включая внедрение высокоэффективных технологий и переход к использованию новых источников энергии. Разработка научно обоснованной стратегии развития ТЭК республики, особенно в контексте перехода к новым энергетическим технологиям, остается актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWRS-2024-0031 программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

Литература

1. Мелентьев Л.А. Методология системных исследований в энергетике. 1983. 455 с.
2. 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
3. Zakharov V., Prokhorov D., Pavlov N. Russian arctic region energy balance (Republic of Sakha (Yakutia)). E3S Web of Conferences. V114. 2019. С. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/201911402005
4. Петров Н.А., Ефимов В.М., Алексеев Н.Н., Ситников В.С. Состояние и основные задачи инновационного развития нефтегазового комплекса Республики Саха (Якутия) // Наука и образование. 2012. № 1. С. 35–39.
5. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н., Петров Н.А., Павлов Н.В. Угольная промышленность Республики Саха (Якутия): существующее состояние и возможности развития // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 4 (44). С. 63–69.
6. Pavlov N., Petrov N. Coal industry of the republic of sakha (yakutia): tools and forecast. E3S Web of Conferences. V77. 2019. С. 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/20197703002
7. Петров Н.А. Научно-методические основы и практика формирования стратегий развития энергетики регионов Севера (на примере Якутии). автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Иркутск, 1996. 63 с.
8. Павлов Н.В., Пинигин Д.Д. Особенности освоения и техногенное воздействие Эльгинского угольного комплекса на природную среду // сборник ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ В XXI ВЕКЕ. Инновационное развитие и управление. 2015. С. 511–515.
9. Zakharov V.E., Ivanova A.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). 2020 international multi-conference on industrial engineering and modern technologies, fareastcon 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271489
10. Кузьмин А.Н., Михеева Е.Ю., Павлов Н.В. Перспективы развития малой теплофикации в Республике Саха (Якутия). Новосибирск. Изд. СО РАН. 101 с.
11. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Петров Н.А. Нетрадиционная энергетика в энергоснабжении изолированных потребителей регионов Севера // сборник Проблемы нетрадиционной энергетике. Материалы научной сессии Президиума Сибирского отделения РАН. Новосибирск, 2006. С. 55–70.

ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС ДОРОГ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ СУБАРКТИКИ

Пермяков П.П.^{1,2,3}, Варламов С.П.², Винокурова Т.А.², Попов Г.Г.¹

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск

³ Инженерно-технический институт СВФУ, Якутск

permyakov2005@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования тепловлажностного режима на термокарстовых участках автомобильных дорог. Использование сезонно охлаждающего устройства (навес) способствует замедлению процесса миграции незамерзшей воды, что обеспечивает сохранность и целостность конструкции земляного полотна.

Введение. Дороги служат необходимым звеном связи и доставки материалов для промышленного освоения северных территорий. Они относятся к протяженным линейным сооружениям, прокладываемый в криолитозоне вызывают существенные изменения мерзлотных условий грунтового основания. Это обусловлено нарушением теплообмена поверхности с атмосферой в результате удаления растительного покрова, изменения теплообмена поверхностных слоев и его влагообменных свойств, переформированием снежного отложения и изменением водостока поверхностных вод.

В основании земляного полотна при многолетнем циклическом промерзании-протаивании происходят различные мерзлотные процессы, которые вызывают деформации земляного полотна и поверхности на сопредельные территории. Основными видами деформаций являются пучение и осадки. В результате криогенных процессов появляются термокарстовые просадки на обочинах дороги и на прилегающих территориях, наледи на косогорах, сплывы и оползание откосов насыпей и выемок, заиливание водоотводов и нагорных канав в выемках и на косогорах.

В зависимости от назначения автомобильные дороги подразделяются на пять категорий с различной интенсивностью движения: I – более 14 тыс. автомашин в сутки, II – от 6 до 14 тыс., III – от 2 до 6 тыс., IV – от 0,2 до 2 тыс., V – до 0,2 тыс. Железные дороги – на четыре категории с разной грузонапряженностью перевозок: I – от 30 до 50 млн т км в год, II – от 15 до 30 млн, III – от 8 до 15 млн, IV – до 8 млн. Каждой категории дорог, соответствуют определенные технические требования.

В данной работе приводим 2 примера пучения и осадки дорог Якутии на сильнольдистых суглинистых грунтовых основаниях: федеральная автомобильная дорога Р-504 «Колыма» V категории и железная дорога Томмот – Нижний Бестях на северном участке развития пород ледового комплекса IV категории. В результате потепления климата в последние десятилетия на первом участке активизировался термокарст (рис. 1).



Рис. 1. Федеральная автомобильная дорога Р-504 «Колыма» возле села Чурапча

Чтобы обеспечить целостность и технические решения по обеспечению устойчивости инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах должны соблюдать критерии качества природно-технических геосистем. С этой целью рассматривается тепловлажностный режим грунтового основания железной дороги.

Постановка задачи. Используя методы численного моделирования, приводится один из способов сохранения целостности дорог при глобальном потеплении на ключевом участке.

Тепловлажностный режим грунта описывается следующей системой дифференциальных уравнений в декартовой системе координат [1]:

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - c_B V_x \frac{\partial T}{\partial x} - c_B V_y \frac{\partial T}{\partial y} + L \rho \frac{\partial W_L}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial W_B}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial W_B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial W_B}{\partial y} \right) - \frac{\partial k_\phi}{\partial y} - \frac{\partial W_L}{\partial \tau} \right), \quad (2)$$

Система уравнений (1) – (2) замыкается равновесной функцией количества незамерзшей воды:

$$W_B = W_{HB}(T, W) \quad (3)$$

Уравнение (1) описывает процесс промерзания-протаивания грунта с учетом переноса тепла влагой. Перемещение воды и льдовыведение учитывается выражением (2).

Математическая модель пучения основана на предположении, что расширение объема грунта происходит по высоте (по направлению к поверхности грунта) вследствие увеличения порового вещества за счет перехода воды в лед, т. е. без возможности бокового расширения, как это принимается в задаче о компрессионном уплотнении грунтов.

В разработанной математической модели двумерного разреза массива грунтов учитываются: изменения температур атмосферного воздуха, воздействия суммарной солнечной радиации и альbedo дневной поверхности, изменение коэффициента теплоотдачи от атмосферного воздуха в зависимости от скорости ветра, растительности, толщины и теплофизических свойств снежного покрова. Математическая модель с учетом реального процесса протаивания-промерзания грунтов состоит из двух нелинейных уравнений: теплопроводности и влагопереноса. Численная реализация указанной системы нелинейных уравнений осуществляется неявной разностной схемой с использованием итерации [1].

Численные исследования. Расчетная область железнодорожного полотна на участках сильнольдистых многолетнемерзлых грунтов представлена на рис. 2. Насыпь из скального грунта имеет следующие размеры: высота 7 м, ширина по верху 7 м и по подошве 30 м. В основании насыпи залегают многолетнемерзлые льдистые суглинки.

В результате численного эксперимента установлено: повышение температуры грунтов основания усиливает подвижность влажности; формирование мерзлой и зоны повышенной влажности за фронтом промерзания; накопление влажности на поверхности мерзлого грунта идет постепенно, зависит от температуры внешней среды и количества атмосферных осадков.

В связи с этим возрастает роль инженерных разработок, направленных на сохранение устойчивости инженерных сооружений, в том числе использование сезонно-охлаждающих установок (СОУ), широко применяемых в мировой практике [2–5]. СОУ аккумулируют холод и способствуют изменению тепловлажностного режима грунта.

Для управления тепловлажностным режимом полотна дороги применяются различные виды СОУ. Одним из них является деревянный дощатый навес на откосе насыпи (рис. 2).

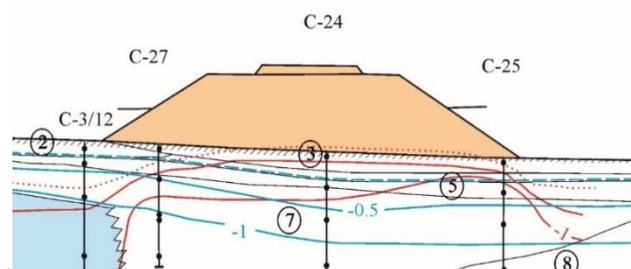


Рис. 2. Солнцезащитный и снегоудерживающий навес земляного полотна железной дороги [6]

На рисунке 3 показан процесс охлаждения грунта в зимнее время навесом (ноябрь, декабрь и январь). В зимнее время процесс промерзания идет интенсивно со всех сторон земляного полотна, замедляя миграцию поровой влаги. Охлаждения грунта навесом с двух сторон откоса описывается изотермой -6°C . Охлаждение тела земляного полотна способствует замедлению процесса миграции незамерзшей воды, обеспечивая сохранность мерзлоты и тем самым гарантируя целостность конструкции земляного полотна.

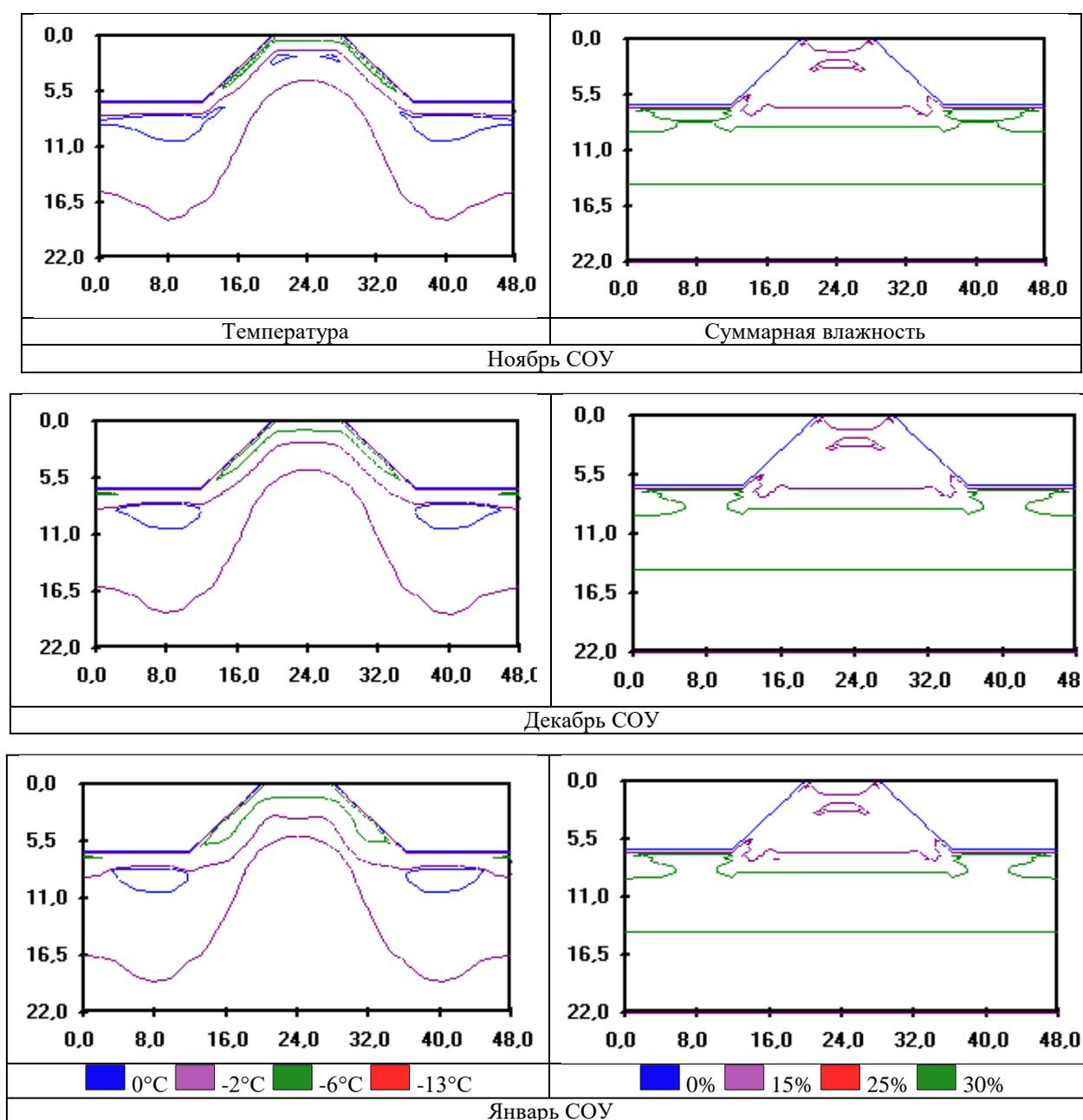


Рис. 3. Тепловлажностный режим полотна железной дороги с навесом в зимнее время

Заключение. Применение различных сезонно-охлаждающих устройств на ключевых участках дорог обеспечивает сохранность многолетней мерзлоты, что гарантирует устойчивость дорог. Требуется постоянное мониторинговое наблюдение за природно-техническим состоянием геосистемы и своевременно провести необходимые мероприятия по устранению причин негативных процессов.

Анализ данных и подготовка доклада осуществлены за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10032 «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем».

Литература

1. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: СО РАН, 2023. 163 с.
2. Chen R.J., Cheng G.D., Li S.X. Development and prospect of research on application artificial ground freezing // Chinese J. Geotechnical Engineering. 2000. Vol. 22 P. 40–44.
3. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Аникин Г.В., Стрижков С.Н., Власов В.Ф. Тепломассо-перенос в вертикальных охлаждающих трубах систем ВЕТ при работе на аммиаке // Материалы IX Международного симпозиума проблемы инженерного мерзлотоведения (3–7 сентября 2011, г. Мирный). Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011, С. 285–287.
4. Вельчев С., Окунев С., Рило И. Сохраняя вечное – строим будущее // Нефтегазовая Вертикаль. 2013. № 17. С. 36–39.
5. Пермяков П.П., Варламов С.П., Железняк М.Н. Воздействие вертикального сезонно охлаждающего устройства на тепловлажностный режим грунта // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 1. С. 66–72. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(66-72).
6. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: Изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН; 2021. 156 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-175-178

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Прохоров Д.В.¹, Прохоров В.А.², Кушнарёва К.И.²

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

² Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

[e-mail: prokhorovdv@gmail.com](mailto:prokhorovdv@gmail.com)

Проведен анализ отказов ветроэнергетических установок (ВЭУ) из открытых источников. Выделены причинно-следственные связи происходящих отказов в ВЭУ. На основе этого составлено дерево отказов ВЭУ. Это позволит визуально представить протекание негативных сценариев работы ВЭУ, а также выявить наиболее «узкие места» в работе ВЭУ.

Введение. Энергоснабжение автономных потребителей с использованием возобновляемых источников энергии, в частности энергии ветра, в Арктических районах РФ в некоторых случаях уже сейчас оказывается экономически более целесообразным, чем использование жидкого топлива. Это обусловлено рядом причин, среди которых слабая транспортная освоенность северных и арктических районов, сложная и многозвенная схема завоза топлива, ограниченность сроков сезонного завоза, и, как следствие, многократное удорожание стоимости электроэнергии. В связи с широким использованием ВЭУ в стране и, в частности, в децентрализованной зоне возникает вопрос надежности работы этих установок, выявления агрегатов и систем, где чаще всего происходят отказы в ВЭУ и развитием методов оценки и повышения надежности для этой сравнительно молодой отрасли промышленности.

Ветроэнергетика в Якутии. Первая экспериментальная ветроэнергетическая установка мощностью 250 кВт была смонтирована в Тикси в 2007 году. ВЭУ часто выводилась в ремонт и в 2015 году была разрушена сильным порывом ветра. Разрушение нижней секции башни ВЭУ произошло вследствие движения трещины в основном металле по периметру башни на расстоянии 5–350 мм от нижнего фланцевого соединения башни и фундамента (рисунок 1) [1]. Из-за отказов и неполадок в работе ВЭУ с 25.09.2007 по 19.03.2009 гг. станция не работала 251 день. Отказы и неполадки в работе ВЭУ за 2007–2013 описаны в следующей работе [2].



Рис. 1. Разрушенная ВЭУ TW-250 в п. Тикси [1]

В арктическом поселке Тикси в Якутии ПАО «РусГидро» ввело в эксплуатацию не имеющий аналогов в России ветродизельный комплекс мощностью 3,9 МВт. Ветродизельный комплекс состоит из ВЭУ в арктическом исполнении производителя Komaihaltex Inc. мощностью 900 кВт, дизельной электростанции мощностью 3 000 кВт и системы аккумулирования энергии мощностью 1000 кВт. Новая ВЭУ показала себя с хорошей стороны и продолжает работу по сегодняшнее время.

Отказы в оборудовании ВЭУ. Описание отказов приведено в следующих работах [3–8]. Ниже представлен анализ отказов ВЭУ по данным этих работ.

Структурные повреждения ветроэнергетических установок могут иметь несколько причин:

- некачественные материалы: использование материалов, не соответствующих требуемым стандартам, может ослабить конструкцию и увеличить вероятность ее обрушения;
- неправильный дизайн: если конструкция не рассчитана на то, чтобы выдерживать нагрузки, которым она будет подвергаться, она, скорее всего, выйдет из строя;
- вина персонала: дефицит квалифицированных кадров, либо привлечение к эксплуатации ВЭУ неквалифицированных кадров является одним из ключевых факторов аварийности ВЭУ;
- природные явления: стихийные бедствия, такие как землетрясения, наводнения и ураганы, могут серьезно повредить ВЭУ, либо даже привести к их разрушению. Молнии также являются одним из факторов, способных вызвать серьезные повреждения лопастей ВЭУ.

Для выявления причин возникновения отказов необходима наработанная большая база данных. Сбор статистических данных о сбоях во время эксплуатации ВЭУ затрудняется ограниченностью данных. Производители чаще всего запрещают опубликовывать данные об эксплуатации ВЭУ в открытых источниках.

В данной работе были собраны некоторые данные по отказам ВЭУ из открытых источников. В этой статье приводятся некоторые примеры описания отказов зарубежных исследователей [4, 6]. По этим данным составлены гистограммы отказов ВЭУ в Швеции (рисунок 2) [6] и в Германии (рисунок 3) [4].

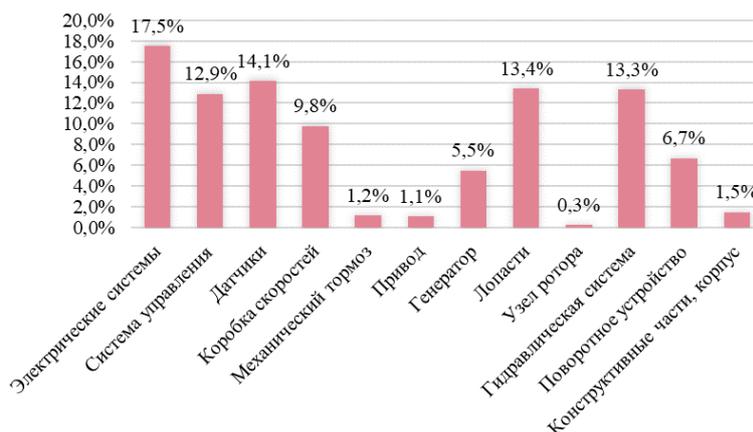


Рис. 2. Отказы в работе ВЭУ в Швеции за период 2000–2004 гг.

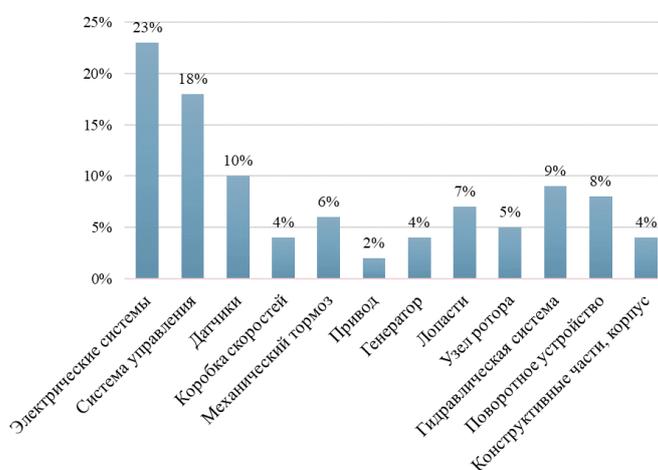


Рис. 3. Отказы в работе ВЭУ в Германии за период 1990–2006 гг.

По результатам анализа данных по отказам было составлено дерево отказов ВЭУ (рисунки 4). В дальнейшем при расширении базы данных по отказам ВЭУ и выявления новых видов отказов в ВЭУ дерево отказов может быть скорректировано.



Рис. 4. Дерево отказов ВЭУ

В таблице 1 показаны возможные причины этих отказов.

Таблица 1. Причинно-следственный анализ для дерева отказов

Компонент	Причина отказа
Башня	Усталость от ветровой нагрузки или чрезмерная скорость движения ротора оказывают колебательную нагрузку на башню
Поворотное устройство	Проблемы с подшипниками, своевременная замена масла
Гидравлическая система	Проблемы с подбором масла
Механический тормоз	Износ, при непрерывном использовании
Коробка скоростей	Слишком сильный поток ветра
Датчики	Брак, износ, другие дефекты
Привод	Износ, повреждение
Система управления	Любой из компонентов может выйти из строя в любой момент
Электрическая система	Любой из компонентов может выйти из строя в любой момент
Генератор	Превышение скорости из-за отсутствия подключения к сети управления
Лопасты	Перегрузка из-за ветровой нагрузки
Узел ротора	Постоянное напряжение на фланцах может привести к образованию трещин

Заключение. В работе был проведен сбор статистических данных отказов ВЭУ, некоторые из которых приведены в этой статье. По результатам анализа статистических данных по отказам было составлено дерево отказов ВЭУ. На этой основе были выявлены причинно-следственные связи отказов элементов ВЭУ. Из анализа статистических данных были сделаны следующие выводы:

- в регионах с низкими температурами в качестве материалов мачты должны применяться хладостойкие стали;
- конструкция мачты должна отвечать требованиям необходимой жёсткости, прочности и устойчивости;
- все технические жидкости и смазочные материалы, применяемые в ВЭУ, должны сохранять свои рабочие характеристики при низких температурах.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных энергетических систем в труднодоступных изолированных территориях Севера и Арктики».

Литература

1. Алексеев А.А., Сыромятникова А.С., Иванов А.Р. Основные причины разрушения металлоконструкций в условиях Арктики // Территория Нефтегаз. № 11–12. 2021. С. 64–72.
2. Иванова И.Ю., Ноговицын Д.Д., Тугузова Т.Ф. и др. Ветроэнергетические ресурсы г. Верхоянска Республики Саха (Якутия) и возможность их использования для энергоснабжения // Фундаментальные исследования. № 4-1. 2013. С.30–38.
3. Ciang C. C., Lee J., Bang H. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods // Measurement science and technology. – 2008. – Vol. 19, No. 12. – P. 1–20.
4. Hahn, B. Reliability of wind Turbines-Experience of 15 years with 1,500 WTs, wind energy // Durstewitz, M., Rohrig, K. // In Proc. Euromech Colloquium. – Berlin: Springer, 2007. – Vol. 101.
5. Iqbal, Tariq and Khan, Muhammad Mohsin K. and Khan, Faisal (2004) Reliability Analysis of a Horizontal Axis Wind Turbine. In: 14th Annual Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference (NECEC), October, 2004, St. John's, Newfoundland, Canada.
6. Ribrant J., Bertling L. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997–2005 // IEEE Transactions on energy conversion. – 2007. – Vol. 22, No. 1. – P. 167–173.
7. Study and development of a methodology for the estimation of the risk and harm to persons from wind turbines Prepared by CME Robinson, ES Paramasivam, EA Taylor, AJT Morrison, ED Sanderson & MMI Engineering Ltd (The Brew House; Wilderspool Park; Greenall's Avenue; Warrington WA4 6HL) for the Health and Safety Executive 2013.
8. Sørensen B F, Jørgensen E, Debel C P, Jensen F M, Jensen H M, Jacobsen T K and Halling K M 2004 Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1) Summary Report (Risø-R Report) Risø National Laboratory, Denmark.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НАГНЕТАНИИ ПРИРОДНОГО И УГЛЕКИСЛОГО ГАЗОВ В ПОДМЕРЗЛОТНЫЙ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ КОЛЛЕКТОР

Рожин И.И.¹, Иванов Г.И.²

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутский научный центр СО РАН, Якутск

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

i_rozhin@mail.ru

В работе проведено сравнение результатов численного расчета динамик распределения температуры, давления, водонасыщенности и гидратонасыщенности при нагнетании природного и углекислого газов через одиночную скважину в водоносный горизонт под многолетнемерзлыми горными породами с целью изучения возможности подземного хранения этих газов в виде гидратов.

В северных регионах, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты, имеются термодинамические предпосылки для хранения газа в гидратном состоянии [1–6] в подмерзлотных водоносных горизонтах, т. е. в твердой фазе, которая образуется при закачке газа в пористые коллекторы при определенных термодинамических условиях (при определенных соотношениях между температурой и давлением, зависящих от компонентного состава газа, типа и минерализации пластовых вод) из воды (водного раствора, льда, водяных паров) и низкомолекулярных газов. Преимущества такого способа хранения заключаются в большей компактности и стабильности хранилища, т. к. газ в гидратном состоянии занимает гораздо меньший объем, чем в свободном состоянии при тех же температуре и давлении (в одном объеме гидрата может содержаться до 170 объемов газа), и кроме того, при переходе в гидратное состояние связывается свободная пластовая вода. Следовательно, создание таких хранилищ газа будет способствовать многократному снижению объема хранилищ и повышению их стабильности по сравнению с обычными подземными хранилищами, а подошва многолетнемерзлых пород будет служить естественным непроницаемым для газа экраном. Более того, небольшая глубина таких хранилищ позволит существенно снизить затраты на их сооружение. Следует также отметить, что увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, вызванное антропогенной деятельностью, негативно сказывается на биосфере Земли и одним из важных направлений подземного хранения газа является захоронение диоксида углерода в пористых коллекторах в газогидратном состоянии.

Настоящая работа является продолжением исследований по математическому моделированию подземного хранения природного газа (ПГ) [7] и диоксида углерода (CO₂) [8] в гидратном состоянии. При этом используется метод оценки возможности подземного хранения газа в гидратном состоянии в подходящих с геологической точки зрения подмерзлотных водоносных горизонтах, изложенный в статьях [9–12]. Тем самым, здесь не приводится математическая модель образования гидрата при нагнетании газа в насыщенный газом и водой пласт, а также алгоритм её численной реализации. Для проведения вычислительных экспериментов использованы результаты расчетных и лабораторных экспериментов по определению равновесных условий образования гидратов ПГ и CO₂ в свободном объеме и поровом пространстве дисперсных сред и водных растворах, имитирующих пластовые воды подмерзлотных горизонтов [13, 14].

Ниже представлены некоторые результаты в случаях закачки ПГ и CO₂ в выбранный пласт с пористостью 0.15 и коэффициентом проницаемости $8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$. В начальный момент времени пластовые условия приняты одинаковыми: температура – 274.15 К, давление – 3 МПа, водонасыщенность – 0.9. Время нагнетания газа с температурой 279.15 К составляло 100 сут; радиус нагнетательной скважины – 0.1 м, радиус контура пласта – 300.1 м. В исходных данных кроме различия физических свойств газов и их гидратов, следует отметить, что

равновесные условия гидратообразования CO_2 смещены относительно условий образования гидратов ПГ в область более высоких давлений и низких температур для системы «газ+вода» (рис. 1а, в свободном объеме), а для систем «газ+песок+вода», «газ+песок+0.25% NaHCO_3 »; «газ+песок+2% NaHCO_3 » (рис. 1б–1г, в поровом пространстве) – наоборот, в область более низких давлений и высоких температур. Так как образование гидратов в пористых средах, насыщенных водой и газом, имеет свои особенности из-за взаимодействия воды, содержащейся в порах, с частицами дисперсной породы. К числу факторов, влияющих на равновесные условия гидратообразования, помимо состава газа и минерализации поровой воды, относятся минералогический состав, дисперсность и влагосодержание горной породы. Видно, что в начальный момент времени газы для всех систем находятся в гидратном состоянии, т. е. точки 3 расположены в областях гидратообразования.

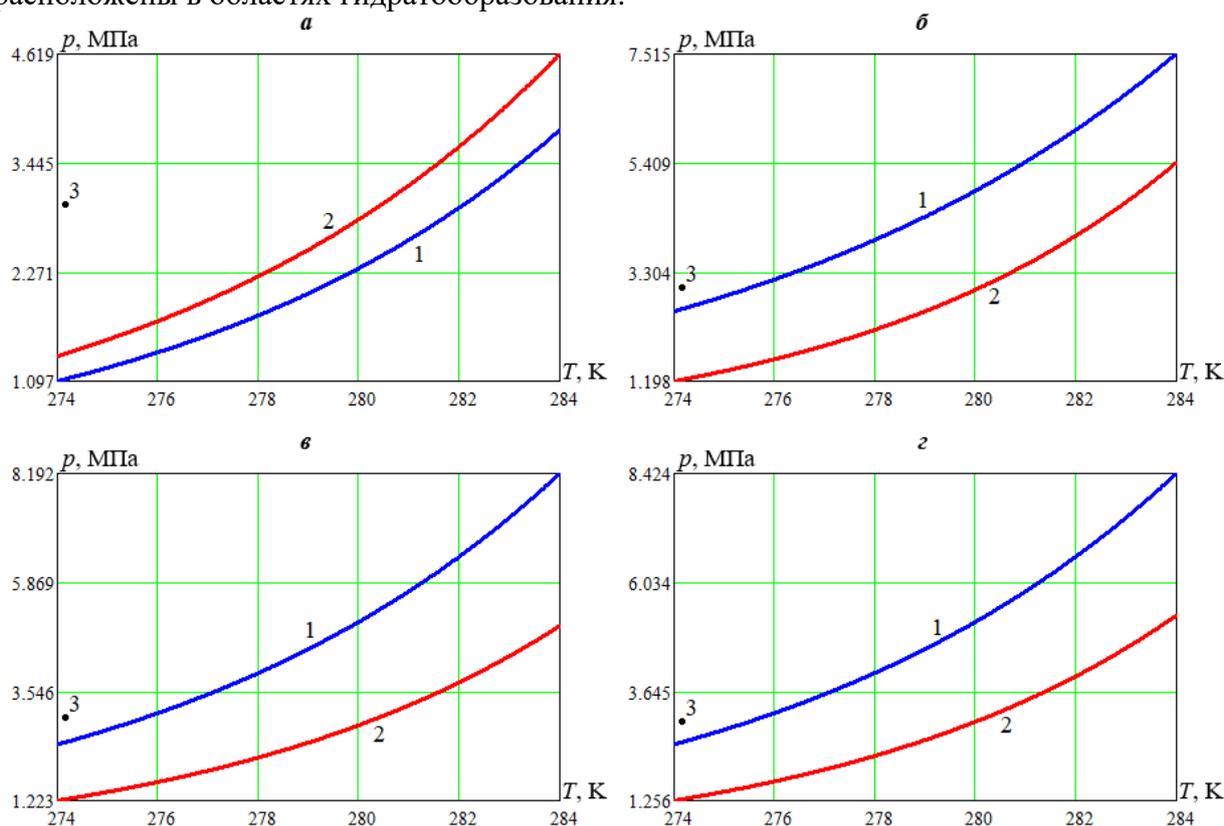


Рис. 1. Равновесная кривая гидратообразования для ПГ (кривые 1) и CO_2 (кривые 2) для систем: а – «газ+вода»; б – «газ+песок+вода»; в – «газ+песок+0.25% NaHCO_3 »; г – «газ+песок+2% NaHCO_3 ». Начальные пластовые условия (точка 3)

Сравнение результатов для системы «газ+вода» [8], т. е. при равновесных условиях гидратообразования в свободном объеме, показало, что в случае закачки CO_2 пласт нагревается меньше в основном из-за отличия эмпирических констант α_1 и α_2 , входящих в зависимость равновесной температуры гидратообразования от давления. Поля давления и водонасыщенности практически совпадают, но для случая CO_2 давление немного меньше, а водонасыщенность – немного больше. За небольшое время температура, давление и гидратонасыщенность существенно возрастают в призабойной зоне, где часть воды переходит в гидрат, а остальная часть вместе с нагнетаемым газом движется по пласту. Гидратонасыщенность монотонно возрастает по площади газохранилища и в конце процесса закачки CO_2 она больше, чем в случае ПГ. Профили полей давления и гидратонасыщенности почти идентичны, т. е. для образования гидратов основной движущей силой является давление.

Полностью противоположная картина получается при использовании равновесных условий гидратообразования в поровом пространстве. На рис. 2 представлено сопоставление результатов расчета динамик распределения температуры T , давления p , водонасыщенности σ и гидратонасыщенности ν для системы «газ+песок+вода». Видно, что в случае закачки CO_2 температура и давление в пласте будут больше, чем в случае ПГ (рис. 2а, 2б). В призабойной

зоне скважины (при $r = 0.1$ м) гидратонасыщенность больше для ПГ (рис. 2г), а к концу процесса нагнетания (при $t = 100$ сут) в этой зоне насыщение гидратами становится больше для CO_2 ($v_{max} = 0.19$), тогда как для ПГ ($v_{max} = 0.076$). В целом, гидратонасыщенность по всему пласту немного больше в конце закачки ПГ, чем в случае CO_2 . В ходе проведения серии вычислительных экспериментов получено, что с ростом темпа нагнетания газов параметры T , p и v увеличиваются, а σ уменьшается. Полной закупорки пор в призабойной зоне не происходит. В случае минерализованной пластовой воды насыщение гидратами больше для CO_2 .

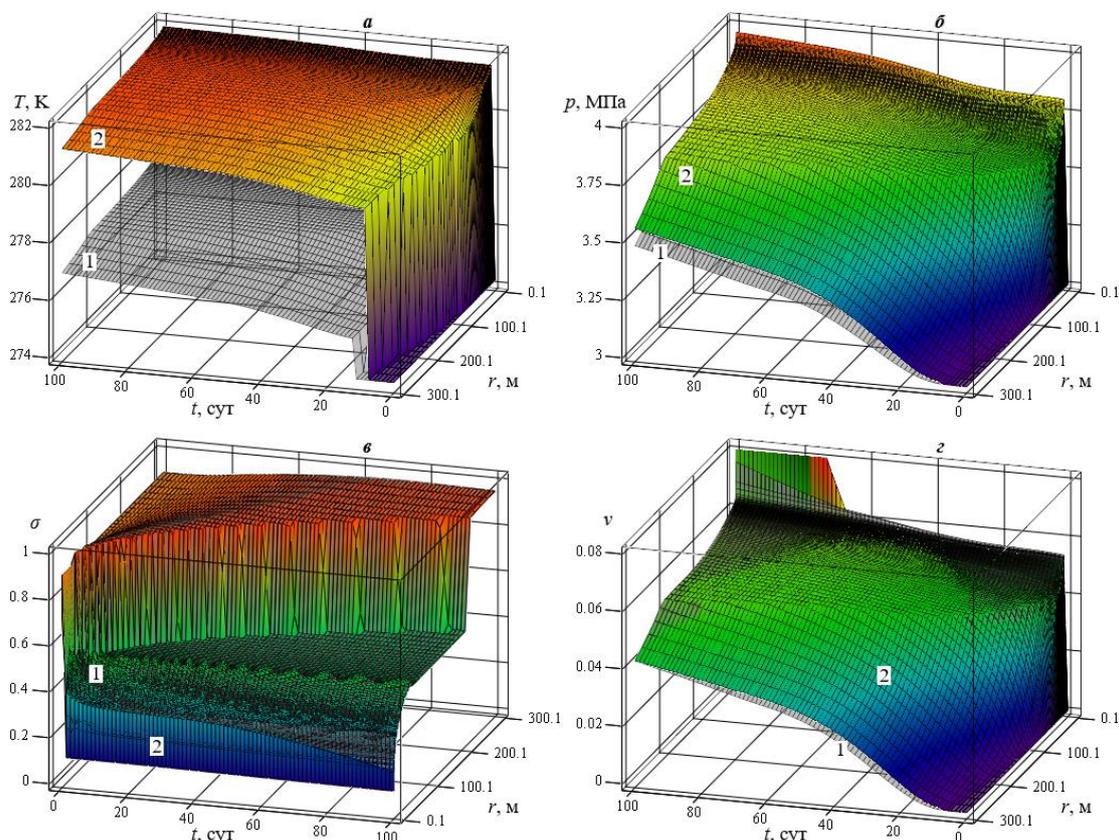


Рис. 2. Поле температуры (а), давления (б), водо- (в) и гидратонасыщенности (г) при расходе нагнетания газа $1 \text{ м}^3/\text{с}$ для системы «газ + песок + вода»: поверхности 1 – ПГ; 2 – CO_2

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (Рег. № 122011100157-5).

Литература

1. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М.: Недра, 1985. 232 с.
2. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
3. Истомин В.А. Физико-химические исследования газовых гидратов: проблемы и перспективы. М.: ТРЦ Газпром, 2000. 71 с.
4. Swinkels W.J.A.M., Drenth R.J.J. Thermal reservoir simulation model of production from naturally occurring gas hydrate accumulations // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2000. Vol. 3, Issue 6. – P. 559–566. – DOI: 10.2118/68213-PA.
5. Sun X., Mohanty K.K. Kinetic simulation of methane hydrate formation and dissociation in porous media // Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61, No. 1. P. 3476–3495. – DOI: 10.1016/j.ces.2005.12.017.
6. Uddin M., Coombe D.A., Law D.A., Gunter W.D. Numerical studies of gas-hydrates formation and decomposition in a geological reservoir // Journal of Energy Resources Technology. 2008. Vol. 130, No. 3. 032501. – 14 p. – DOI: 10.101115/1.2956978.
7. Рожин И.И., Иванов Г.И. Моделирование образования гидратов при нагнетании газа в подмерзлотный водонасыщенный коллектор с учетом данных лабораторных экспериментов по равновесным условиям гидратообразования в свободном объеме и пористой среде

// EURASTRENCOLD-2023: Сб. 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: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2023. – С. 525–530.

8. Рожин И.И., Иванов Г.И. Численное моделирование гидратообразования при нагнетании углекислого газа в подмерзлотный водоносный пласт // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (ТЭГУА-2023): Сб. материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н.С. Иванова. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2023. – С. 111–113.

9. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Mathematical modeling of natural gas underground storage in hydrate state // SOCAR Proceedings. 2015. No. 2. – P. 54–67. – DOI: 10.5510/OGP20150200243.

10. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. – С. 64–74.

11. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Underground storage of natural gas in hydrate state: primary injection stage // Journal of Engineering Thermophysics. 2018. Vol. 27, No. 2. – P. 221–231. – DOI: 10.1134/S181023281802008X.

12. Рожин И.И., Аргунова К.К. Моделирование подземного хранения природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. 2022. № 2(26). – С. 10–21. – DOI: 10.25587/SVFU.2022.26.2.002.

13. Kalacheva L.P., Ivanova I.K., Portnyagin A.S., Rozhin I.I., Argunova K.K., Nikolaev A.I. Determination of the lower boundaries of the natural gas hydrates stability zone in the subpermafrost horizons of the Yakut arch of the Vilyui syncline, saturated with bicarbonate-sodium type waters // SOCAR Proceedings. 2021. Special issue 2. – P. 001–011. – DOI: 10.5510/OGP2021SI200549.

14. Калачева Л.П., Иванова И.К., Портнягин А.С., Иванов В.К., Аргунова К.К., Бубнова А.Р. Оценка возможности захоронения углекислого газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах Вилюйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2023. Т. 18, № 4. http://www.ngtp.ru/rub/2023/43_2023.html. – 18 с.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВЛАГИ В ДИСПЕРСНОМ МАТЕРИАЛЕ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

Семенов С.О.^{1,2}, Малышев А.В.², Большев К.Н.², Саввинова Н.А.³, Андреев А.С.¹

¹ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

³ Северо-Восточный федеральный университет им М.К. Аммосова, Якутск

semens1993@mail.ru

В настоящем исследовании разработана экспериментальная установка, предназначенная для изучения перераспределения поровой влаги в дисперсных материалах, во время фазовых переходов. Для этого использовался известный емкостный метод измерения диэлектрической проницаемости. Были проведены экспериментальные исследования влажности песка при комнатной температуре (27 °С), и в условиях низких температур, достигаемых с помощью жидкостного криостата. Полученные результаты имеют потенциал для углубленного понимания процессов фазовых переходов, что является ключевым в таких прикладных науках, как геология и строительная инженерия, а также в других родственных дисциплинах. Эти данные необходимы для дальнейших исследований и разработки улучшенных моделей прогнозирования поведения дисперсных материалов в различных условиях окружающей среды.

Изучение процессов перераспределения поровой влаги в дисперсных материалах при фазовых переходах имеет критическое значение для различных прикладных научных исследований и инженерных применений. В данной работе представлена разработка экспериментальной установки, предназначенной для измерения диэлектрической проницаемости песка с использованием емкостного метода и экспериментальное исследование перераспределения поровой влаги в дисперсном материале при фазовых переходах. Данная установка позволяет осуществлять мониторинг перераспределения влаги во внутреннем объеме материала (песок), обеспечивая высокую точность.

На рисунке 1 а) и б) показана схема экспериментальной установки, включающая в себя несколько частей: 1 емкость прямоугольной формы, где устанавливается исследуемый образец, 2 – измерительные зонды, 3 – теплообменник, 4 – шланг, 5 – посадочное место, 6 – термодатчики. Образец материала представляет собой, осушенный песок. Терморегулирование устройства для измерения влагосодержания и датчики для фиксации температурных изменений внутри образца в реальном времени реализуются благодаря приборам «Zet-230» и «Теркон», а также микроконтроллеру, который управляет за движением сервоприводов по всей длине емкости.

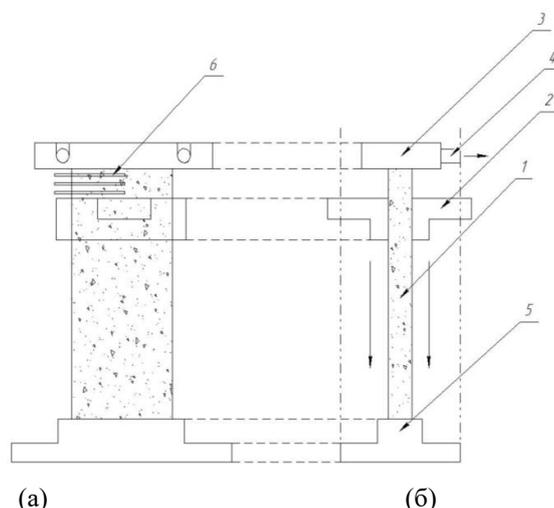


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Образец помещается в емкость сделанный из пластика, в котором создаются необходимые условия для инициирования фазовых переходов посредством теплообменника, расположенного сверху. Для повышения эффективности охлаждения теплообменник изолируется от окружающей среды, как показано на рисунке 2. Теплообменник представляет собой радиатор, соединенный с жидкостным насосом, подключенным к криостату модели «КРИО-ВТ-05-01». Жидкостный криостат поддерживает температуру до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, данная температура была выбрана для быстрого охлаждения, а также для анализа стационарного теплового процесса. Измерительный зонд для определения влагосодержания обеспечивает сбор данных о количестве влаги в различных частях образца по всей его высоте, что позволяет определить границу фазового перехода.

Экспериментальная установка состоит из электронных компонентов и модуля АЦП-ЦАП «ZET 230» с четырьмя 24-разрядными АЦП и ЦАП предназначенных для измерений сигналов поступающих с различных преобразователей, в качестве обработки управления передвижной части использовался микроконтроллеры серии Arduino Mega и «Теркон» для регистрации температуры.



Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

Данные, представленные на рисунке 3, получены в результате измерения влажности вдоль всей длины образца в процессе фазового перехода. Позиция 1 обозначает начало измерения зонда снизу, позиция 2 верхнюю часть емкости, а позиция 3 фазовый переход. Время, затраченное на достижение стационарного режима, составило приблизительно 1 час.

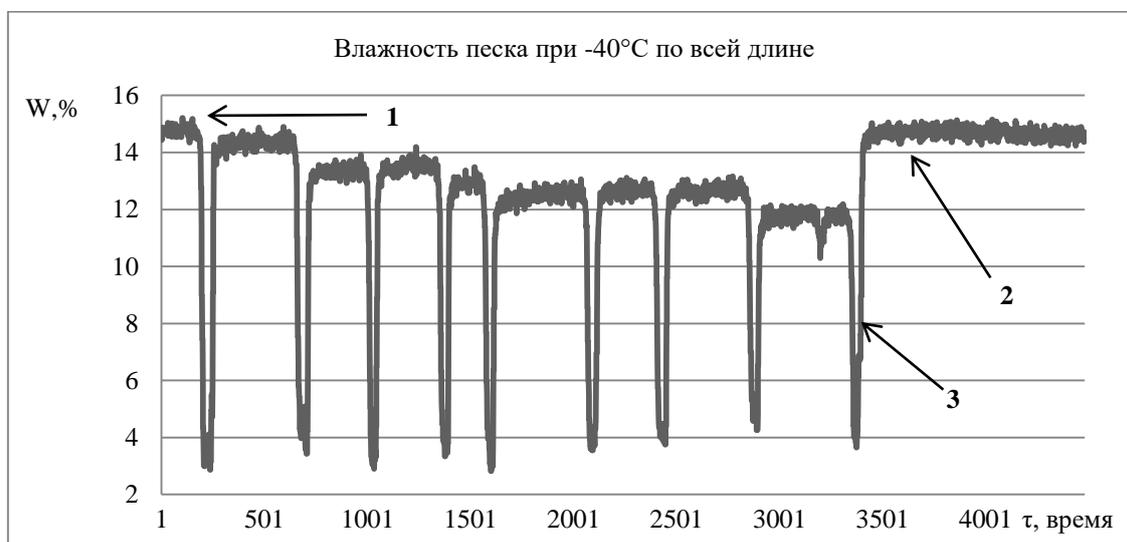


Рис. 3. График показателей влажности по всей длине образца в процессе фазового перехода

Как известно влажность песка в емкости распределяется под воздействием гравитационных сил и капиллярного эффекта, однако капиллярный эффект, который возникает из-за взаимодействия молекул воды с песком, может удерживать часть влаги ближе к поверхности или равномерно распределенной в толще песка. Как видно из графика между 1 и 3 есть разница влажности, то есть чем ниже, тем выше показатели влаги. А участок 2 показывает льдистость для влагонасыщенного песка, в этом участке происходит замерзание и на пластинах измерительного зонда уменьшается сопротивление и увеличивается электропроводимость и искажает данные. Но влажность песка в ёмкости будет иметь тенденцию к гравитационному оседанию вниз под влиянием силы тяжести, если нет других активных процессов (например, капиллярного подъёма или испарения). Однако, при замерзании верхнего слоя песка, фазовые переходы воды (замерзание в лед) могут вызвать эффект капиллярного подъёма влажности. Лед, образующийся на поверхности, может вытеснять воду из песка, заставляя её перемещаться вверх или оставаться в верхних слоях за счёт миграции по капиллярам в незамёрзшие участки. В стационарном режиме распределение влажности может стабилизироваться, однако, скорее всего верхняя часть может оставаться более влажной из-за нелинейных эффектов капиллярности и фазовых переходов, что показывают результаты экспериментов.

В заключение следует отметить, что проведённые измерения влажности и результаты экспериментов, основанных на разработанной установке, показали значительное влияние гравитационных сил, капиллярного эффекта и фазовых переходов на распределение влаги в песке. В частности, при фазовом переходе в верхнем слое песка наблюдается льдистость, которое может привести к капиллярному подъёму влаги, и изменению её распределения в стационарном режиме. Эксперимент показал, что, несмотря на гравитационное оседание влаги внизу, нелинейные эффекты капиллярности и фазовые переходы могут удерживать часть влаги в верхних слоях. Эти исследования способствуют глубокому пониманию физических процессов в дисперсных материалах и имеют важное значение для науки и в различных практических применениях.

Литература

1. Тепло- и массообмен во влажных материалах. Якутск, изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1975 148 с. (АН СССР. Якутский филиал Сибирского отделения. Институт физико-технических проблем Севера).
2. Теплофизические и массообменные свойства гигроскопических материалов. (Сборник научных трудов). Якутск, изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1977. 116 с. (АН СССР. Якутский филиал Сибирского отделения. Институт физико-технических проблем Севера).
3. Ефимов М. С. Влага гигроскопических материалов. – Новосибирск: Наука, 1986.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-185-187

ДИНАМИКА МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В Г. ЯКУТСКЕ

Скачков Ю.Б.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

ubskachkov@mpi.ysn.ru

Проведено сравнение тенденций изменения экстремумов температуры воздуха в Якутске на основе многолетних рядов годовых экстремальных ее значений. Выявлен статистически значимый тренд значений минимальной температуры воздуха. Рост максимальной температуры воздуха выражен слабо. Сделан вывод о сохранении тенденций изменения экстремумов температуры воздуха в ближайшие десятилетия.

В последнее время в научной литературе появляются сообщения о том, что современное потепление климата в различных регионах Северного полушария сопровождается уменьшением годовых амплитуд температуры воздуха. Одновременно с этим отмечается, что минимальные температуры растут быстрее максимальных [1–5]. На территории России самая большая изменчивость экстремальных значений температуры воздуха выявлена в Якутии [6].

То, что среднегодовая температура воздуха в г. Якутске за последние десятилетия повысилась и удерживается на высоком уровне – установленный факт [7,8]. Также ясно, что основной вклад в это повышение вносит зимний сезон. Любопытно в этой связи рассмотреть изменчивость экстремальных характеристик температуры воздуха: минимальной зимней и максимальной летней. Следует подчеркнуть, что речь идет об абсолютных ежегодных экстремумах.

Для анализа использовался суточный ряд температуры воздуха за более, чем столетний период метеорологических наблюдений на метеостанции г. Якутска. Данные брались с сайта ГУ «ВНИИГМИ – МЦД» (ГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»), [9].

Выясняется, что зимний минимум температуры воздуха за последние десятилетия имеет тенденцию к росту, причем тренд проявляется с очень высокой степенью значимости (рис. 1). Особенно впечатляют последние 25 лет, когда лишь только в четырех зимах температура воздуха в г. Якутске переходила через знаковую черту – минус 50 °С.

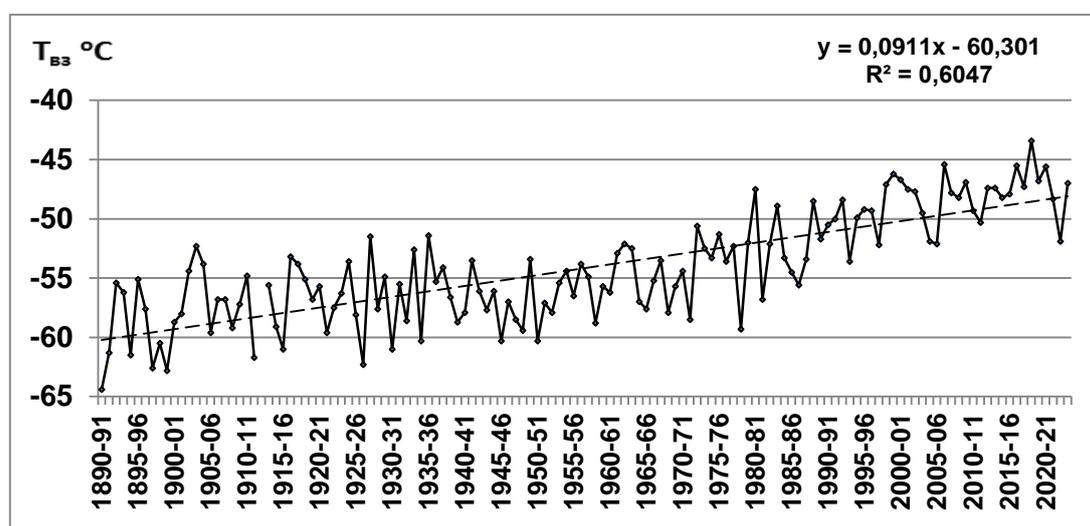


Рис. 1. Многолетняя изменчивость ежегодного минимума температуры воздуха в г. Якутске, °С (1890–2024 гг.). Пунктирная линия – линейный тренд

Следует упомянуть, что абсолютный минимум температуры воздуха в г. Якутске за более чем 134-летний период непрерывных метеорологических наблюдений был зафиксирован еще в конце XIX века (в феврале 1891 г.) и составил -64,4 °С. Интересно также отметить, что ежегодный минимум температуры воздуха в Якутске за весь период наблюдений в 32% случаев отмечался в декабре, в 52% случаев – в январе и в 16% случаев – в феврале.

В отличие от минимума температуры воздуха рост ежегодного максимума идет достаточно слабо и не является статистически значимым (рис. 2). Абсолютный максимум наблюдался совсем недавно – в июле 2011 г. (38,4 °С).

Также отметим, что ежегодный максимум температуры воздуха в г. Якутске за период с 1926 по 2024 г. в 14% случаев отмечался в июне, в 79% случаев – в июле и в 7% случаев – в августе.

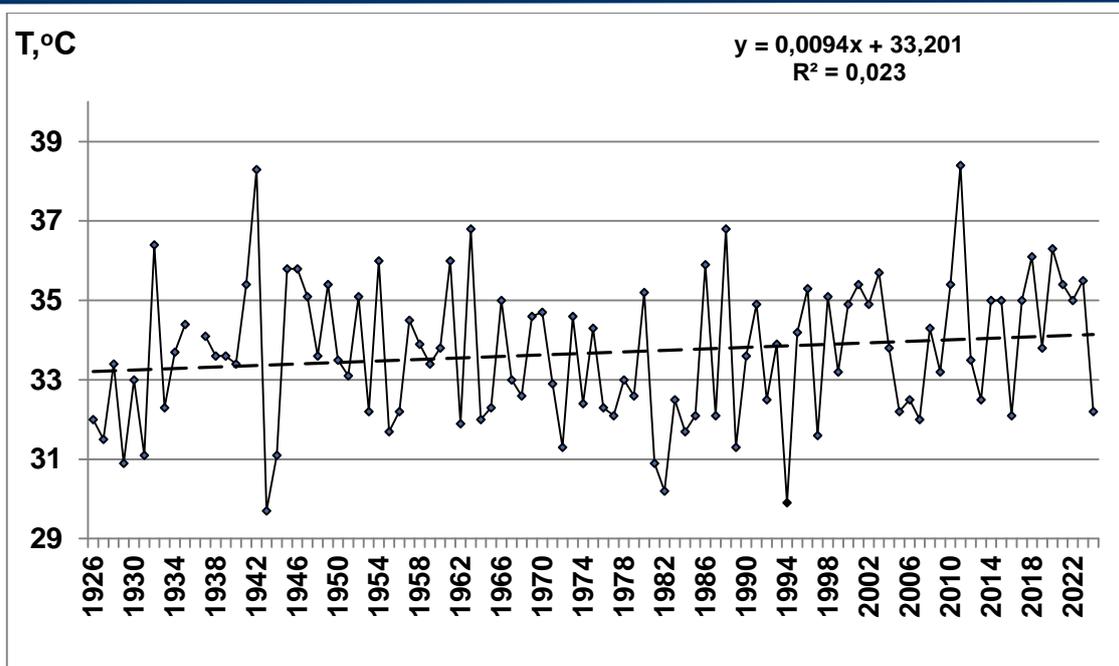


Рис. 2. Многолетняя изменчивость ежегодного максимума температуры воздуха в г. Якутске, °С (1926–2024 гг.). Пунктирная линия – линейный тренд

Согласно прогнозу изменения климата Якутии [10] в ближайшие десятилетия региональное повышение температуры воздуха будет продолжаться. В связи с этим уже сейчас очевидно, что тенденции роста минимальных температур воздуха и незначительного роста максимальных температур воздуха сохранятся.

Литература

1. Виноградова Г.М., Завалишин Н.П., Кузин В.И. Внутривековые изменения климата Восточной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2002. № 5–6. С. 408–411.
2. Разуваев В.Н. Погода и климат в России в XX веке // *Россия в окружающем мире: 2001 (Аналитический ежегодник)*. Отв. ред. Н.Н. Марфенин / Под общ. ред.: В.И. Данилова-Данильяна, С.А. Степанова. М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. 332 с.
3. Кусков А.И., Катаев С.Г. Структура и динамика приземного температурного поля над азиатской территорией России. – Томск: Изд-во Том. пед. ун-та, 2006. 176 с.
4. Ревякин В.С., Харламова Н.Ф. Региональные изменения климата и природной среды Центральной Азии // *Мировой океан, водоемы суши и климат: Труды XII съезда РГО*. СПб, 2005. Т. 5. С. 369–377.
5. Кочугова Е.А., Кошкин Д.А. Тенденции изменения годовых экстремумов приземной температуры воздуха на территории Иркутской области // *География и природные ресурсы*. Новосибирск: Наука, 2010, № 2, С. 63–69.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. – Москва, 2024. – 104 стр.
7. Скачков Ю.Б. Современные изменения климата Центральной Якутии // В кн.: *Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии*. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000 г. С. 55–63.
8. Скачков Ю.Б. Современная изменчивость основных элементов климата г. Якутска // *Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Материалы российской конф.* / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Аграф-Пресс, 2009. С. 83–84.
9. <http://meteo.ru/data> // Сайт ГУ «ВНИИГМИ – МЦД» (ГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных»).
10. Нерадовский Л.Г., Скачков Ю.Б. Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 г. // *Материалы IX Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения»*, Мирный: 3–7 сентября 2011 г., Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. С. 389–393.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОРОВОГО РАСТВОРА И НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Таппырова Н.И., Протодияконова Н.А., Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск

o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru

Широкое применение многолетнемерзлых грунтов с различной степенью засоленности в качестве оснований зданий и сооружений вызывает необходимость изучения теплового режима грунтов. В данном докладе представлены результаты экспериментальных исследований и на их основании предложена методика, с помощью которой рассчитывается количество незамерзшей воды в засоленных грунтах.

Распространение засоленных мерзлых грунтов на Арктическом побережье России осложняет строительство и эксплуатацию инженерных сооружений и крупных транспортных объектов, так как данные грунты отличаются низкой несущей способностью и неустойчивостью к техногенным воздействиям [1–3]. Поэтому проблема исследования засоленных мерзлых пород является актуальной и обуславливает необходимость изучения, в том числе, влияния изменения температуры на теплофизические свойства грунтов. В данном докладе предложена методика, с помощью которой рассчитывается количество незамерзшей воды. Эта методика учитывает изменение начальной влажности, а также температуры и концентрации соли как для песчаного, так и для глинистого грунтов.

В работе [4] показана зависимость температуры замерзания от концентрации объемного раствора хлорида натрия (рис. 1а и б). Также на этих рисунках для песчаного и глинистого грунтов пунктирной линией приведена температура замерзания порового раствора грунта [5]

$$T = -\kappa C(T), \quad (1)$$

где $C(T)$ – концентрация соли, %; $\kappa = 0,7$.

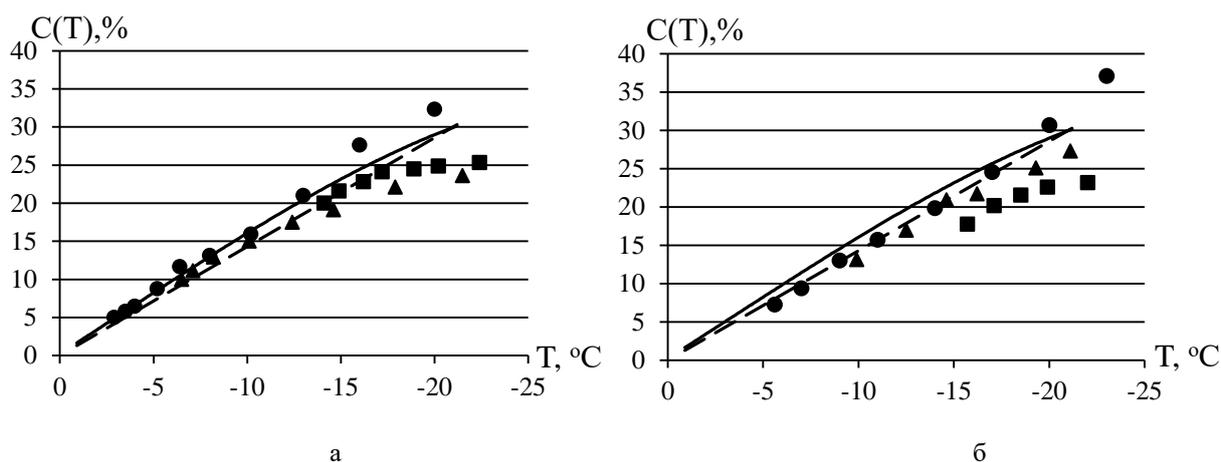


Рис. 1. Зависимость концентрации раствора от температуры: а – для песчаного грунта, б – для глинистого грунта. — — — — — объемный раствор $NaCl$, - - - - - расчет по (1), расчет по формулам (3, 6): ● – $C = 5\%$, ▲ – $C = 10\%$, ■ – $C = 15\%$

Данные, полученные по формуле (1), практически совпадают с данными для объемного раствора $NaCl$ и не учитывают дисперсность грунта. Это вносит определенную погрешность в определении данной зависимости.

В качестве исследуемых материалов были взяты песчаный и глинистый грунты с территории вблизи г. Якутска.

Пользуясь классическим определением концентрации соли C для талого и мерзлого грунтов и учитывая, что при промерзании влажного засоленного грунта образуется чистый лед и вся оставшаяся вода (незамерзшая) растворяет соль, запишем

$$\frac{W}{W_{не}(T)} = \frac{m_в}{m_{не}} = \frac{C(T)}{C}, \quad (2)$$

где $m_в$ – масса воды, кг; W – влажность грунта, %; $W_{не}(T)$ – количество незамерзшей воды, %; $m_{не}$ – масса незамерзшей воды, кг.

При этом

$$C(T) = \frac{C \cdot W}{W_{не}(T)}. \quad (3)$$

Используя экспериментальные данные по фазовому составу порового раствора и меняя значения концентрации соли до замерзания, рассчитывается концентрация порового раствора $C(T)$ в мерзлом грунте в зависимости от температуры (рис. 1 а, б). На этих рисунках видно, что в зависимости от увеличения концентрации порового раствора температура начала замерзания понижается. При концентрации соли 5% с понижением температуры, при которой замерзает грунт, кривые зависимости $C(T)$ объемного раствора $NaCl$ и порового раствора в грунте практически идентичны. С дальнейшим повышением начальной концентрации соли наблюдается расхождение. В глинистых грунтах это расхождение можно объяснить наличием прочносвязанной воды, которая, как известно, не растворяет соли. При этом, происходит смещение равновесной температуры фазового перехода порового раствора, который имеет более высокую концентрацию (рис. 1 б). Исходя из этого, формула (3) будет иметь вид

$$C(T) = \frac{CW}{W_{не}(T) - W_{нсв}}, \quad (4)$$

где $W_{нсв}$ – количество прочносвязанной воды, %.

Для песчаного грунта наблюдается совершенно другая картина: так как практически отсутствует связанная вода в них, то концентрация порового раствора не зависит от температуры замерзания.

В некоторых работах [5–7] приводятся данные о том, что количество незамерзшей воды аддитивно и состоит из двух составляющих

$$W_{не}(T) = W_{нр}(T) + W'_{не}(T), \quad (5)$$

где $W'_{не}(T)$ – количество незамерзшей воды, которое связано с поверхностью минеральных частиц, %; $W_{нр}(T)$ – количество незамерзшей воды, которое зависит от концентрации раствора, %.

Предполагая, что количество незамерзшей воды является аддитивной величиной и свойства порового и объемного растворов практически не отличаются, можем записать

$$C(T) = \frac{CW}{W_{не}(T) - W'_{не}(T)} = \frac{CW}{W_{нр}(T)}. \quad (6)$$

На рис. 1 а, б приведены результаты расчетов по формулам (3) для песка и (6) для глинистого грунта. Из рисунков видно, что зависимости $C(T)$ для исследуемых грунтов практически одинаковы с такой же зависимостью для свободного раствора.

Формулу (3) можно записать в виде

$$C(T) = \frac{C_0 \cdot W_0}{W_{не}(T)}. \quad (7)$$

Для песчаного грунта, используя формулы (1) и (7), количество незамерзшей воды вычисляется

$$W_{нв}(T) = \frac{C_0 W_0^k}{|T|}. \quad (8)$$

На рис. 2 а приведены результаты расчета $W_{нв}(T)$ по формуле (8). Видно, что $W_{нв}(T)$ зависит от начальных значений W_0 и C_0 .

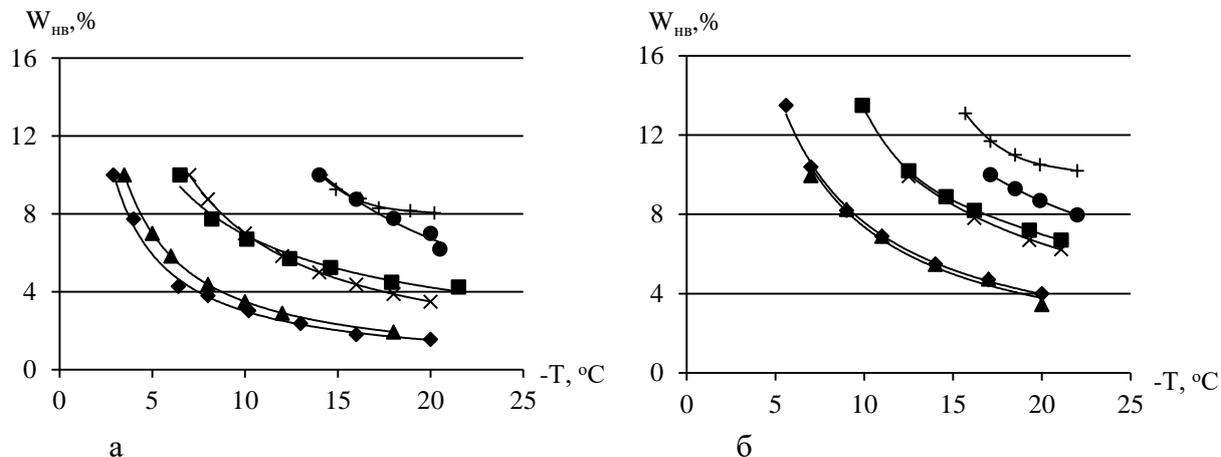


Рис. 2. Температурная зависимость $W_{нв}$ ($W_0 = 10\%$): а – засоленный песчаный грунт, б – засоленный глинистый грунт: эксперимент (♦ – $C_0 = 5\%$, ■ – $C_0 = 10\%$, + – $C_0 = 20\%$); расчет (▲ – $C_0 = 5\%$, × – $C_0 = 10\%$, ● – $C_0 = 20\%$)

А для глинистых грунтов, учитывая формулу (2) и аддитивность количества незамерзшей воды, получим формулу для расчета концентрации соли при температуре начала замерзания порового раствора [8]

$$W_{нв}(T) = W_{нв}^0(T) + \frac{C_0 W_0^k}{|T|}. \quad (9)$$

На рис. 2 б приведено сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей $W_{нв}(T)$ для разных C_0 при $W_0 = 10\%$. Сравнение расчетных значений по формулам (8), (9) и экспериментальных при C_0 равном 5% и 10% показывает хорошее совпадение. Расчеты, проведенные по этим формулам, при начальной концентрации соли выше 10% дают заниженные значения. При этом, в глинистых грунтах количество незамерзшей воды при одной и той же начальной влажности и температуре замерзания выше, чем в песчаных.

На рис. 3а, б приведены зависимости $W_{нв}$ от T при постоянной концентрации соли 5% для различных значений начальной влажности.

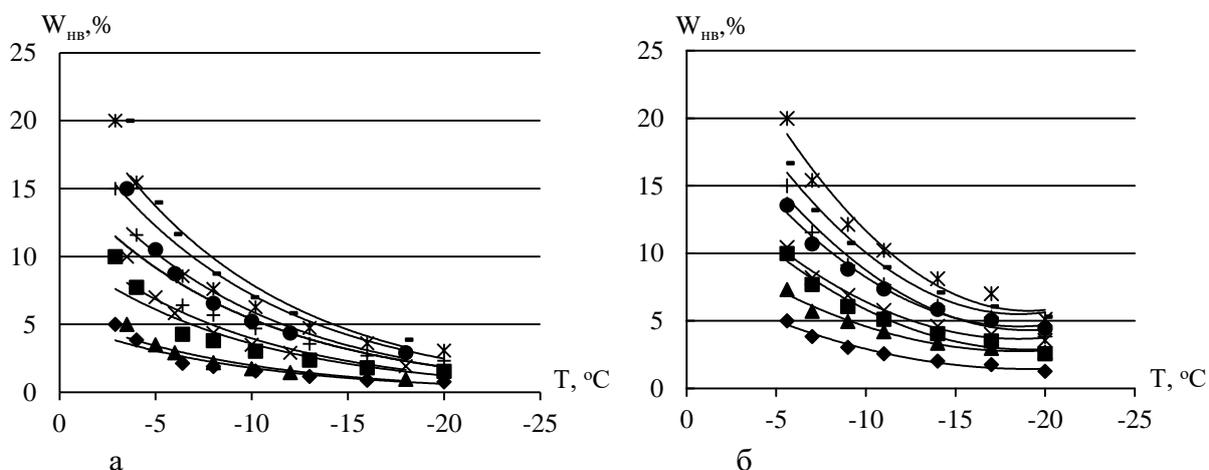


Рис. 3. Температурная зависимость $W_{нв}$ ($C = 5\%$): а – засоленный песчаный грунт, б – засоленный глинистый грунт: эксперимент (♦ – $W_0 = 5\%$, ■ – $W_0 = 10\%$, + – $W_0 = 15\%$, * – $W_0 = 20\%$); расчет (▲ – $W_0 = 5\%$, × – $W_0 = 10\%$, ● – $W_0 = 15\%$, -- – $W_0 = 20\%$)

Видно, что с увеличением начальной влажности в засоленных грунтах происходит увеличение $W_{нев}$. При этом, чем ниже температура замерзания порового раствора, тем меньше количество незамерзшей воды для любых значений начальной влажности и тем меньше расхождение между количеством незамерзшей воды при различных начальных влажностях и больше совпадения между расчетными и экспериментальными значениями.

Исходя из вышеизложенной методики расчета, проведя один эксперимент при известных значениях начальной влажности и засоленности грунта рассчитываются количество незамерзшей воды и концентрация порового раствора для других значений температуры, начальной концентрации и влажности. Для расчета количества незамерзшей воды засоленного песчаного грунта в зависимости от температуры применяется формула (8), а для глинистого – формула (9). Установлено, что при промерзании любого засоленного грунта начальная влажность, концентрация соли и температура замерзания являются одними из основных критериев, влияющих на количество незамерзшей воды в нем.

Литература

1. Черняк Ю.В., Фалалеева А.А., Брушков А.В. Новый подход к выделению границ засоленных мерзлых пород Арктического побережья // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 5. С. 34–44.
2. Xiao Z., Zhu L., Hou Z. The change mechanism and a prediction model of unfrozen water content in sodium chloride soil // Geoderma. 2022. 419:115881. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.115881.
3. Таппырова Н.И., Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А. Количество незамерзшей воды в засоленных песчаных грунтах // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 201–205.
4. Перельман В.И. Краткий справочник химика. М.: Госхимиздат, 1954. 560 с.
5. Ефимов С.С. Влага гигроскопических материалов. Новосибирск: Наука, 1986. 160 с.
6. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
7. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1998. 280 с.
8. Протодьяконова Н.А., Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н., Таппырова Н.И. Методика расчета количества незамерзшей воды для мерзлых засоленных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 3. С. 22–26.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ С. НАМЫ БУЛУНСКОГО УЛУСА РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Захаров В.Е., Петрова Т.Н.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

yasss@mail.ru

В статье рассматривается анализ вариантов энергоснабжения труднодоступного арктического населенного пункта на примере п. Намы Булунского улуса Республики Саха (Якутия). Приведена постановка задачи и возможные пути ее решения. Отмечены важность энергосбережения и значимость в обеспечении энергетической безопасности поселка строительства морского порта в п. Найба.

Краткая характеристика села Намы. Село расположено на левом берегу среднего течения несудоходной р. Омолой. Входит в состав Булунского улуса. Численность населения около 500 человек. Село расположено в лесотундровой зоне. Основной вид деятельности в селе – оленеводство.

Энергоснабжение села производится от модульной дизельной электростанции мощностью 850 кВт. Один ДГА мощностью 100кВт имеет наработку более 41 тысячи часов. Максимум зимней нагрузки 245 кВт. Минимум летней нагрузки 30 кВт. Годовое потребление дизельного топлива 240 т. Хранение топлива осуществляется на собственном складе энергоснабжающей организации с емкостным парком 390 т.

Теплоснабжение социальных, административных объектов и многоквартирного жилого фонда осуществляется от котельной «Центральная» ГУП «ЖКХ РС(Я)» на газоконденсатном топливе установленной мощностью 1,89 Гкал/ч. Присоединенная нагрузка 0,6 Гкал/ч. Протяженность тепловых сетей в двухтрубном исчислении 1,38 км. Среднегодовой объем потребления топлива 400 т. Система централизованного отопления зависимая, открытая. Экономически обоснованный тариф на теплоснабжение в с. Намы в 2023 г.¹ составил 18998,22 руб./Гкал. Льготный тариф на 2024 г. составляет 999,68 руб/Гкал. Оценочный объем субсидирования из регионального бюджета составляет 45–50 млн.руб в год. Частный сектор (около 80 домохозяйств) к централизованному отоплению не подключен. Топливом для индивидуального отопления служат дрова. В настоящий момент расстояние до места заготовки дров составляет около 50 км, из-за чего их стоимость для населения чрезмерно высока. Следует также иметь ввиду, что постоянное удаление мест заготовки дров требует также увеличения объемов доставки моторного топлива. Оценочный объем ежегодной заготовки дров – 2,4–3,0 тыс. м³, на что тратится 20–25 т. дизельного топлива. Потенциальный прирост тепловой нагрузки при полном подключении жилых домов всех домохозяйств составит 0,7–1,2 Гкал/ч, что требует практически удвоения существующей нагрузки и соответственного роста расхода топлива.

Логистика. Расстояние от села Намы до улусного центра п. Тикси составляет – 350 километров, до ближайшего населенного пункта - села Найба Булунского улуса, составляет – 170 километров. Наземное сообщение осуществляется по сезонной автомобильной дороге (автозимнику регионального значения) «Булун» на участке п. Тикси – п. Найба, а также по автозимнику местного значения на участке п. Найба – с. Намы. Также автозимник местного значения имеется до поселка Сайды Верхоянского улуса. Протяженность данного участка 250 км. Завоз топлива осуществляется с нефтебазы с. Найба куда топливо завозится водным путем. Ежегодно в село по существующей транспортной схеме для энергоснабжения завозится 650 т.

¹ На информационной базе по тарифным решениям <https://tarif-online.sakha.gov.ru/ots> на 01.07.2024 тарифное решение на 2024 г. не опубликовано.



Наземные транспортные коридоры до с. Намы. (Источник: <https://управтодор14.рф/index.php/karty> дата обращения 01.07.24)

жидкого топлива (дизельное топливо и газоконденсат). Нарастивание объемов перевозки топлива затруднительно. Основной причиной является низкое качество автозимника местного значения «Найба-Намы».

Основные энергетические ресурсы. К основным энергетическим ресурсам относятся те ресурсы, которые на современном этапе освоения технологий способны обеспечить энергообеспечение потребителей с требуемой надежностью на долгосрочную перспективу. Требованиям систем энергообеспечения небольших потребителей в арктической зоне в настоящий момент отвечают только виды углеводородного топлива.

Нефть и газовый конденсат. Жидкое углеводородное топливо обладает максимальной плотностью энергии. На данный вид топлива ориентированы труднодоступные потребители в т. ч. часть потребителей с. Намы (административные здания и многоквартирные дома), подключенные к котельной «Центральная».

Природный газ и сжиженный природный газ. Разрабатываемых месторождений природного газа рядом с селом в настоящий момент нет.

Возможность поставки сжиженного природного газа в дальней перспективе связано со строительством глубоководного морского порта в п. Найба и обустройства наземного круглогодичного сообщения до с. Намы для перевозки 80–100 танк-контейнеров в год.

Уголь. Каменный уголь в настоящий момент является одним из основных видов топлива, поставляемого для теплоснабжения арктических населенных пунктов, расположенных вдоль судоходных участков рек и на небольшом расстоянии от основных складов угля. Ближайший действующий угольный склад расположен в селе Сайды Верхоянского района. Возможность снабжения углем со склада в с. Сайды требует наличия возможностей наращивания объемов перевозки по р. Яна и регулярного обслуживания автозимника местного значения Сайды-Намы.

Местные топливно-энергетические ресурсы

Дрова. Сюда можно отнести также и тальники, и кустарниковые растения. Запасы дров в зоне экономической доступности с. Намы требуют уточнения. Также необходимо учитывать, что древесина является единственным доступным местным строительным материалом, а также единственным резервным топливом при чрезвычайных ситуациях.

Твердые горючие отходы. К твердым горючим отходам можно отнести весь органический мусор (растения, отходы деревообработки, кора, листья и т. д.), бытовой мусор, не запрещенный для сжигания, строительные отходы, в т. ч. после сноса и демонтажа зданий, заборов, загонов и т. д.

Солнечная энергия. Основной вклад солнечной энергии может быть в летний период для горячего водоснабжения, а также для отопления, т. к. в рассматриваемой зоне потребность в отоплении в летний период все равно сохраняется. Потенциал использования солнечной энергии для сокращения продолжительности отопительного периода (в межсезонье) систем централизованного теплоснабжения требует прикладных исследований.

Плавники. Северные реки имеют сильно меняющиеся русла, что обуславливает постоянный унос пойменного леса. Плавники традиционно собираются местными жителями береговых сел. Основным недостатком данного ресурса является его вылов.

Основным недостатком местных ТЭР является их небольшие ресурсы и нестабильность поступления. Преимуществом является то, что в определенных объемах они будут всегда и соответствующую нишу в энергетическом балансе они могут занять, способствуя экономии привозного топлива.

Энергосбережение. Энергосбережение объективно является основным направлением политики обеспечения энергетической безопасности арктических потребителей. Высокая стоимость энергии позволяет внедрять (апробировать) практически все возможные направления энергосбережения, в т.ч. использование алгоритмов активного управления отоплением и вентиляцией. Огромный потенциал энергосбережения безусловно находится на объектах потребителей. Основной причиной является ветхий жилой фонд, отсутствие качественных местных строительных материалов и стоимость доставки строй материалов. Эффект от энергосберегающих мероприятий можно получить только при наличии учета потребляемого тепла. Для оценки эффекта от энергосбережения и оценки экономической эффективности энергосберегающих мероприятий можно начать с внедрения систем учета в нескольких «старых» жилых домах и пилотных новых домах. Изучение потенциала энергосбережения в целом по арктической зоне и отдельных населенных пунктов является необходимым условием грамотного планирования бюджетных затрат и формирования механизмов государственного субсидирования.

Развитие транспортной системы. Развитие транспортной инфраструктуры до с. Намы безусловно связано с развитием глубоководного морского порта в с. Найба. Через с. Намы проходит кратчайший автозимник до Верхоянского и Эвено-Бытантайского улусов, что обуславливает возможность перевода автозимника Найба – Намы – Сайды на автодорогу регионального значения. В этом случае, возможности топливоснабжения с. Намы расширяются не только по объему перевозок, но и по видам топлива.

Другим направлением решения поставленной задачи является внедрение новшеств в транспортной системе. Кроме направлений совершенствования самой транспортной системы нужно обратить внимание на развитие технологий перевозки топлива. К примеру, упакованный в мягкие контейнеры (1–1,5 т) каменный уголь при перевозке не требует подготовки специального склада, исключает увлажнение и самовозгорание. Эти свойства позволяют перемещать уголь к труднодоступным потребителям в несколько этапов по мере пробития автозимника или обустройства опасных участков, не дожидаясь полного открытия автозимника, перетягивать уголь через не окрепший лед и т. д., значительно выигрывая время и повышая эффективность использования ресурса автомобильного парка.

Централизованное теплоснабжение Централизованное теплоснабжение единственный способ достижения комфортных условий жизни при отсутствии газоснабжения и электроотопления. Но при этом в сельской местности оно характеризуется сверхнормативными потерями тепла в протяженных трубопроводах небольшого диаметра.

Выбор системы централизованного отопления должен выполняться в пользу систем повышенной надежности и длительным сроком эксплуатации. Другими словами, централизованное теплоснабжение целесообразно строить закрытым и независимым. Это позволит оптимизировать режим работы котлового оборудования, даст возможность установить в котельной цех водоподготовки. Точка ввода у потребителя при этом необходимо будет оснастить индивидуальным тепловым пунктом. Стоимость ИТП под ключ для небольшого частного дома в негабаритном утепленном блок контейнере оценивается 300–400 тысяч рублей с учетом доставки. В целом, для обеспечения всего частного сектора с. Намы ИТП потребуется 24–32 млн. руб. Простой срок окупаемости при снижении потребления тепла на отопление на 10%, без учета экономии по водоснабжению и повышению ресурса системы отопления, составит 7–8 лет. А при достижении экономии потребления тепла на 20% – 4–5 лет. При существующих тарифах на тепло присоединение к централизованному теплоснабжению всего частного сектора с. Намы приведет к росту субсидирования на 43–50 млн. рублей.

Децентрализованное теплоснабжение. Преимущества децентрализованного теплоснабжения: учет потребленного каждым домохозяйством топлива, что исключает необходимость в тепловом счетчике, но при этом сохраняет стимул к энергосбережению, отсутствие

потерь тепла в тепловых сетях и потребления электроэнергии сетевыми и подпиточными насосами, невозможность каскадных и масштабных аварийных ситуаций. При переводе частных домов с печного дровяного отопления на автоматизированные котлы длительного горения на твердом топливе можно получить относительно комфортные условия для населения. Данный вариант требует обеспечения населения качественным сортовым твердым топливом. В условиях сезонной схемы доставки необходимо обеспечить неизменность исходного качества угля в течение длительного времени (в течение срока доставки и хранения). Стоимость обеспечения всего частного сектора с. Намы автоматизированными котлами на твердом топливе на примере котлов серии Zota Stahanov составит 32–35 млн. руб. что сопоставимо со стоимостью обеспечения потребителей индивидуальными тепловыми пунктами при централизованном теплоснабжении. Стоимость изготовления и доставки индивидуальных котельных дополнительно оценивается на уровне 25–35 млн. руб. Оценить объем роста субсидирования на данном этапе сложно.

Организация энергоснабжения. Экономическая доступность конечных видов энергии в настоящее время, обеспечивается за счет субсидирования из регионального бюджета по двум направлениям: через механизм компенсации выпадающих доходов ресурсоснабжающих организаций и прямого субсидирования населения с низкими доходами. Недостатком действующих механизмов является отсутствие стимулов энергосбережения как со стороны потребителей, так и со стороны ресурсоснабжающих организаций. Для снижения затрат энергоснабжения критически важно создать условия, когда поставщик тепла стремится снизить производство, а потребитель снизить потребление тепла. То же касается и электроснабжения. Соответственно, финансовые механизмы обеспечения надежного энергоснабжения должны быть совершенно иными, чем классические подходы в рыночной системе. Достижение таких условий лишь через тарифные инструменты крайне затруднительно.

Заключение. Главным приоритетом к решению задач энергоснабжения арктических населенных пунктов должно быть обеспечение их энергоэффективными и комфортными жилыми домами, качественными строительными материалами, системами учета потребляемых энергоресурсов. Это позволит не только снизить потребление энергоресурсов, но и станет основой формирования культуры энергопотребления.

В повышении доступности первичных энергоресурсов важнейшую роль играет развитие транспортной системы. Для с. Намы это реализация проекта по строительству глубоководного морского порта в п. Найба и перевод сезонной дороги Найба-Намы-Сайды с муниципального на региональный уровень.

Поиск технических решений производства местных первичных энергоресурсов также играет важную роль в оптимизации энергетического баланса.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWRS-2024-0031 программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

СЕКЦИЯ 3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-196-198

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗЛОМОВ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В НАНОСТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИСПЫТАНИЯМ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Борисова М.З.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

bormaria@yandex.ru

Рассмотрены особенности формирования изломов образцов низколегированной стали 09Г2С после равноканального углового прессования при различных температурах испытания. Показана роль измельчения структурных составляющих, образующихся при тёплом равноканальном угловом прессовании. Определены особенности микромеханизмов роста трещин за счет образования сколов.

Для обеспечения работоспособности техники в условиях холодного климата необходимо изучить влияние различных факторов на хладостойкость сталей. Одним из параметров для оценки хладостойкости материалов является ударная вязкость. Так как ударная вязкость является структурночувствительной характеристикой, то на её значения в большей степени влияют размер зерна, количество и распределение включений, а также состояние границ зерен. Испытания на ударный изгиб дают возможность спрогнозировать поведение материала в процессе эксплуатации при низких температурах. Вязко-хрупкий переход (ВХП) в стали 09Г2С в крупнозернистом состоянии происходит в области отрицательных температур (около -40 °С) [1]. Структурные изменения, вносимые при интенсивной пластической деформации, смещают температуру ВХП.

Для исследования влияния структуры на ударную вязкость стали 09Г2С была проведена интенсивная пластическая деформация (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП). РКУП стали 09Г2С проходило по маршруту А, в 2 цикла при 400 °С. Испытания на ударный изгиб проводились на маятниковом копре «Amsler RKP-450» при температурах: +20, -20 и -60 °С (рис. 1).

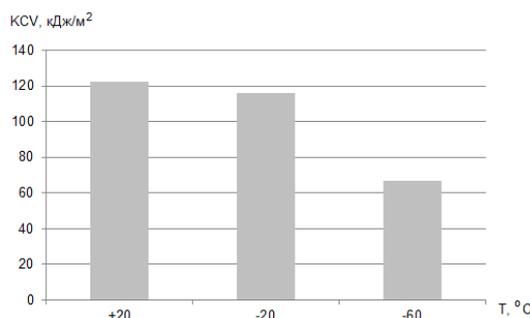


Рис. 1. Ударная вязкость стальных образцов после РКУП при различных температурах испытания

Известно, что РКУП приводит к увеличению прочностных характеристик материала [2–4], но при этом, также, наблюдается значительное снижение пластичности, что негативно сказывается на способности материала сопротивляться разрушению под действием ударной нагрузки. По фрактограммам, снятым при большом увеличении, можно судить о количестве и форме включений, характере микроструктуры, качестве термообработки и механизме разрушения. Исследования микрорельефа поверхностей излома, проведенные с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F (рис. 2–3) показали, что для образцов после РКУП характерно разрушение по механизму скола с образованием ручьистого микрорельефа.

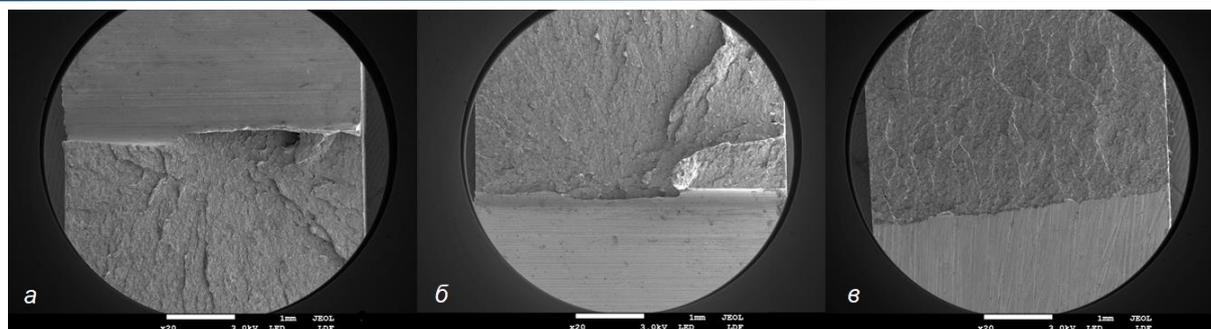


Рис. 2. Изломы образцов стали 09Г2С после теплового РКУП, испытанных на ударный изгиб при 20 °С (а), –20 °С и –60 °С(в)

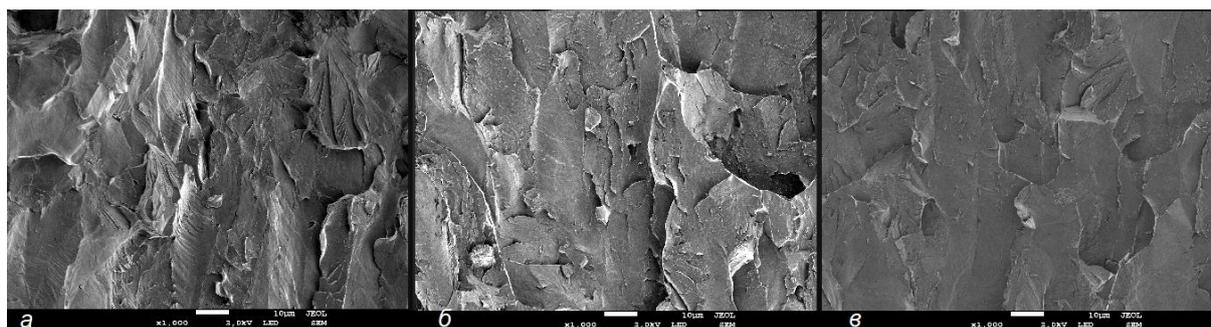


Рис. 3. Микрорельеф образцов стали 09Г2С после теплового РКУП, испытанных на ударный изгиб при 20 °С (а), –20 °С и –60 °С(в)

Напряженно-деформированное состояние стали после РКУП приводит к преждевременному разрушению, которое возникает еще до исчерпания полного ресурса вязкости материала в результате ускоренного зарождения и распространения микротрещин скола. Разрушение стали происходит по механизму скола с образованием ручьистого микрорельефа при всех температурах испытания. РКУП привел к смене основного механизма разрушения на хрупкое внутризеренное, а значит, несмотря на высокие прочностные характеристики сразу после РКУП, необходима последующая термообработка материала, позволяющая сохранить высокую прочность материала с одновременным повышением значений ударной вязкости. Способность к хрупкому разрушению чувствительна к локальным особенностям микроструктуры, например, к дисперсности карбидов и их локализации. Рассеяние значений ударной вязкости контролируется также дефектами и дисперсностью составляющих микроструктуры. Но также некоторое количество предварительной пластической деформации необходимо для зарождения хрупкого скола.

Таким образом, несмотря на положительное влияние интенсивной пластической деформации на прочность и твердость металлических материалов, напряженно-деформированное состояние сразу после ИПД приводит к смещению ВХП в зону положительных температур, что негативно сказывается на возможности практического применения таких материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0036) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. Никулин С.А., Рогачев С.О., Белов В.А и др. Структура и свойства сталей для конструкции устройства локализации расплава атомных реакторов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2023; 666(3), С. 356–366.
2. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Клевцова Н.В. и др. Механизм ударного разрушения стали 10 после равноканального углового прессования в интервале вязко-хрупкого перехода // 50 Международный симпозиум «Актуальные проблемы прочности»: материалы конференции, Витебск, 2010. Ч. 1. С. 43–46.

3. Валиев Р.З., Клевцов Г.В., Клевцова Н.А., Кушнарченко В.М., Ганеев А.В. Конструктивная прочность и коррозионная стойкость наноструктурированной стали 10 // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2014;57(6), С. 66–70.

4. Корзников А.В., Сергеев С.Н., Сафаров И.М. и др. Влияние волокнистой ультрамелкозернистой структуры на температуру хрупко-вязкого перехода низкоуглеродистой стали 12ГБА// Актуальные проблемы прочности: 54 Международная конференция. – Екатеринбург, 2013. С. 149.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-198-201

РАЗРАБОТКА ЗАМАСЛИВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОМПОЗИТОВ

Васильева А.А.

ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

kiir@mail.ru

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по разработке наномодифицированных замасливателей для изготовления базальтовых прямых и трощенных ровингов для армирования композитов методом пультрузии. Подтверждена возможность и техническая эффективность применения наномодификаторов в составах замасливателей. Модифицирование поверхности базальтовых волокон на основе наномодифицированного замасливателя оказывает положительное влияние на технологические и прочностные свойства конечных композитов. При введении углеродных наномодификаторов с массовой концентрацией 0,005% (по мас.) в состав замасливателя наблюдается повышение физико-механических показателей композитов: прочность при поперечном срезе на 30%, прочность при сжатии на 20,4%, прочность при трехточечном изгибе на 34,7%.

Интерес мирового научного сообщества в области изучения поверхностной обработки базальтового волокна поскольку оно относительно легко обрабатывается и стоит дешевле, чем углеродные и другие волокна при этом является не токсичным. Базальтовые волокна имеют схожую со стеклянными волокнами структуру при этом обладают высокими показателями: механической прочности, износостойкости, термической стабильности и химической стойкости [1], но в то же время в отдельных случаях уступают по этим показателям дорогим волокнам из S-стекла [2–5].

Одним из важных факторов, определяющим механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных волокнистым наполнителем, является величина адгезионной прочности. Значительный интерес со стороны ведущих лабораторий по изучению свойств ПКМ представляет разработка методов поверхностной модификации армирующих наполнителей перед изготовлением ПКМ. Величина адгезионной прочности в значительной степени определяется особыми химически активными функциональными группами способными образовывать прочные связи с полимерной матрицей. Среди работ, направленных на улучшение межфазного взаимодействия наблюдаются несколько подходов к улучшению поверхности раздела «волокно-матрица»: введение модификаторов непосредственно в шихту [6], из которой получают базальтовые волокна; нанесение покрытия (замасливателем, аппретом) [7–10] на готовые волокна; химическая, термическая или плазменная обработка и/или осаждение функциональных групп на поверхность базальтовых волокон [11] и добавление микро- и нано наполнителей непосредственно в матрицу. Слабое взаимодействие в межфазной границе раздела «волокно-матрица» приводит к отслоению волокна, хрупкому или пластичному разрушению. По этой причине разработка методов поверхностной модификации базальтовых волокон является весьма перспективным способом повышения адгезионной прочности соединения «волокно-матрица».

Цель данной работы заключается в проведении исследований физико-механических характеристик базальтовой нити предварительно обработанных модифицированным замасливателем 4С с последующим получением на их основе композит.

В качестве объектов исследования применялись следующие компоненты: замасливатель, эпоксидное связующее, базальтовый ровинг, наномодификаторы (НМ) и базальтопластики на их основе. Замасливатель 4С («НПО Стеклопластик», г. Зеленоград) получен на основе водной эмульсии эпоксидиановой смолы ЭДСВ-95 и аминосилана γ АГМ-9. Для модифицирования замасливателя были использованы водорастворимые НМ углеродного типа: гель УДАВ-ГО, полученный с использованием технологии глубокой очистки ультрадисперсных алмазов («ФНПЦ «Алтай», г. Бийск.); Фуллеренол (ФОЛ) – наномодификатор, представляющий собой водный раствор продукта взаимодействия фуллерена С60 или его смесей с поверхностно активными и другими функциональными веществами, предоставленные лабораторией П.А. Трошина (ИПХФ РАН, г. Черноголовка). В качестве армирующего наполнителя применяли базальтовую нить БН-13-80 (Васильевское месторождение, Якутия).

Процесс изготовления замасливателя для обработки базальтового волокна состоит из стадий приготовления аппретов и концентрата эмульсии, смешение компонентов состава замасливателя и получения наномодифицированных аппретов. Основное преимущество в пользу выбранных НМ – это простота их совмещения с замасливателями. В случае применения других НМ требуется дополнительная дорогостоящая процедура, а именно ультразвуковое диспергирование.

Одним из эффективных приемов обеспечения прогнозируемого взаимодействия между эпоксидной матрицей и базальтовыми волокнами, является направленная поверхностная модификация последних замасливающими композициями, состоящими из пленкообразователя, аппрета, эмульгаторов и других вспомогательных добавок. Модификацию замасливателя 4С проводили путем введения при постоянном интенсивном перемешивании раствор НМ, как оптимальной концентрации, так и исходной для получения уточненных результатов непосредственно на замасливателе. На основе ранее проведенных работ был установлен предел оптимальной концентрации НМ УДАВ-ГО, который находится в интервале от 0,20 до 1,65%, а для ФОЛ от 0,20 до 0,27% соответственно.

Для проведения прочностных испытаний были подготовлены микропластики путем пропитки эпоксиангидридным связующим базальтовых нитей, обработанных опытными замасливающими композициями на основе замасливателя 4С, модифицированных вышеуказанными концентрациями НМ, которых наносили на образцы, состоящие из 4-х отрезков длиной ~ 22 см базальтовой нити БН-13-80, далее пропитанные образцы высушивали в течение 18 часов на воздухе при комнатной температуре, затем в термошкафу в течение 15 минут при температуре 110 °С. Высушенные образцы подвергали пропитке полимерными составами: дисперсией и эпоксиангидридным связующим. Отверждение микропластиков проводили по следующей схеме: 70 °С/60 мин -> 120 °С/120 мин -> 160 °С/60 мин.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты испытаний пропитываемости эпоксидным связующим (ЭС), обработанных замасливателем 4С с добавлением УДАВ-ГО и ФОЛ базальтовых нитей БН-13-80. Также, в таблице 1 и 2 приведены результаты испытаний на прочность, полученных согласно ранее указанной концентрации микропластиков.

Таблица 1. Влияние концентрации геля УДАВ-ГО в замасливателе 4С на пропитываемость базальтовых нитей связующим ЭДИ и на прочность соответствующих микропластиков

Характеристика микропластика	Значение						
	0	0,34	0,17	0,08	0,04	0,01	0,005
Содержание УДАВ-ГО в замасливателе 4С, % по мас.	0	0,34	0,17	0,08	0,04	0,01	0,005
Прочность микропластиков, МПа	164	163	166	175	162	173	203
Пропитываемость (h), мм	26	26	26	37	36	38	40

Таблица 2. Влияние концентрации ФОЛ в замасливателе 4С на пропитываемость базальтовых нитей связующим ЭДИ и на прочность соответствующих микропластиков

Характеристика микропластика	Значение				
	0	0,08	0,04	0,01	0,005
Содержание ФОЛ в замасливателе 4С, % по мас.					
Прочность микропластиков, МПа	164	178	163	172	208
Пропитываемость (h), мм	26	38	37	39	42

В результате проведенных испытаний выявлено положительное влияние НМ на замасливатель 4С в процессе поверхностной обработки базальтовых волокон. Содержание связующего в микропластиках составляет 25–28% свидетельствуют о хорошей пропитываемости базальтового ровинга эпоксидным связующим. Установлено, что повышение прочности микропластиков на основе базальтовых нитей в зависимости от содержания НМ в замасливателе 4С в обоих случаях примерно одинаково и составляет 20% по сравнению с исходными образцами. Повышение прочности микропластиков, видимо связано с тем, что гель УДАВ-ГО столь низкой концентрации достаточно легко и равномерно распределяется в объеме замасливателя, как и ФОЛ. Предположительно наночастицы, обладая высокими значениями удельной поверхности и поверхностной энергии и будучи равномерно распределенными в объеме замасливателя, являются стопперами микротрещин на границе раздела фаз «волокно-матрица», что способствует снижению остаточных напряжений и, следовательно, повышению адгезионной прочности и прочности композита в целом. Также, результаты пропитки эпоксидангидридным связующим базальтовых нитей по выбранной методике оценки пропитываемости по высоте капиллярного поднятия связующего хорошо согласуются с данными по прочностным свойствам микропластиков. На основании полученных исследований для получения композитов на основе наномодифицированного замасливателя 4С оптимальная концентрация составляет нанонаполнителя 0,005% ФОЛ.

Для оценки эффективности применения наномодифицированного базальтового волокна в составе базальтопластика были изготовлены и испытаны опытные партии образцов стержней диаметром 12 мм на основе базальтового волокна Васильевского месторождения РС(Я) («ТБМ» г. Якутск). Образцы арматурных композитов волнового периодического профиля были изготовлены на технологической линии «Струна» ООО («Бийский завод стеклопластиков») методом продольно-поперечной намотки однонаправленного наномодифицированного базальтового волокна и пропитаны полимерным связующим на основе термореактивного эпоксидангидридного связующего. Скорость формования арматурного стержня диаметром 12 мм составляла 4,5–2,5 м/мин, далее изготовленные и нарезанные стержни БПА длиной 8 м помещали в печь для термостатирования ($140 \pm 5^\circ\text{C}$; 6 часов).

В таблице 3 представлены сравнительные показатели физико-механических свойств БПА, изготовленные на основе базальтового волокна РБН13-2400-4С+ЭС (не модифицированное), РБН13-2400-4С-ФОЛ+ЭС (с введением 0,005% ФОЛ в замасливатель 4С) и РБН13-2400-4С-ФОЛ+ЭС (модифицированного силикатными нанонаполнителями 0,5% Таркосил Т150) с добавлением эпоксидангидридного связующего ЭС.

Таблица 3. Физико-механические характеристики БПА

Прочность, МПа	РБН13-2400-4С+ЭС (Состав 1)	РБН13-2400-4С-0,005% ФОЛ+ЭС (Состав 2)	РБН13-2400-4С-0,005% ФОЛ+ЭС (0,50% Тарко- сил Т150) (Состав 3)
Растяжение	845	978	1074
Поперечный срез	1250	1433	1809
Сжатие	386	436	485
Трехточечный изгиб	1044	1250	1600

В таблице 3 представлены результаты физико-механических характеристик композита. Установлено, что при введении ФОЛ в состав замасливателя (состав 2) наблюдается увеличение физико-механических характеристик: прочность при растяжении увеличилось на 13,5%, прочность при поперечном срезе на 12,7%, прочность при сжатии на 11,5%, прочность при

трехточечном изгибе на 16,5% соответственно. В то же время максимальное увеличение прочностных характеристик наблюдается при совместной наномодификации, как замасливателя на поверхности волокна от введения ФОЛ, так и эпоксиангидридного связующего силикатными наночастицами. Образец БПА (состав 3) продемонстрировал улучшение прочности при поперечном срезе на 30%, при сжатии на 20,4% и трехточечном изгибе на 34,7%.

Выводы. Исследование подтверждает возможность внедрения в производство наномодифицированных замасливателей для производства базальтовых прямых и трощенных ровингов для изготовления высокопрочных базальтопластиковых стрежней методом пултрузии. Проведена оценка технологичности наноаппликаторов для замасливателей в условиях серийного промышленного производства непрерывных базальтовых волокон. Установлено, что замасливающие композиции на основе разработанных водных эпоксидных дисперсий обеспечивают высокую производительность процесса получения модифицированных волокон и базальтового непрерывного ровинга из них, эффективную пропитку эпоксидным связующим и высокие прочностные характеристики микропластиков. На основе проведенных исследований установлено, что модификация поверхности базальтового волокна с использованием замасливателя 4С с добавлением ФОЛ оказывает положительное влияние на характеристики волокна, а именно повышением прочности микропластиков на 26% и пропитки волокна на 61%. При введении наполнителя ФОЛ в состав замасливателя наблюдается рост физико-механических показателей композитов: при поперечном срезе на 30%; при сжатии на 20,4%; при трехточечном изгибе на 34,7%. Повышение прочностных характеристик композитов на основе наномодифицированного замасливателя обусловлено структурными изменениями в полимере на надмолекулярном и топологическом уровнях и достижением синергетического эффекта за счет взаимного влияния непрерывного и дисперсного наполнителей.

Литература

1. Matykiewicz D., Barczewski M., Knapski D., Skorczewska K. Hybrid effects of basalt fibers and basalt powder on thermomechanical properties of epoxy composites// *Compos B Eng.* 2017. 125. P. 157–64.
2. Zhukovskaya E.S., Pavlov Yu.V., Popov S.S., Gutnikov S.I. // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovaniy.* 2020. 2. P. 99–103.
3. Preda N., Costas A., Lilli M., Sbardella S., Scheffler C., Tirillò J., Sarasini F. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2021. 149, 106488.
4. Sokolov G.S., Shakirov K.M., Nelyub V.A. // *Advances in composites science and technologies 2020 (ACST 2020).* Journal of Physics: Conference Series. 1990 (2021) 012044.
5. Demina N.M., Cvetkova K.P., Gromkov B.K. // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti.* 2014. 350. P. 72–74.
6. Khandelwal S., Rhee K.Y. // *Composites Part B: Engineering.* 2020. 192, 108011.
7. Korchina L.V., Zubova N.G., Gerasimova V.M., Ustinova T.P. // *Plasticheskie massy.* 2017. 1–2. P. 44–45.
8. Iorio M., Santarelli M.L., Gonzalez-Gaitano G., Gonzalez-Benito J. // *Applied Surface.* 2018. 427. P. 248–1256.
9. Liu S., Wu G., Yu J., Chen X., Guo J., Zhang X., Wang P., Yin X. // *Composite Interfaces.* 2019. 4. P. 275–290.
10. Balaji K.V., Shirvanimoghaddam K., Rajan G.S., Ellis A.V., Naebe M. // *Materials Today Chemistry.* 2020. 17. 100334.
11. Zhang Y., Song K., Meng J., Minus M.L. // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2013. 5. P. 807–814.
12. B. G. Min, H. G. Chae, M. L. Minus, S. Kumar “Polymer/carbon nanotube composite fibers” in “Functional composites of carbon nanotubes and applications”, eds. L. Kwang-Pill, A. I. Gopalan, D. S. Fernand (Marquis. 2009), P. 43–47.

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ

Гаврильева А.А.¹, Старцев О.В.^{1,2}, Кычкин А.К.¹, Лебедев М.П.², Кротов А.С.¹,
Лукачевская И.Г.^{1,2}

¹ ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения
Российской Академии наук, г. Якутск

² ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии
наук», г. Якутск

gav-ann@yandex.ru

Показан размерный эффект при климатическом старении базальтопластиковой арматуры (БПА). Деформативность БПА снизилась с ростом диаметра БПА, температура стеклования возросла значительно с меньшим диаметром БПА. Пластификация влагой снизила прочность БПА диаметром 6 мм на 10–25% и не изменила прочности толстых БПА. Доотверждение и повышение жесткости связующего в направлении армирования в БПА с меньшим диаметром привели к уменьшению скорости изменения концентрации влаги по направлению армирования.

Введение. Характерной особенностью полимерных композиционных материалов (ПКМ) является зависимость их механических показателей от формы и размеров образцов [1–5]. В научной литературе содержится много примеров, показывающих, что после одинаковых воздействий агрессивной внешней среды эффекты старения ПКМ существенно зависят от формы и размеров тестируемых образцов [6], [7]. Температура, влажность, УФ-радиация вызывает разрушение С-О связей, образование пустот и микротрещин преимущественно в поверхностных слоях ПКМ [2, 6–8].

Целью данной работы является выявления размерного фактора при климатическом старении БПА. Для этого был выполнен анализ прочностных и физических характеристик БПА разного диаметра после 51–54 месяцев выдержки в двух климатических зонах, а также анализ влагопереноса по 2D модели Ленгмюра в БПА разного диаметра после 28–30 месяцев выдержки в двух климатических зонах.

Объект и методы исследования. Объектом исследования является базальтопластиковая арматура (БПА) – однонаправленный армированный (базальтовый ровинг РБН 13-2400-4С) стержень периодического профиля производства ООО «ТБМ» (г. Якутск) изготавливается в соответствии с технологическим регламентом РТП-2296-001-86166796-2012 с номинальным диаметром 6, 8, 10, 16, 20 мм (БПА 6, БПА 8, БПА 10, БПА 16, БПА 20) определяемым в ТУ 2296-001-86166796-2013.

Экспонирование БПА проводилось согласно ГОСТ 9.708-83 в экстремально холодном климате г. Якутска и в умеренно-теплом климате г. Геленджика.

Измерения относительного термического расширения БПА были выполнены на ТМА 202С от минус 80 до 200 °С со скоростью нагрева 5 °С в минуту и нагрузкой на образец 0,03 Н. Использовалось по 5 параллельных образцов размерами 5х5х20 мм.

Измерения динамического модуль потерь были выполнены с помощью DMA 861 при изгибных колебаниях полосок длиной 50 мм. Использовалось по 5 параллельных образцов при скорости нагрева 5 °С/мин и частоте 1 Гц от 50 до 230 °С.

Измерения пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе были проведены на испытательной машине Z100 при комнатной температуре. В каждой партии измерений использовалось по 10 параллельных образцов.

Кинетика поглощения влаги определялась как относительное изменение массы высушенного образца при воздействии температуры 60 °С и относительной влажности 98±2%.

Результаты и обсуждение. На рисунке 1 представлены средние значения коэффициента линейного термического расширения БПА 6, БПА 8, БПА 10 после 54 месяцев экспонирования в Якутске.

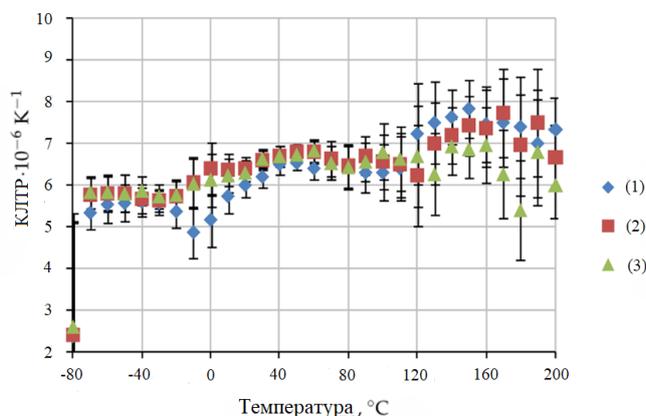


Рис. 1. Среднее значения КЛТР БПА после 54 месяцев экспонирования в Якутске: (1) – БПА 6; (2) – БПА 8; (3) – БПА 10

Интервал температур от минус 60 °С до 110 °С соответствует стеклообразному состоянию эпоксидной матрицы. Внутри этого интервала по мере роста температуры КЛТР БПА 6 несущественно возрастает от $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ до $6,4 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Выше температуры 110 °С КЛТР этого стержня возрастает до $7,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ вследствие появления сегментальной подвижности и перехода связующего в высокоэластическое состояние (рис. 1).

Для БПА10 КЛТР в указанном интервале температур изменяется в меньших пределах (рис. 1).

Таким образом, деформативность

БПА, экспонированной в Якутске, при повышенных температурах снижается с ростом диаметра стержня.

Температуру стеклования T_g определяли по положению максимума динамического модуля потерь от температуры. Такой метод определения дает достоверное значение T_g согласно работе [8]. В таблице 1 представлены T_g образцов БПА после экспонирования в Якутске и Геленджике.

Таблица 1. Температура стеклования эпоксидной матрицы БПА (°С).

Условия испытаний	БПА 6	БПА 8	БПА 10
Исходное состояние	133	133	134
После 51 месяцев экспонирования в Якутске	139	137	135
После 54 месяцев экспонирования в Геленджике	143	140	136

T_g эпоксидной матрицы БПА 6 повысилась на 6 °С после экспонирования в Якутске и на 10 °С после пребывания в Геленджике. Эффект уменьшился по мере увеличения диаметра арматуры. Для БПА 10 возрастание T_g не превысило 1–2 °С. Повышение T_g является признаком доотверждения эпоксидной матрицы [8, 9]. В работе [10] было показано, что доотверждение активируется в условиях повышенных уровней температуры и относительной влажности воздуха, то есть в условиях климата Геленджика. Поскольку за время экспозиции влага успеваеет проникнуть только в поверхностный слой БПА, то основной объем арматуры большого диаметра остался недоступным для молекул воды, что и не привело к увеличению T_g .

Результаты измерения прочностных показателей БПА представлены в таблице 2. Оказалось, что пределы прочности σ_t , σ_c , σ_b , измеренные после 28–30 месяцев и 51–54 месяцев экспонирования, увеличились на 5–11% в БПА 10. Подобное возрастание σ_t до 14% произошло и в БПА 6. Основываясь на результатах ТМА и ДМА (рис. 1, табл. 1), можно утверждать, что возрастание σ_t , обусловлено доотверждением и повышением жесткости связующего в направлении армирования. В то же время показатели σ_c и σ_b , уменьшаются на 10–25% в тонких стержнях (табл.2). Такое несоответствие можно объяснить пластифицирующим влиянием влаги. При одинаковой глубине проникновения влаги ее действие на прочность тонких стержней оказалось значительным, а для толстых стержней несущественным.

Таблица 2. Предел прочности БПА (МПа).

Условия испытаний	Способ нагружения	Обозначение	БПА 6	БПА 8	БПА 10
Исходное состояние	Растяжение	σ_t	1120	1003	–
	Изгиб	σ_b	1209	764	624
	Сжатие	σ_c	410	466	432
30 месяцев экспонирования в Геленджике	Изгиб	σ_b	1094	658	612
	Сжатие	σ_c	427	420	454
28 месяцев экспонирования в Якутске	Растяжение	σ_t	1206	1078	–
	Изгиб	σ_b	1087	733	639
	Сжатие	σ_c	428	474	452
54 месяцев экспонирования в Геленджике	Растяжение	σ_t	1193	1029	–
	Изгиб	σ_b	920	730	677
51 месяц экспонирования в Якутске	Растяжение	σ_t	1275	1080	–
	Изгиб	σ_b	976	666	695

Используем модель Ленгмюра [Ошибка! Источник ссылки не найден.] для цилиндра адиуса R и высотой $H=2h$, мобильные молекулы воды диффундируют с коэффициентом диффузии (D_r, D_h) и становятся связанными с вероятностью γ , в то же время связанные молекулы воды становятся мобильными с вероятностью β , тогда содержание влаги $M(t)$ в цилиндре через время воздействия влаги t выражается в виде

$$M(t) = M_0 \left(1 - \frac{\gamma}{\gamma + \beta} e^{-\beta t} - \frac{\beta}{\gamma + \beta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_n^2} e^{-\mu_n^2 \frac{D_r}{R^2} t} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{\mu_m^2} e^{-\mu_m^2 \frac{D_h}{h^2} t} \right), \quad (1)$$

где M_0 – предельное содержание влаги, $J_0(\mu_n) = 0$ – нули функции Бесселя первого рода, $\mu_m = (2m - 1)\pi/2$.

Аппроксимируя выражением (1) кинетику поглощения влаги в течение 60 дней в образцах БПА методом наименьших квадратов, получена адекватность модели Ленгмюра (коэффициент детерминации $R^2 = 0,91-0,99$). Результаты аппроксимации кинетики поглощения влаги в БПА моделью Ленгмюра представлены на рисунке 2.

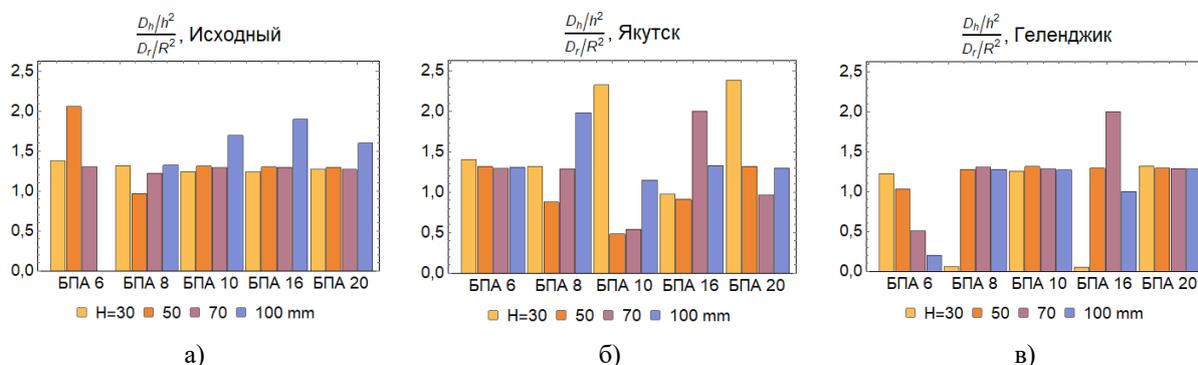


Рис. 2. Результаты аппроксимации кинетики поглощения влаги в БПА моделью Ленгмюра: а) исходных; б) после 28 месяцев экспонирования в Якутске; в) после 30 месяцев экспонирования в Геленджике

Для всех образцов БПА разного диаметра и высоты отношение $\frac{D_r/R^2}{D_h/h^2} \approx 1,3$ примерно одинаково. В отличие от отношения для БПА 6 после 30 месяцев экспонирования в Геленджике, здесь наблюдается уменьшение отношения по мере роста высоты образца (рис. 2. в)), что говорит о том, что чем выше высота образца БПА 6, тем меньше вклад в скорость насыщения от диффузии влаги по направлению армирования. Как было указано, выше дооттверждение и повышение жесткости связующего в направлении армирования в БПА 6 привел к уменьшению скорости изменения концентрации влаги в образцах по направлению армирования.

Заключение. Показано, что 2D модель Ленгмюра адекватно описывает кинетику поглощения влаги в БПА и дает количественную информацию об анизотропии влагопереноса и влиянии длины и диаметра образцов БПА. Коэффициенты диффузии в направления армиро-

вания для БПА оказались существенно выше, чем радиальном направлении. Показано, что после климатического воздействия деформативность БПА снизилась с ростом диаметра стержня, температура стеклования возросла значительно в стержне с меньшим диаметром. Пластификация влагой снизила прочность стержня БПА в 10–25% и не изменила прочности толстых стержней. При одинаковой глубине проникновения атмосферной влаги в объем БПА ее влияние на прочность тонких стержней оказалось существенным, а для толстых стержней – незначительным.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0036, тема № FWRS-2024-0095).

Литература

1. Bazli M., Ashrafi H., Jafari A., Zhao X.-L., Raman R.K.S., Bai Y. Effect of Fibers Configuration and Thickness on Tensile Behavior of GFRP Laminates Exposed to Harsh Environment //Polymers. 2019. V. 11. No 1401.
2. Ronagh H., Saeed N. Changes in mechanical properties of GFRP composite after exposure to warm seawater//J. of Composite materials. 2017. V. 51. P. 2733–2742.
3. Benmokrane B., Manal A., Bouhet J.-C., Mohame K., Robert M. Effects of diameter on the durability of glass fiber-reinforced polymer bars conditioned in alkaline solution//J. Compos. Constr. 2017. V. 21. P. 1–12. Paper 04017040.
4. Ashrafi H., Bazli M., Jafari A., Ozbakkaloglu T. Tensile properties of GFRP laminates after exposure to elevated temperatures: Effect of fiber configuration, sample thickness, and time of exposure//Composite Structures. 2020. V. 238. Paper 111971.
5. Mlyniec A., Korta J., Kudelski R., Uhl T. The influence of the laminate thickness, stacking sequence and thermal aging on the static and dynamic behavior of carbon/epoxy composites//Composite Structures. 2014. V. 118. P. 208–216.
6. Cinquin J., Medda B. Influence of laminate thickness on composite durability for long term utilization at intermediate temperature (100–150 C)//Composites Science and Technology 2009. V. 69. P. 1432–1436.
7. Wang Y., Zhu W., Zhang X., Cai G., Wan B. Influence of thickness on water absorption and tensile strength of BFRP laminates in water or alkaline solution and a thickness-dependent accelerated ageing method for BFRP laminates. // Appl. Sci. 2020. V. 10. Article 3618.
8. Startsev O.V., Lebedev M.P., Vapirov Y.M., Kychkin A.K. Comparison of glass-transition temperatures for epoxy polymers obtained by methods of thermal analysis //Mechanics of Composite Materials. 2020. V. 56. P. 227–240.
9. Startsev V.O., Lebedev M.P. Kychkin A.K. Influence of moderately warm and extremely cold climate on properties of basalt plastic armature // Heliyon. 2018. V.4. Article 01060.
10. Startsev O.V., Krotov A.S., Startseva L.T. Interlayer shear strength of polymer composite materials during long term climatic ageing //Polymer Degradation and Stability. 1999. V. 63. P. 183–186.
11. Aniskevich A., Glaskova-Kuzmina T. Effect of moisture on elastic and viscoelastic properties of fiber reinforced plastics: Retrospective and current trends. in Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites; ELSEVIER Ltd., 2019. P. 83–120.

ПАТЕНТНЫЙ ЛАНДШАФТ: МОРОЗОСТОЙКИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гайдукова Л.В., Маслацова А.А., Котелкова Е.О., Возняковский А.П.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева», г. Санкт-Петербург

e9111149627@mail.ru

С помощью методов анализа патентных данных выявлены тенденции развития отрасли морозостойких полимерных материалов. Исследования, проведенные по индексам совместной патентной классификации, показали, что при создании морозостойких материалов большое внимание уделяется композиционным материалам на основе четырех и более полимеров. Анализ, по ключевым словам, показал, что кроме морозостойкости для полимерных материалов важны стойкость в углеводородных средах, а также озоно-, влаго- и УФ-стойкость.

Известно, что более 80% полезных ископаемых Российской Федерации сосредоточены на территории Крайнего Севера и Арктики (70% территории страны) [1]. Одной из основных задач в сфере развития данного региона является разработка материалов для применения в арктических условиях [2, 3].

В качестве эффективного инструмента для стратегического планирования научно-исследовательских работ по созданию инновационных материалов и технологий, а также выявления тенденций и текущего уровня развития отраслей промышленности наравне с другими методами используются патентные исследования.

Информация, полученная из патентов, имеет ряд преимуществ по сравнению с другими источниками научно-технической информации. Во-первых, это обязательность раскрытия технологического уровня: патентные документы для прохождения экспертизы должны содержать детальное описание новизны предлагаемого изобретения. Кроме того, высокие затраты на охрану можно считать индикатором ценности технологии для компании, которая вкладывает в это ресурсы. Однако не следует забывать, что патентная охрана – это, прежде всего, юридический инструмент для защиты прав на технические решения. Таким образом, патентная аналитика не может являться единственным источником информации для принятия решений в области проведения и финансирования фундаментальных научных исследований.

Для выявления тенденций и текущего уровня развития отрасли, морозостойких эластомерных материалов было проведено аналитическое исследование патентной информации за последние двадцать лет. Патентный ландшафт выполнен в профессиональных информационно-поисковых аналитических системах, обладающих уникальными поисковыми и аналитическими особенностями: Lens [4] и Espacenet [5]. Для достижения максимальной достоверности результатов исследования, анализ патентной информации проводился в соответствии с методическими рекомендациями аналитического центра ФИПС [6].

Анализ динамики патентной активности (рис. 1), позволяет сделать вывод о том, что для рассматриваемого периода характерна растущая динамика публикаций, свидетельствующая об актуальности данного направления. Спад патентной активности после 2020 года, вероятно, в большей степени связан с пандемией Covid-19, чем со снижением интереса к развитию технологий по созданию морозостойких эластомерных материалов.

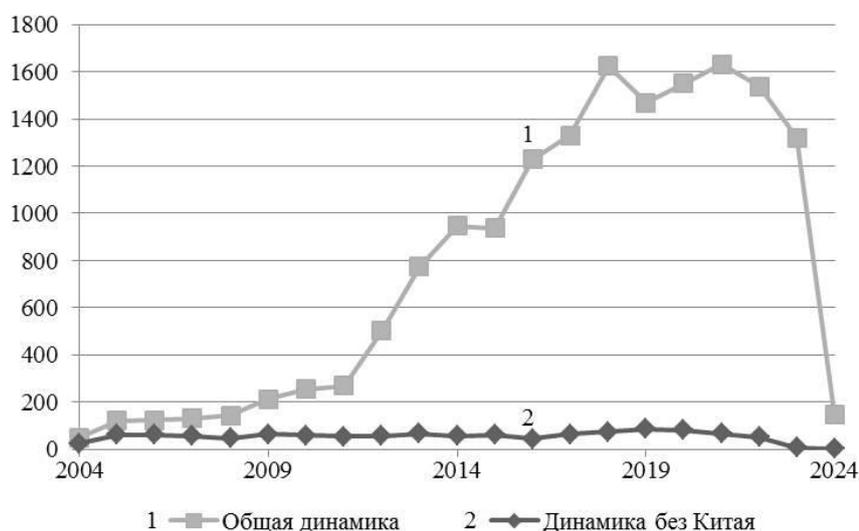


Рис. 1. Динамика патентной активности за 2004–2024 годы

Следует отметить, что значительная часть патентной информации по морозостойким эластомерным материалам регистрируется Китаем. Среди других стран мира по количеству патентных семейств лидирующее положение занимают Япония и США. Российская Федерация находится в рейтинге на 6 месте, что существенно выше, чем в ранее рассматриваемые периоды [7].

Важным инструментом систематизации патентных документов являются патентные классификации технических решений, которые позволяют определить патентоспособность изобретений, проанализировать патентную чистоту объектов, тенденции развития технических решений. На рис. 2 представлены преобладающие индексы по совместной патентной классификации (СПК).

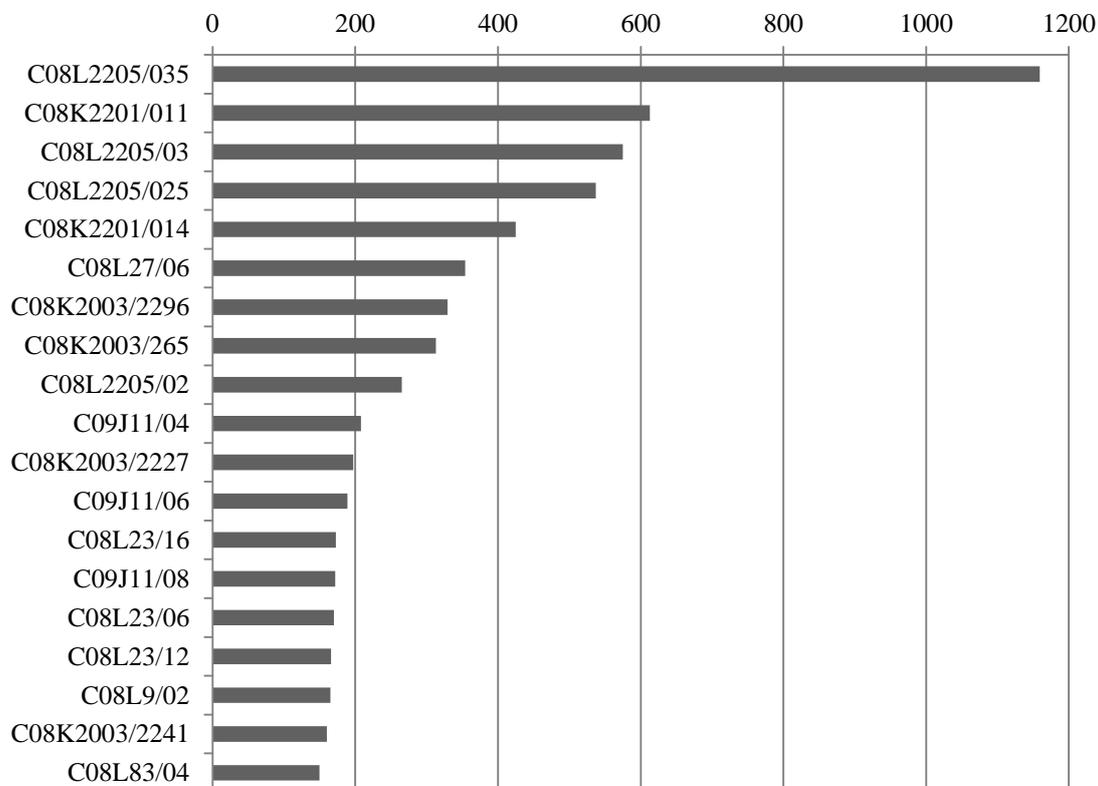


Рис. 2. Преобладающие индексы СПК за 2004–2024 годы

Анализ патентных данных по индексу СПК показал, что при создании эластомерных материалов с повышенной морозостойкостью отдается предпочтение композиционным материалам, состоящих из четырех и более полимеров (C08L2205/035). Кроме того, часто используются смеси на основе трех (C08L2205/03) или двух (C08L2205/02) полимеров.

В качестве полимерной основы морозостойких композиционных материалов чаще всего используются: гомополимеры и сополимеры винилхлорида (C08L27/06); этиленпропиленовые и этиленпропилендиеновые сополимеры (C08L23/16), полиэтилен (C08L23/06) и полипропилен (C08L23/12); латексы, содержащие акрилонитрил (C08L9/02), а также полисилоксаны (C08L83/04).

Среди функциональных ингредиентов смесей наибольшее распространение получили наноструктурирующие добавки: (C08K2201/011); оксиды и гидроксиды цинка (C08K2003/2296) и алюминия (C08K2003/2227); карбонаты кальция, стронция и бария (C08K2003/265), а также диоксид титана (C08K2003/2241).

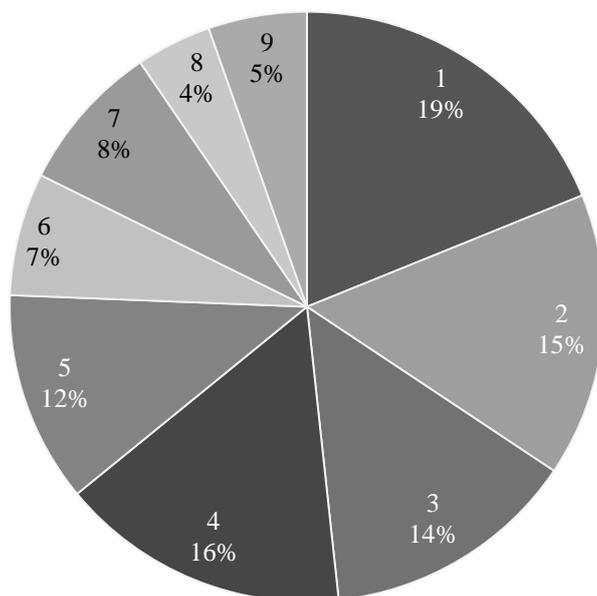


Рис. 3. Преобладающие ключевые слова для морозостойких эластомерных материалов:
 1–стойкость в углеводородах, 2– погодостойкость, 3–термостойкость, 4–стойкость к старению,
 5–огнестойкость, 6– стойкость в щелочах, 7–водостойкость, 8– стойкость к радиационному излучению,
 9– стойкость к УФ-излучению, 10– стойкость к действию озона

Более детальный анализ, по ключевым словам, (рис. 3) показал, что для морозостойких эластомерных материалов необходимо сохранение работоспособности в среде углеводородов (18%), не менее важна стойкость при различных погодных условиях и повышенных температурах. Кроме этого, разработчики морозостойких материалов обращают внимание на стойкость материалов к воздействию влаги, озона, радиации и УФ-излучения.

Таким образом, на примере достаточно общего анализа патентной информации показано, что для создания морозостойких материалов, сочетающих в себе ряд других эксплуатационных свойств, большое внимание уделяется композиционным материалам на основе смесей полимеров и наноструктурирующих добавок.

Литература

1. Роль природных и антропогенных факторов в современном состоянии региональной авиации Арктики и Крайнего Севера / В. П. Горбунов, В. М. Рухлинский, А. М. Саввина // Наука и бизнес: пути развития. 2020. С. 32–37.

2. Указ Президента РФ № 164 от 05.03.2020 «Об основах государственной политики РФ в Арктике на период до 2035 года»
3. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. Вып. 3. 44 с.
4. Официальный сайт: The lens [Электронный ресурс], URL: <https://www.lens.org/> (дата обращения 11.07.2024)
5. Официальный сайт: Espacenet [Электронный ресурс], URL: <https://worldwide.espacenet.com/> (дата обращения 11.07.2024)
6. Приказ Роспатента от 23 января 2017 г. № 8 «Об утверждении Методических рекомендаций по подготовке отчетов о патентном обзоре (патентный ландшафт)». М.: ФИПС, 2017. –16 с.
7. Выявление тенденций развития области морозостойких эластомерных материалов с использованием патентной аналитики / Гайдукова Л.В., Гарчева П.С., Курлянд С.К., Мурашев С.В. // Полимерные и композиционные материалы в условиях севера. Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 120-летию открытия синтетического каучука И.Л. Кондаковым. Якутск, октябрь 2021 г. С. 26–28.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-209-212

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ НОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Гусев Е.Л.^{1,2}, Петрова П.Н.¹, Гоголева О.В.¹, Колесова Е.С.¹

¹ Институт проблем нефти и газа ФИЦ «ЯНЦ СО РАН, г. Якутск

² Институт математики и информатики Северо-Восточного федерального

университета, г. Якутск

elgusev@mail.ru

На основе разрабатываемой методологии прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов и конструкций в рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования проведены исследования возможности оптимального прогнозирования срока службы ряда новых полимерных композиционных материалов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды, характерных для холодного климата Арктической и Субарктической зоны.

В последние десятилетия при разработке новых функциональных полимерных композиционных материалов (ПКМ) для применения в экстремальных условиях Арктической и Субарктической зоны недостаточно только улучшения ключевых эксплуатационных характеристик, таких как прочность, эластичность, износостойкость и электропроводность. При создании полимерных материалов (ПМ), полимерных композиционных материалов (ПКМ) в экстремальных условиях Арктической и Субарктической зоны важно учитывать множество требований к работе в экстремальных условиях Севера. Одним из центральных требований к ПМ, ПКМ в экстремальных условиях Арктической и Субарктической зоны является требование стабильности определяющих свойств материалов под воздействием экстремальных климатических факторов. Проведение климатических испытаний позволяет как определить текущие изменения в свойствах материалов, так и прогнозировать изменение этих свойств в будущем [1–9].

На основе разрабатываемой методологии как краткосрочного, так и средне-, и долгосрочного прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов и конструкций в рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования проведены исследования возможности оптимального прогнозирования срока службы ряда новых полимерных композиционных материалов при воздействии экстремальных климатических факторов внешней среды, характерных для холодного климата Арктической и Субарктической зоны [1–9].

На основе проведенных натуральных испытаний и разрабатываемой методологии оптимального прогнозирования определяющих характеристик композитов в экстремальных условиях в рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования были проведены исследования возможности построения объективных оценок степени воздействия экстремальных климатических факторов на физико-механические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и композиционных материалов на его основе. Натурные испытания сверхвысокомолекулярного полиэтилена и композиционных материалов на его основе проводились как с добавлением стабилизатора, так и без его добавления.

В качестве армирующего наполнителя для полимерной матрицы на основе СВМПЭ использовались углеродные волокна марки «Белум». В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4. Исследования по естественному старению композита проводились в экстремальных климатических условиях г. Якутска на открытом испытательном полигоне ИПНГ ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» в соответствии с ГОСТ 9.708-83.

В работе [10] было установлено, что СВМПЭ и ПКМ на его основе подвергаются старению уже к шестому месяцу экспонирования. При этом установлено, что процесс старения материалов сопровождается падением механических характеристик.

Известно, что старение полимеров сопровождается конкурирующими процессами, связанными с дополнительным структурированием и разрушением полимерных цепей. Для предотвращения процессов старения был использован стабилизатор марки СО-4.

В работах [12, 13] показана перспективность применения данного стабилизатора для использования в полиэтиленовых композитах с целью повышения климатической стойкости.

В качестве армирующего наполнителя для полимерной матрицы на основе СВМПЭ использовались углеродные волокна марки «Белум». В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4. На рис. 1 приведены результаты климатических испытаний в условиях г. Якутска СВМПЭ с углеродными волокнами (УВ) в качестве армирующего наполнителя, со стабилизатором и без стабилизатора.

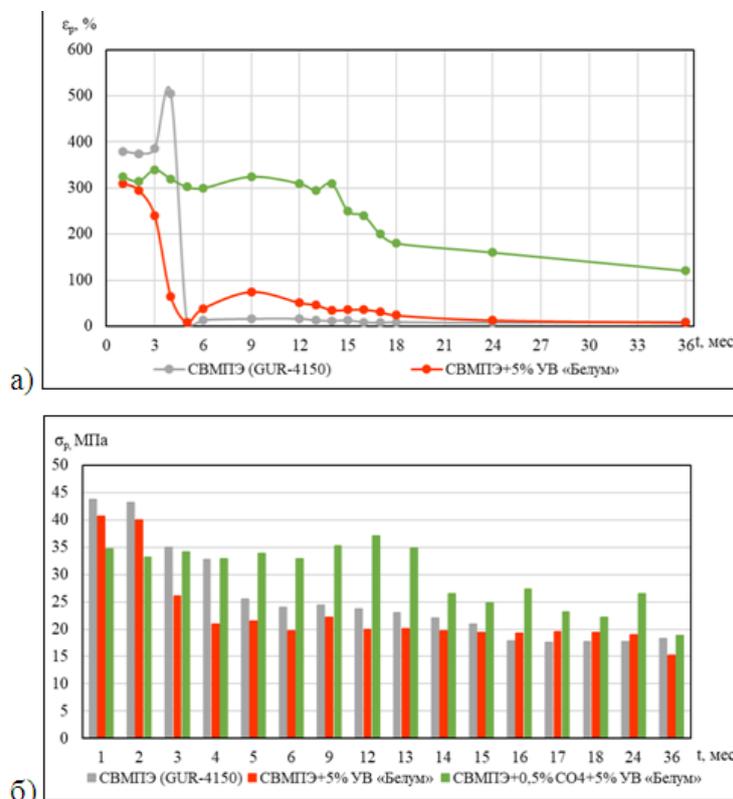


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения (а) и предела прочности (б) СВМПЭ, СВМПЭ+5масс%УВ и СВМПЭ+0,5масс%СО-4+5масс%УВ от времени экспонирования

Натурные эксперименты показали, что физико-механические характеристики СВМПЭ остаются стабильными только на протяжении первых 90 дней экспозиции (рис.1). В случае модификации ПКМ только углеродными волокнами ухудшение физико-механических характеристик начинается уже после 80 дней экспозиции. Натурные эксперименты также показали, что ПКМ на основе СВМПЭ с добавлением 0,5 мас.% стабилизатора сохраняет свои деформационные и прочностные свойства на уровне неэкспонированного образца уже в течение 13 месяцев.

Одной из центральных проблем является проблема создания новых перспективных композиционных материалов с повышенным сроком службы. Для решения данной проблемы возникает необходимость в разработке методологии объективной оценки срока службы разрабатываемых новых перспективных КМ. В работах [3–9] в рамках вариационных постановок была разработана методология оптимального прогнозирования определяющих характеристики композитов.

В рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования разработана оптимальная обобщенная модель долговечности (ОМД), учитывающая одновременное воздействие нескольких дестабилизирующих факторов на композит [3–9]. При предположении, что различные физические факторы оказывают на композит влияние, независимое от воздействия других факторов, разработанная ОМД, описывающая одновременное воздействие нескольких физических факторов на материал, может быть представлена в виде:

$$R = R_0 + \sum_{j=1}^p F_j(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t). \quad (1)$$

В этих обозначениях R есть определяющее свойство материала, $F_j(u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}; t)$, ($j = 1, 2, \dots, p$) – модель, описывающая воздействие j -го фактора на композит, $u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,l_j}$ – система неопределенных параметров, описывающих характер воздействия j -го фактора на композит, t – время. Каждая из функций F_j , описывающая воздействие j -го фактора на композит может быть представлена в виде разложения в ряд по систем опорных базисных функций (ОБФ) $\psi_{kj}(\beta_{kj}; t)$, ($k = 1, 2, 3, \dots$), в наиболее полной мере характеризующих особенности процесса увеличения поврежденности материала при воздействии экстремальных факторов внешней среды. В результате общее выражение для ОМД может быть представлено в виде

$$R(; t) = R_0 + \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^{N_j} \alpha_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}) \psi_{kj}[\beta_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j}); t]. \quad (2)$$

В этих обозначениях $\alpha_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j})$, $\beta_{kj}(u_{j,1}, \dots, u_{j,l_j})$, ($j = 1, 2, \dots, p$; $k = 0, 1, 2, \dots$) неопределенные параметры модели, которые характеризуют воздействие j -го фактора. N_j – число слагаемых при разложении j -го фактора в ряд по системе ОБФ.

При разработке новых композиционных материалов с повышенным сроком службы одной из центральных проблем является проблема оценки и долгосрочного прогнозирования срока службы новых композиционных материалов, на основе проведенных натурных климатических испытаний в первые несколько лет. В качестве определяющих характеристик для прогнозирования срока службы СВМПЭ были выбраны относительное удлинение ε_p % и прочность σ_p .

Разрабатываемая методология в рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования [3–9] была применена для оценки влияния на срок службы СВМПЭ стабилизатора марки СО-4. Для оценки срока службы принимались предельные значения работоспособности при относительном удлинении: ε_p % $\approx 30-50\%$, прочность: $\sigma_p \approx 10-15$ МПа. Проведенные вычислительные эксперименты по разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок [3–9] позволили получить достаточно достоверные про-

гнозы срока службы СВМПЭ с добавлением стабилизатора марки СО-4. При этом проведенные вычислительные эксперименты позволили установить, что срок службы СВМПЭ с добавлением стабилизатора марки СО-4 является одинаковым при задании предела работоспособности как по относительному удлинению ε_p %, так и по прочности σ_p . Полученные результаты свидетельствуют о большой достоверности прогноза на основе разрабатываемой методологии прогнозирования в рамках вариационных постановок обратных задач прогнозирования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПНГ ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», Якутск, Россия (номер гос. регистрации 122011100162-9).

Литература

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
2. 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.
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 Intensity 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 Materials, 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. 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.
11. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 446 с.
12. Петухова Е.С., Федоров А.Л. Климатические испытания полиэтиленовых композиционных материалов, содержащих различные стабилизирующие добавки // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. № 4(24). С. 169–178. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-4-16.
13. Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты. СПб: СПбГТУРП, 2015. 31 с.

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

shvec_off@mail.ru

Повышение качества материала коронок зубьев экскаватора является актуальной задачей горнодобывающих компаний. Качество литья коронок зубьев определяет дальнейшую работоспособность детали. Границы дендритов, трещины при кристаллизации которые в последствии эксплуатации распространяются по усталостному механизму выявлены у исследованных коронок, разных производителей. Качество литья и окончательной термической обработки позволит существенно повысить работоспособность горнодобывающего инструмента.

Разработка карьеров твердых пород являются наиболее эффективным методом добычи полезных ископаемых. Добыча твердых пород осуществляется за счет выемки грунта с помощью износостойкого инструмента. Бесперебойная работа горнодобывающего инструмента во многом определяется износостойкостью зубьев ковшей и их коронок [1].

Как показано в работах [2–4], ведущим фактором, определяющим работоспособность зубьев и коронок, является качество литья и стабильность микроструктуры отлитого материала. В связи с этим возникает проблема, повышения качества литых деталей, что особенно важно для сильно неравновесных конструкций отливок ковшовых карьерных экскаваторов. Литая сталь зубьев и коронок ковша экскаватора имеет изначально дефектную микроструктуру в виде микропор, раковин и трещин, а также высокий уровень химической неоднородности – ликвации и сегрегации основных легирующих и примесных элементов, крупные неравномерные первичные зерна [2–5].

В настоящее время большинство работ, которые направлены на разработку методов повышения работоспособности зубьев, посвящены изучению самого процесса изнашивания, данные по изучению структуры и влияния качества материала на износостойкость зубьев и коронок экскаватора практически отсутствуют. Целью настоящей работы является, чтобы проведение металлографических исследований зубьев и коронок ковшей экскаваторов после длительной эксплуатации с целью выяснения причин их ускоренного выхода из строя.

Для исследования предоставлены четыре коронки после эксплуатации: коронка для экскаваторов Cat 391 (ESCO 65SV2AG); коронка для VOLVO 350; коронка для Cat 988 (CAT 467-9815); коронка ЭКГ-10М. Измерение твердости проводились на твердомере TP 5006 № 85 согласно ГОСТ 9013-59. Металлографические исследования образцов проводились с помощью оптического микроскопа Reichert-Jung при увеличении $\times 500$ и приставки для измерения микротвердости MICRO-DUROMAT 4000E согласно ГОСТ 9450-76, метод Виккерса с нагрузкой 180г ($HV_{0,18}$). Для выявления микроструктуры металла образцов использовали 3% раствор азотной кислоты (HNO_3) в спирте. Исследования поверхности износа и микроструктуры проводились с помощью растрового электронного микроскопа SUPRA 55VP WDS с приставкой рентгеноспектрального анализа.

Металлографический анализ образцов коронок показал, что в металле имеются многочисленные дефекты (рис. 1).

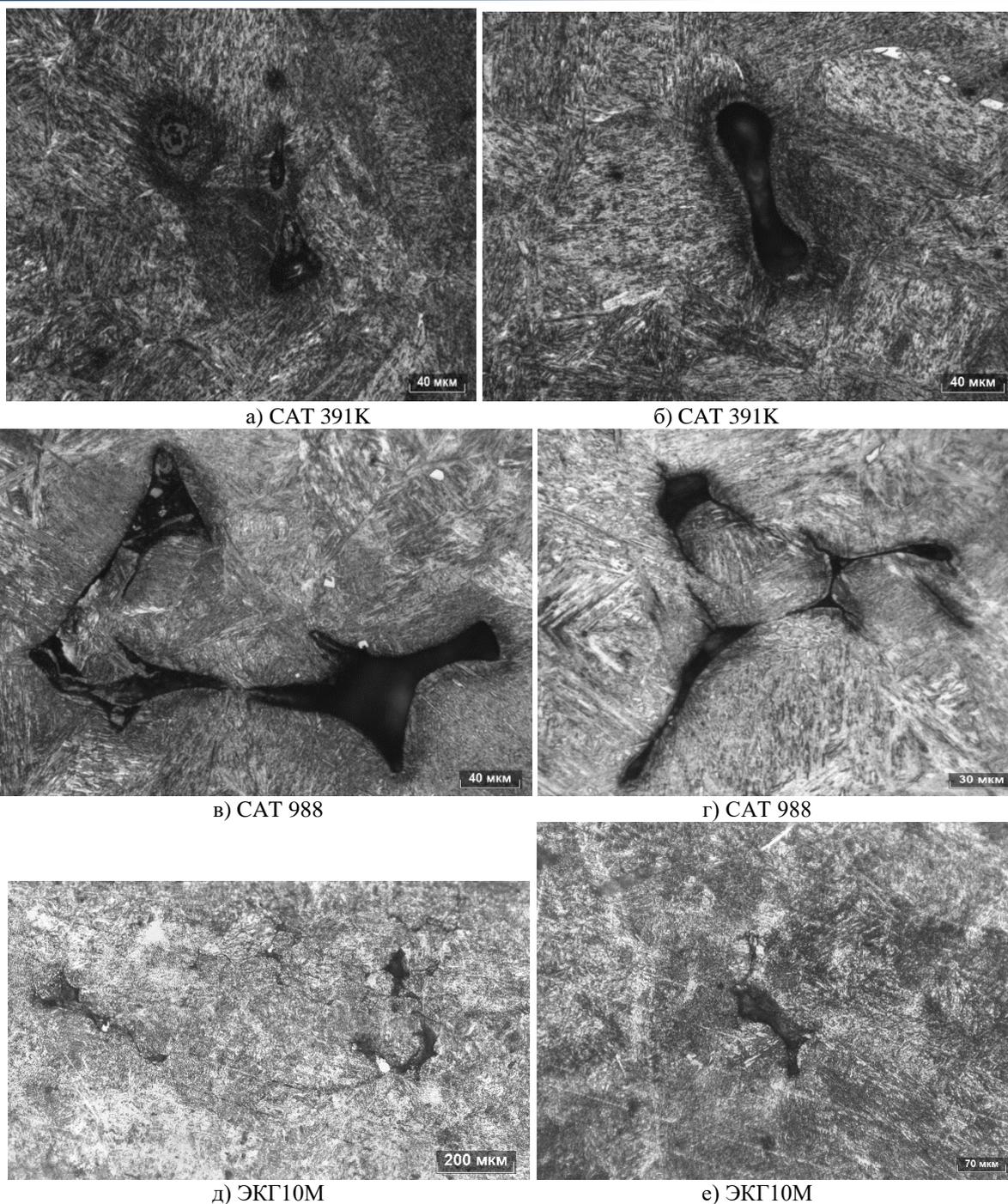
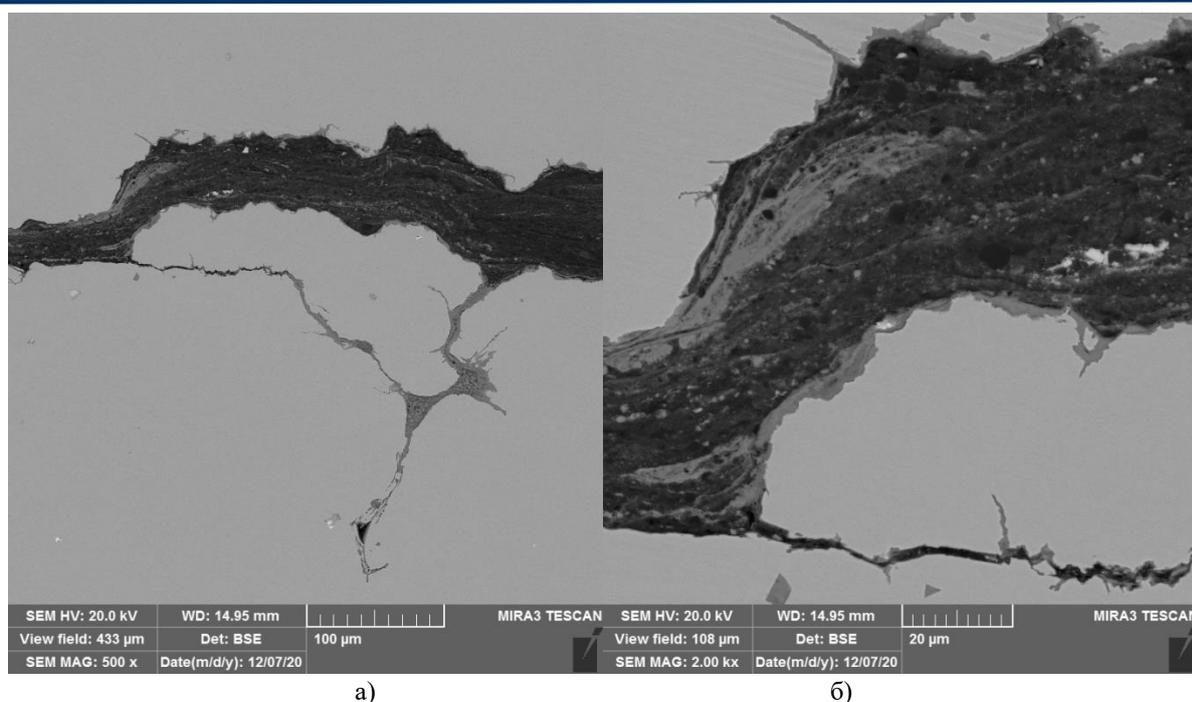


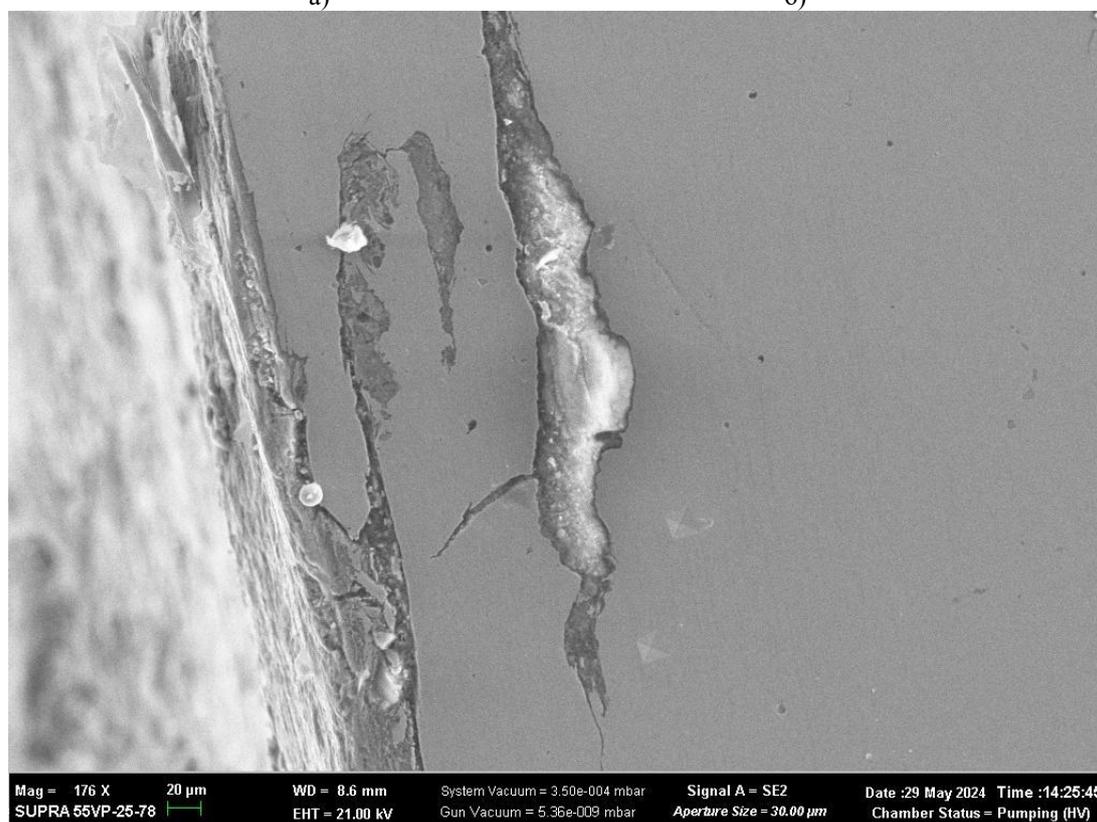
Рис. 1 Литейные дефекты в коронках зубов CAT 391K (а, б); CAT 988 (в, г); ЭКГ10М (д, е)

В основном дефекты оказались крупные междендритные поры литейного происхождения (см. рис. 1). Помимо пор выявлены комплексные трещины разного происхождения, предположительно разных механизмов: первоначальная горячая трещина в результате кристаллизации; усталостная и в результате эксплуатации (см. рис. 2).



а)

б)



в)

Рис. 2. Электронные изображения трещин в металле коронки: а – холодная и горячая части трещины; б-область, где трещина развивается из-за дефектов литья; в- окисленные участки горячей трещины и эксплуатационной трещины

При анализе изображений зарождение трещин происходит в процессе кристаллизации при формировании внутренних концентраторов напряжений, в процессе эксплуатации при её перпендикулярном расположении относительно плоскости контакта и вдоль границ зёрен происходит рост трещины по усталостному механизму. Трещины кристаллизации имеют окисленные, широко раскрытые берега, трещины при эксплуатации имеют малое раскрытие, и практически не окисленные.

Дальнейшее изучение микроструктуры коронок зубьев ковша карьерных экскаваторов показало, что она неравновесная и представляет собой закаленный мартенсит.

Было показано, что микроструктура состоит из участков, различающихся по степени травления, которые можно визуальным образом разделить на участки с лучшим и худшим травлением. «Светлые» участки с худшим травлением структуры соответствуют междендритным участкам литой структуры.

Поскольку твердость является одним из основных показателей износостойкости при эксплуатации в ходе работы были получены результаты измерения макротвердости (табл. 3) и микротвердости (табл. 4) зубьев ковша карьерных экскаваторов.

Таблица 3. Значения твердости образцов (HRC)

Образец	Твердость, HRC			
	1	2	3	Среднее
Cat-391	49	50	50	50
Volvo -350	45	46	45	45
ЭКГ-10М	51	49	49	50

Таблица 4. Значения микротвердости образцов (HRC)

Материал	Область с плохой травимостью	Область с хорошей травимостью
Cat 391K	57	60
Cat 988	55	59
Volvo 350	53	56
ЭКГ -10М	52	46

В соответствии с результатами измерения твердости было установлено, что твердость материала коронок зубьев ковша экскаваторов во всех точках рабочей поверхности практически одинакова и не изменилась по всему объему металла. Согласно табличным данным, микротвердость «светлой» области зубьев ковша экскаватора наихудшее травление происходит меньше, чем на участке с ярко выраженной структурой.

Как следует из полученных результатов, в ходе металлографических исследований были обнаружены крупные дефекты литья. В частности, «горячие» и «холодные» трещины, которые имеют два механизма образования. «Горячая» часть трещины образуется в температурном диапазоне хрупкости, при котором сплав обладает минимальной пластичностью. Механизм образования горячих трещин заключается в следующем: при температурах литья ниже температуры текучести образуется кристаллический каркас, сплав становится хрупким. Начинает сжиматься, теряя способность течь подобно жидкости и приобретая некоторую прочность. Возникающие напряжения достигают предела прочности сплава на разрыв, что приводит к образованию трещин в отливке. Дальнейшее развитие трещины происходит по механизму усталости, что приводит к ускоренному разрушению и выходу из строя зубьев ковша горных экскаваторов, что является причиной ускоренного разрушения.

Результаты по микротвердости показали, что существуют участки с разной микротвердостью, то есть в материале преобладают разные свойства. Разная твердость наблюдается в дендритном и междендритном пространстве. В дендритах твердость выше, а в междендритном пространстве она ниже. Известно, что износ и твердость – взаимосвязанные процессы. В областях с пониженной твердостью (междендритных пространствах) износ происходит быстрее.

Таким образом, основной причиной ускоренного выхода из строя зубьев экскаватора является наложение различных микроструктурных дефектов, связанных с дисбалансом микроструктуры металла и несовершенством технологии процесса литья. Следовательно, для повышения эффективности необходимо не только улучшить качество литья, но и необходимо либо изменить режим охлаждения, либо провести термообработку, чтобы выровнять структуру.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00713, <https://rscf.ru/project/24-29-00713/>

Литература

1. Слепцов О.И., Шульгинов Б.С., Михайлов В.Е., Сивцев М.Н., Слепцов Г.Н. Повышение прочности сварных металлоконструкций горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера. Новосибирск: Наука, 2012. 201с.
2. Гуляев А. П. Металловедение. Москва: Металлургия, 1986. 544 с.
3. Берштейн М.Л. Металловедение и термическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
4. Barrett Ch., Massalsky T., Structure of metals, Metallurgy, 1984. 654 p.
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. Учебник. 4-ое изд., М.: Металлургия, 1986. 480 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-217-219

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИАМИДА 6 В СОСТАВЕ ПКМ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Злобина И. В.^{1,2}, Бекренев Н.В.¹, Чуриков Д.О.¹, Пасечная А.А.¹

¹ СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

irinka_7@mail.ru

Активное развитие Арктики обуславливает поиск решений по использованию широкого спектра материалов, в том числе композиционных, и применение различных методов обработки с целью повышения адгезии на границе компонентов «матрица-волокно», а также устойчивости в широком диапазоне температур. В связи с этим актуальным представляется использование в составе композиционного материала ПА 6 и непрерывных углеродных волокон с последующей электрофизической обработкой для повышения адгезионной прочности.

В настоящее время активно развивается направление, связанное с вопросами расширения применения термопласта ПА 6 как самостоятельного конструкционного материала или в составе композитов [1]. Этот полимер является обладает рядом преимуществ, среди которых высокая жесткость, прочность, химическая и износостойкость [2]. Приведенный спектр свойств ПА 6 делает его актуальным для использования в составе полимерных композиционных материалов (ПКМ). Одним из возможных наполнителей при этом является углеродное волокно (УВ). Оба эти компонента являются перспективными материалами, однако их совместное использование в составе одного композита затруднено. В частности, это обусловлено недостаточной адгезией ПА 6, выступающего в роли матрицы, к УВ. Так в работе [1] задача повышения адгезии решается активацией поверхности УВ. В работе [3] показано применение дополнительного покрытия УВ для повышения адгезионной прочности на границе «матрица-волокно».

Т. о. актуальным представляется поиск решений, направленных на повышение адгезии суперконструкционного полимера ПЭЭК к УВ для расширения использования ПКМ, в том числе в условиях Арктики, что обусловлено значительным диапазоном рабочих температур компонентов.

Целью исследования явилось изучение влияния термоциклирования и УФ воздействия на углепластики, сформированные на основе ПА-6, прошедшие электрофизическую обработку в виде УЗ и СВЧ воздействия.

Для проведения эксперимента, были изготовлены опытные образцы. Использовался метод 3D печати филаментами на основе термопласта ПА-6. В качестве армирующих элементов выступали углеродные волокна, предварительно пропитанные эпоксидной смолой ЭД-20. Размер образцов составлял 40x20x1 мм. Образцы были разделены на 3 группы – контрольные, обработанные с помощью ультразвука (УЗ) и обработанные с помощью СВЧ.

Ультразвуковую обработку образцов осуществляли на экспериментальной ультразвуковой установке с многочастотным ультразвуковым генератором, обеспечивающим частотный диапазон выходного напряжения 20–60 кГц с дискретностью регулировки 10 Гц. Обработку образцов в СВЧ электромагнитном поле осуществляли на экспериментальной СВЧ технологической установке, собранной на базе микроволнового рупорного излучателя «Жук-2-02» производства ООО «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.). Параметры обработки были выбраны на основе предыдущих исследований – частота излучения – 2450 МГц, плотность потока энергии (ППЭ) – $(45–50) \times 10^4$ мкВт/см², время обработки – 2 минуты.

Испытания образцов на светопогодоустойчивость проводили в режиме «температура-влажность-ультрафиолет» в климатической камере «Solarbox 1500E RH» (НИЦ «Курчатовский институт») при следующих условиях: тип излучателя – дуговая ксеноновая лампа; поверхностная плотность энергии интегрального излучения: 1000 Вт/м²; температура стандартной чёрной панели – (45 ± 2) °С; влажность воздуха в камере – $(50 \pm 5)\%$; облучение образцов в непрерывном режиме с одной стороны; без орошения дистиллированной водой.

Проведение испытаний на трехточечный изгиб осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 56805-2015. Определяли значения напряжения при заданной изгибной деформации σ_f .

Учитывая особенности состава и размеров испытуемых образцов, образцы доводили до единого значения деформации (прогиба), определяя при этом величину изгибающей нагрузки и вычисляя значения изгибающих напряжений σ_f .

На рисунке представлены результаты испытаний.

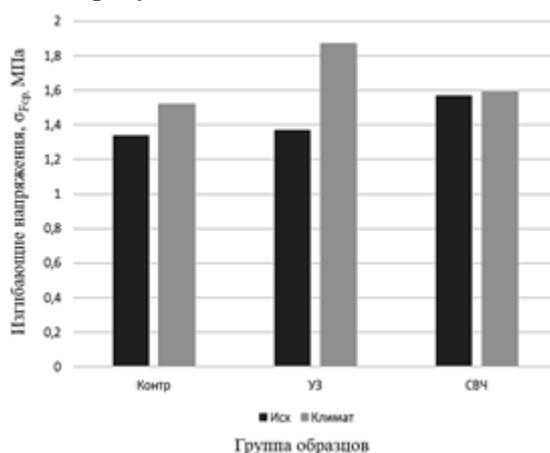


Рис. Изменение изгибающих напряжений при трехточечном изгибе контрольных и опытных образцов монослоя с учетом влияния климатических факторов

Из данных графика видно, что СВЧ обработка позволяет получить статистически значимый прирост (17%) изгибающих напряжений по сравнению с контрольными образцами. Обработка УЗ не дала значимых результатов, прирост составил 2%.

Проводя сравнительный анализ результатов, полученных после климатических испытаний, можно выделить значимое увеличение (по сравнению с образцами этой же группы до климатических испытаний – 36%, по сравнению с контрольными образцами после климатических испытаний – на 22%) изгибающих напряжений у образцов, обработанных УЗ. Группа образцов, прошедшая СВЧ обработку, значимого прироста изгибающих напряжений не показала.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. УЗ обработка является контактной и предполагает сочетание силового и волнового воздействий на образцы. В результате уплотнение компонентов материала происходит физически. Воздействие СВЧ поля является бесконтактным и изменения физико-механических свойств связаны с повышением температуры и конформационными вращениями элементов макромолекул полимеров. Предположительно воздействие ультрафиолета и повышенных температур при испытаниях обеспечило сходные условия. Что и объясняет полученную динамику свойств у различных групп образцов.

Кроме того, была проведена визуальная оценка состояния поверхности образцов после климатических испытаний. Была отмечена выраженная дефектность поверхности образцов контрольной группы, что проявилось в виде локальных отслоений полимера и частичной утраты его областей. Образцы обеих опытных групп не имели выраженных дефектов поверхности.

Таким образом, полученные в ходе испытаний результаты коррелируют с данными, приведенными в литературных источниках, и показывают эффективность электрофизической обработки исследованных композитов. Механизмы, лежащие в основе полученных эффектов, нуждаются в дополнительном, более детальном изучении.

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-79-00039 «Обоснование методологии комплексного модифицирования композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации на основе изучения фазово-структурных превращений под влиянием электрофизических воздействий различного частотного диапазона».

Литература

1. Хассан Е. А. М., Эль-Абид А. Е. А., Башир Е. О., Элагиб Т. Х. Влияние модификации углеродных волокон на механические свойства полиамидных композитов для автомобильных применений // Механика композитных материалов. 2022. Т. 58. № 2. С. 369–382
2. Arsad A., Rahmat A. R., Hassan A., Iskandar S. N. Mechanical and rheological characterization of PA6 and abs blends-with and without short glass fiber // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, № 29, P. 2808–2820.
3. Dike A. S. Improvement of mechanical and physical properties of carbon fiberreinforced polyamide composites by applying different surface coatings for short carbon fiber // Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2020, Vol. 33. № 4, P. 541–553.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-219-223

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ СМЕШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПТФЭ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН

Исакова Т.А., Петрова П.Н., Маркова М.А.

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

tanchik1985@mail.ru

В данной работе изучено влияние способов смешения компонентов на деформационно-прочностные и триботехнические свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и углеродных нановолокон УНВ-01, УНВ-02, УНВ-03. Рассмотрены две технологии получения полимерных композитов: 1) простое смешение компонентов в лопастном смесителе (технология № 1), 2) поэтапное смешение наполнителя с ПТФЭ с использованием технологии совместной активации компонентов (технология № 2). При введении наполнителя УНВ-01 до 5 масс.% по технологии № 1 износостойкость повышается в 70 раз, УНВ-02 в 317 раз, УНВ-03 в 54 раза. При исследовании ползучести композитов, было выявлено, что технология простого смешения снижает ползучесть полимерных композитов в 8 раз по сравнению с исходным политетрафторэтиленом и в 3,6–4,5 раза по сравнению с композитами, полученными с применением механоактивации.

При разработке новых композиционных материалов на основе политетрафторэтилена ПТФЭ важное значение имеет применение различных технологий в стадии изготовления изделий. Существуют различные методы обработки ПТФЭ: радиационное модифицирование, совместная механоактивация наполнителей и полимерной матрицы, активация самой полимерной матрицы, пластическое деформирование и т. д. [1, 2]. А также немаловажную роль играет выбор наполнителя для ПТФЭ. В последнее время углеродные нановолокна УНВ привлекли большое внимание ученых своими термическими, электрическими и механическими свойствами по сравнению с другими наполнителями. Отличные механические свойства, высокое соотношение сторон (диаметр/длина) и низкая плотность УНВ делают их пригодными для армирования при разработке полимерных композитов (нанокомпозитов). Благодаря своим исключительным свойствам и низкой стоимости, они нашли применение в различных материалах [3, 4].

Цель данной работы выявить влияние способов смешения компонентов на свойства композитов на основе ПТФЭ и углеродных нановолокон.

ПТФЭ – фторопласт-4 (Ф-4) был выбран марки ПН, ГОСТ 10007-80. В качестве наполнителей являлись углеродные нановолокна (УНВ-01, УНВ-02, УНВ-03) производства Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. Образцы УНВ были получены в проточном кварцевом реакторе (ООО «Щёлковский катализаторный завод», Щёлково, Московская область, Россия) в результате каталитического пиролиза ($T = 550-650^{\circ}\text{C}$) двух типов углеводородов (C_2H_4 и смесь C_3+C_4) в течение 60 мин на никель-медных катализаторах. Тип упаковки УНВ – стопчатый, волокна в диаметре не превышают 0,5 мкм.

В работе рассмотрены для сравнения 2 технологии: 1) простое смешение компонентов в лопастном смесителе (технология № 1), 2) поэтапное смешение наполнителя с ПТФЭ с использованием технологии совместной активации компонентов (технология № 2). Механическую активацию 50% части ПТФЭ и наполнителя проводили в планетарной мельнице «Pulverisette 5» с частотой вращения 400 об/мин в течение 2 минут, после чего активированную порошковую композицию смешивали с остальной частью полимера [5]. Образцы для испытаний получали методом холодного формования при удельном давлении 50 МПа с последующим спеканием до 380°C и свободным охлаждением до комнатной температуры согласно стандартной технологии переработки композитов на основе ПТФЭ.

Для начала была проведена апробация технологии № 1 получения композитов ПТФЭ/УНВ. Наполнители вводили путем смешивания в лопастном смесителе при 3000 об/мин при концентрации до 5 масс.%. Зависимость деформационно-прочностных и триботехнических характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) от концентраций УНВ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость деформационно-прочностных и триботехнических характеристик ПКМ от концентрации УНВ

Состав	σ_p , МПа	ϵ_p , %	E_p , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа			I, мг/ч	f
				5%	10%	25%		
ПТФЭ	20	310	470	10	14	23	221,9	0,16
ПТФЭ+0,5%УНВ-01	25	313	453	12	14	24	10,8	0,19
ПТФЭ+1%УНВ-01	25	306	463	12	15	25	15,8	0,21
ПТФЭ+2%УНВ-01	20	203	527	12	15	26	11,0	0,24
ПТФЭ+5%УНВ-01	18	10	332	13	17	28	3,2	0,18
ПТФЭ+0,5%УНВ-02	13	317	360	14	18	25	11,4	0,21
ПТФЭ+1%УНВ-02	20	433	371	13	17	23	3,8	0,25
ПТФЭ+2%УНВ-02	16	344	345	13	17	23	2,9	0,24
ПТФЭ+5%УНВ-02	9	35	335	12	16	27	0,7	0,24
ПТФЭ+1%УНВ-03	21	419	461	14	18	28	11,8	0,18
ПТФЭ+2%УНВ-03	20	390	491	14	18	28	7,9	0,22
ПТФЭ+5%УНВ-03	12	85	512	15	20	30	4,1	0,20

При концентрации до 1 масс.% УНВ-01 прочности при растяжении и сжатии композитов повышаются на 25% и 13% соответственно, но при этом скорость массового изнашивания снижается всего лишь в 14 раз. Остальные характеристики остаются на уровне исходного полимера. В случае увеличения концентрации до 2 масс.% происходит некоторое уменьшение

относительного удлинения при разрыве, что может быть связано с образованием более жесткой структуры. При увеличении концентрации УНВ-01 в пределах до 5 масс.% происходит резкое снижение относительного удлинения при разрыве и повышение износостойкости до 70 раз по сравнению с ПТФЭ.

Другая картина наблюдается при использовании в качестве наполнителя УНВ-02 (Таблица 1). Частицы УНВ, введенные в объем ПТФЭ в малых количествах (0,5–1,0 масс.%) оказывают «смягчающее» действие, выражающееся в увеличении деформируемости полимерного композита. Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве снижаются при увеличении содержания УНВ-02 до 5 масс.%, но происходит интенсивное снижение скорости массового изнашивания, что возможно связано с воздействием металлических частиц катализатора на триботехнические характеристики композитов.

Показано, что введение УНВ-03 также приводит к снижению прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве ПКМ, но повышает прочность при сжатии на 30% и износостойкость ПКМ в 52 раза, а модуль упругости ПКМ увеличивается в некоторой степени.

Затем апробировали технологию № 2 на композитах с содержанием УНВ-02 и УНВ-03 в количестве 5 масс.% (таблица 2).

Таблица 2. Зависимость деформационно-прочностных и триботехнических характеристик ПКМ от концентрации УНВ-02 и УНВ-03 по технологии № 2

Состав	σ_p , МПа	ε_p , %	E_p , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа			I, мг/ч	f
				5%	10%	25%		
ПТФЭ	20	310	470	10	14	23	221,9	0,16
ПТФЭ+5%УНВ-02 технология № 1	9	35	335	12	16	27	0,7	0,24
ПТФЭ+5%УНВ-02 технология № 2	18	245	538	14	17	26	0,6	0,23
ПТФЭ+5%УНВ-03 технология № 1	12	85	512	15	20	30	4,1	0,20
ПТФЭ+5%УНВ-03 технология № 2	15	159	543	14	17	25	2,2	0,23

Как видно из таблицы 2 применение совместной механоактивации наполнителя с ПТФЭ в планетарной мельнице (технология № 2) приводит к повышению деформационно-прочностных показателей и износостойкости ПКМ по сравнению с композитами, полученными по технологии простого смешения. Износостойкость композита с УНВ-02 при этом повышается с 317 до 370 раз, а композита с УНВ-03 с 54 до 100 раз по сравнению с исходным ПТФЭ.

Одним из основных недостатков ПТФЭ является не только низкая износостойкость, но и повышенная ползучесть, что ограничивает ресурс работы и возможность его широкого использования. По причине хладотекучести фторопластовых уплотнений происходит несоблюдение герметичности при повышении давления, что приводит к выходу из строя данного фторопластового изделия.

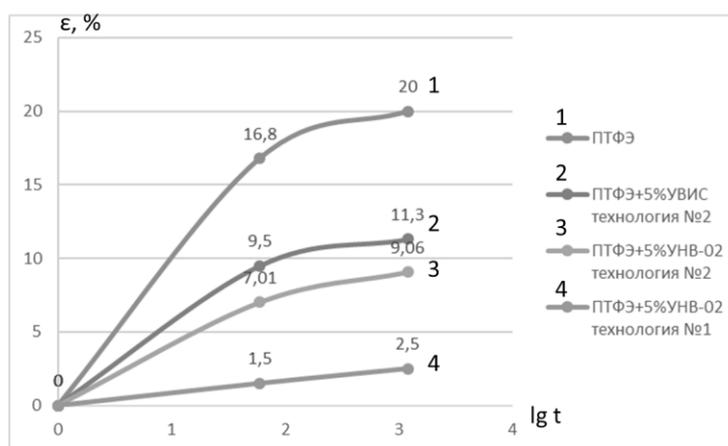


Рисунок. Зависимость относительного удлинения от логарифма времени при напряжении 5 МПа

Проведено исследование ползучести при растяжении ПТФЭ и композитов на его основе с применением разных технологий (рис.), и для сравнения также исследовали изменение деформации под воздействием постоянной нагрузки 5 МПа во времени ПТФЭ-композита с содержанием углеродного микроволокна марки УВИС-АК-П (рис., кривая 2). Установлено, что модифицирование ПТФЭ УНВ приводит к повышению сопротивляемости композитов к деформациям ползучести, при этом использование технологии простого смешения компонентов показало более существенное снижение ползучести ПТФЭ по сравнению с композитом, полученного по технологии № 2. Показано, что ползучесть ПКМ, полученного простым смешением компонентов (технология № 1), ниже в 8 раз по сравнению с исходным ПТФЭ, в 3,6 раза по сравнению с композитом, полученным с применением механоактивации компонентов, и в 4,5 раза снижена по сравнению с композитом с УВИС-АК-П. Известно, что нарастание деформации материала во времени связано с изменением конформации сегментов полимерных макромолекул, разрывом межмолекулярных связей и их рекомбинацией, образованием микротрещин в материале [6]. Повышение сопротивляемости к деформациям ползучести ПКМ с нановолокнами, видимо, связано тем, что наличие в полимерной системе хаотически распределенных дискретных нановолокон увеличивает суммарную поверхность раздела фаз в системе, изменяет условия перераспределения напряжения в ней вследствие образования новых очагов зарождения микротрещин, а также преград при их развитии и прорастании, что более эффективно по сравнению с микроволоконными тормозит и осложняет рост и накопление макроразрушений. Для дальнейшего продвижения трещин, возникших в наполненном полимере, необходимы либо повышение приложенного усилия, либо увеличение продолжительности процесса накопления повреждений в композите под влиянием неизменной нагрузки [7].

Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что использование УНВ-02 в качестве наполнителя ПТФЭ перспективно для получения ПКМ с повышенной износостойкостью и сопротивляемостью к деформациям ползучести.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. Обвинцев А.Ю., Садовская Н.В., Хатипов С.А., Бузник В.М. Влияние гамма-облучения на поверхностные и объемные свойства политетрафторэтилена // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017. № 9. С. 52–60.
2. Петрова П.Н., Маркова М.А. Влияние технологии пластического деформирования на механические свойства композитов на основе политетрафторэтилена // Перспективные материалы, 2024. № 4. С. 66–76.

3. Tibbetts G.G., Lake M.L., Strong K.L., Rice B.P. A review of the fabrication and properties of vapor-grown carbon nanofiber/polymer composites // *Composites Science and Technology*, 2007. V. 67(7–8). P. 1709–1718.

4. Chen, Y., Tu, C., Liu, Y., Liu P., Gong P., Wu G., Huang X., Chen J., Liu T., Jiang J. Microstructure and mechanical properties of carbon graphite composites reinforced by carbon nanofibers // *Carbon Letters*, 2023. V. 33 (2). P. 561–571.

5. Markova M.A., Petrova P.N. Development of Wear-Resistant Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Carbon Fibers of UVIS-AK-P Brand // *Materials Science Forum*, 2019. V. 945. P. 327–332.

6. Александров В.Н. Механические свойства полимерных материалов: учебное пособие. Казань: КНИТУ, 2011. 83 с.

7. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-223-226

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПОСЛЕ НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Кычкин А.А.^{1,2}, Кычкин А.К.², Сивцев С.И.³, Гаврильева А.А.²

¹ ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН, г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

³ Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

icen.kychkin@mail.ru

В данной работе приведены результаты исследования полимерных композиционных материалов, экспонированных в течении 12 месяцев на открытом полигоне ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в г. Якутске в очень холодном климате под воздействием естественных климатических факторов методом ядерного магнитного резонанса. В области полимерных композитов ЯМР позволяет получать информацию о составе, распределении компонентов и взаимодействиях между ними. Данные ЯМР могут быть использованы для оптимизации свойств композиционных материалов, например, для улучшения их прочности и термостойкости.

В качестве связующего материала для полимерных композитных материалов (ПКМ) наибольшее практическое применение в промышленности получили эпоксидные связующие, отвержденные ангидридами дикарбоновых кислот (ЭДИ). Из-за сочетания в себе высоких механических и адгезионных характеристик к армирующим волокнам, технологичности связующих – обеспечивая создание высокопроизводительных процессов пропитки армирующих элементов, формования и окончательного получения изделия.

ПКМ конструкционного назначения представляют большой интерес для изучения эксплуатационной стойкости и стойкости к климатическим воздействиям в различных условиях и зонах применения данных материалов [1–3].

Основным показателем оценки климатического воздействия для ПКМ является изменение механических свойств, предела прочности и модуль упругости при растяжении, изгибе, сжатии и межслоевого сдвига. Авторами [4] был проведен анализ влияния климата на механические свойства ПКМ по данным отечественных и зарубежных источников и выявлены показатели более 30% случаев улучшения механических показателей после пребывания ПКМ в открытых климатических условиях. В большинстве случаев увеличения показателей объясняется эффектами доотверждения полимерной матрицы [5–6], но не раскрывается какие именно структурные изменения происходят в ПКМ под воздействием климатического фактора.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) является мощным инструментом для исследования структуры и динамики молекул. В области полимерных композитов ЯМР позволяет получать информацию о составе, распределении компонентов и взаимодействиях между ними. Этот метод особенно полезен для изучения гетерогенных систем, таких как смеси полимеров и наполненные полимеры. В целом, ЯМР является ценным инструментом для понимания и разработки новых композиционных полимерных материалов. Ранее в докладе представлена работа методом ЯМР [7] где подтверждена доотверждение полимерного пластика, где анализ пиков с соответствующими углеродами в ароматической части спектра полимерного пластика после 12 месяцев выставления в открытом полигоне в условиях очень холодного климата, наблюдается отсутствие пиков карбонильной группы.

В работе представлены результаты ЯМР исследования после натурального климатического воздействия композиционных материалов полученных вакуумной инфузией и отраженные в работах [8–10].

На рисунке 1 представлен спектр отвержденной полимерного пластика на основе эпоксидной смолы и композиционный материал на его основе с базальто-тканый материал. Спектры ^{13}C -ЯМР высокого разрешения в твердом теле регистрировались на приборе “Bruker AVANCE III 400” на частоте 100 МГц с использованием стандартной методики кросс-поляризации и вращением под магическим углом (CPMAS). Все спектры снимались с образцами, помещенными в ротор диаметром 4 мм со скоростью вращения 8 кГц.

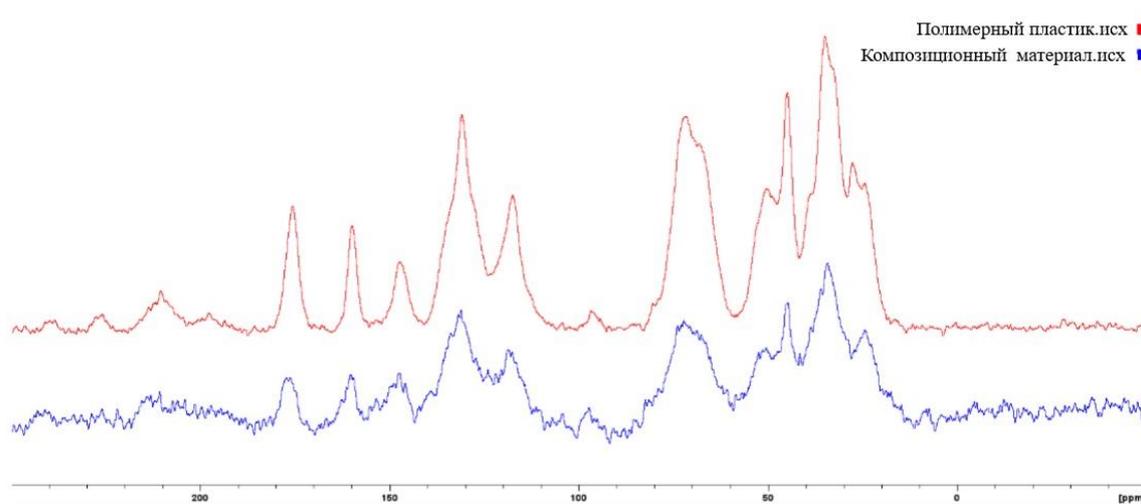


Рис. 1. Связь пиков с соответствующими углеродами в ароматической части спектра полимерного пластика и композиционного материала на его основе

На рисунке 2 представлены спектры композиционного пластика до и после воздействия естественных климатических факторов после 12 месяцев.

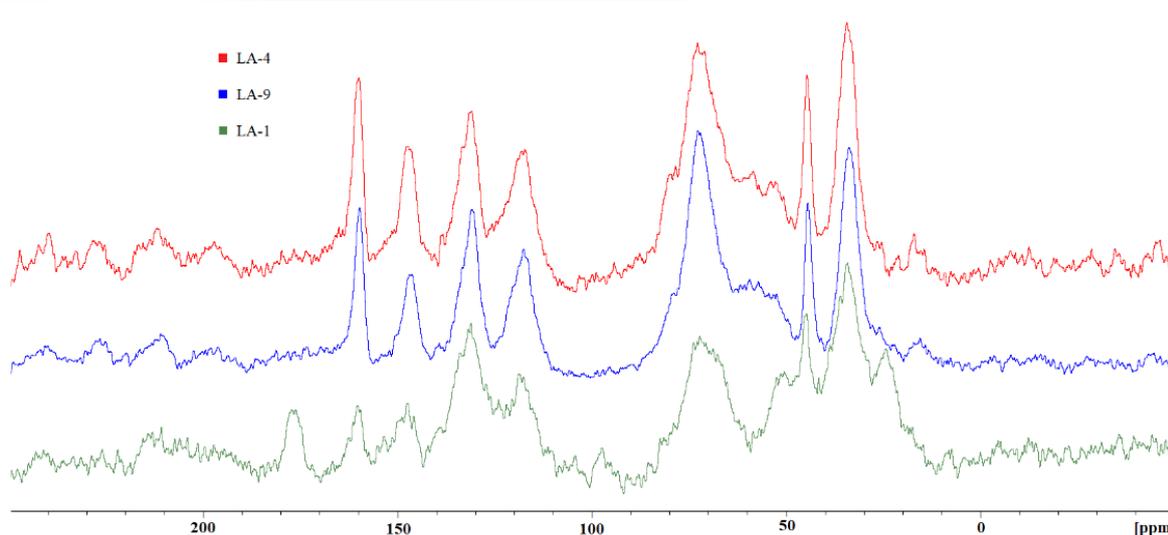


Рис. 2. Твердотельный ^{13}C -ЯМР спектр. LA-1 исходный образец; LA-4 и LA-9 образцы композиционного пластика на основе базальтовой и стеклянной ткани

Твердотельный ^{13}C -ЯМР спектр образцов предназначен для анализа структуры углеродсодержащих соединений. В данном случае, углеродсодержащим соединением является отвержденная эпоксидная смола, используемая в композитных материалах. По спектру видно, что после климатических испытаний у исходного спектра исчезают пики при 175–179 и 22–27 ppm, и появляется сигнал при 53–63 ppm, что может указывать на сшивку о фрагменте структуры отвердителя в связующем (уменьшение количества карбоксильных групп) и окисление алифатической части до спиртов.

Заключение. Полученные данные позволят оценить эксплуатационные характеристики материалов, что является важным шагом в изучении долговечности полимерных материалов. Полученные данные послужат основой для дальнейших научных изысканий методом ядерно-магнитного резонанса для полимерных пластиков и композиционных материалов на их основе. Ядерно-магнитный резонанс является мощным инструментом для изучения химических связей. Этот метод позволяет определить структуру и динамику молекул, а также взаимодействие между ними. В контексте климатических воздействия, ЯМР может быть использован для изучения влияния различных факторов на образование и разрыв химических связей в полимерном пластике и композиционных материалов на их основе. Эти данные могут быть использованы для разработки новых материалов и технологий, которые будут более устойчивы к климатическим факторам. Таким образом, ЯМР играет важную роль в понимании и решении проблем в изучении материаловедения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FWRS-2024-0058). Исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН.

Литература

1. Maxwell A.S., Broughton W.R., Dean G., Sims G.M. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials. NPL Report DEPC MPR 016, 2005. P. 84.
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. P. 323–329.
3. Kychkin A.K. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities / A.K. Kychkin, A.A. Gavrilieva, A.A. Kychkin, I.G. Lukachevskaya, M.P. Lebedev // Polymers. – 2024. – Vol.16. – Article number 866. – DOI: 10.3390/polym16070866.

4. 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). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnyy-analiz-vliyaniya-klimata-na-mehaniicheskie-svoystva-polimernyh-kompozitsionnyh-materialov-po-dannym-otechestvennyh-i-zarubezhnyh-istochnikov> (дата обращения: 19.06.2024).
5. Nishizaki I., Sakurada H., Tomiyama T. Durability of pultruded GFPR through ten-year outdoor exposure test // *Polymers*. 2015. Vol. 7. P. 2494–2503.
6. Николаев Е.В., Барботько С.В., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Гращенков Д.В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. № 6. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-11-11.
7. Кычкин А.А., Сивцев С.И., Кычкин А.К. Исследование полимеров после воздействия климатического фактора в очень холодном климате методом ядерного магнитного резонанса. Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата // *Сборник трудов III Всероссийской конференции, посвященной 25-летию Института проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, 10–13 сентября 2024 года.* – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2024. – С. 205–209. – DOI 10.24412/ci-37255-2024-1-205-209.
8. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Туисов А.Г. Создание гибридных композиционных полимерных материалов для исследования взаимосвязей «состав-структура-технология» при длительном воздействии климатических факторов // *EURASTRENCOLD-2022: Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 года / Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.* – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2022. – С. 250–257. – EDN DOETUW.
9. Копырин М.М. Исследование упруго-прочностных свойств гибридных композиционных пластиков / М. М. Копырин, А. Е. Марков, А. Н. Иванов [и др.] // *EURASTRENCOLD-2022 : Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 года / Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН.* – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2022. – С. 233–237. – EDN VKESCV.
10. Кычкин А.А. Прочностные свойства комбинированных полимерных композиционных пластиков из базальто-угле- тканей, полученных методом инфузии / А.А. Кычкин, А.К. Кычкин, А. Г. Туисов [и др.] // *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. 324–329. – EDN BVCDPY.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ ПРИ ПРОВОКАЦИОННОМ БИОЗАРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ

Кычкин А.К.¹, Лукачевская И.Г.^{1,2}, Кычкин А.А.^{1,2}, Салтыкова А.Л.², Далбаева Е.А.²,
Габышев А.А.², Терешкин А.Л.²

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

² Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

mirkin1611@gmail.com

Анализ результатов исследования влияния экспонирования в экстремально-холодном и арктическом климате на деформационно-прочностные показатели базальтопластиковой арматуры (БПА) диаметром 6 мм показывает, что прочность БПА после 24 месяцев экспонирования повышается на 8%, а при провокационном микробиологическом поражении прочность на растяжение снижается в климатических условиях г. Якутска на 18%, п. Тикси – на 16%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что существует риск существенного влияния на прочностные свойства полимерных композиционных материалов в условиях Севера и Арктики при их микробиологическом поражении.

Освоение арктических регионов привлекает повышенное внимание исследователей к проблеме старения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в холодном климате [1–3]. В открытых климатических условиях в ПКМ основными причинами старения считаются физико-химические превращения, происходящие в полимерных матрицах, такие как гидролиз, доотверждение, набухание, пластификация, структурная релаксация, вызывающие необратимое изменение их механических свойств [3–5]. Указанная закономерность в полной мере распространяется и на базальтопластики [6]. В последнее время особое место в исследовательских работах занимает изучение процессов деструкции ПКМ под влиянием бактериальных и мицелиальных форм микроорганизмов. Проблема биоповреждений является междисциплинарной в научном значении и многоотраслевой – в практическом. Она включает в себя изучение механизмов биоповреждений, выбор мер защиты материалов от биодеструкции, разработку и применение методов исследования биологических повреждений. Многообразие методов связано, с одной стороны, с широким кругом организмов, являющихся агентами биоповреждений, а с другой – с большим спектром новых создаваемых материалов. Целью работы является оценка риска снижения прочностных свойств ПКМ при их провокационном микробиологическом поражении.

Материалы исследований. В целях проведения исследований были отобраны образцы случайной выборкой из промышленной партии БПА, представляющие собой однонаправленные базальтопластиковые стержни периодического профиля диаметрами 6, 8, 10, полученные на технологической линии «Струна» (Бийский завод стеклопластиков, БЗС 1623.00.00ПС) на основе базальтового ровинга РБН 13-2400-4С, полученного ООО «ТБМ» (г.Якутск) из Васильевского месторождения Республики Саха (Якутия), согласно ТУ 2296-001-86166796-2013 «Арматура неметаллическая композитная из базальтопластика». Исходное связующее, основу которого составляет эпоксидиановая смола ЭД-22, отверждаемая изо-метилтетрагидрофталевым ангидридом (изо МТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-трис(диметиламинометил)фенола (УП-606/2) изготавливали по рецептуре согласно РТП-КП-2296-001-86166796-2012.

Результаты исследования. В таблице 1 представлены результаты изменения прочностных характеристик после экспонирования образцов в условиях экстремально холодного климата (г. Якутск) и Арктической зоне (п. Тикси) и образцов БПА с провокационным био­заражением после их 2-летнего экспонирования.

Таблица 1. Прочностные показатели БПА диаметром 6 мм, экспонированных в открытых климатических условиях экстремально-холодной и арктической зон

Этапы и зоны экспонирования	Показатель	Значение показателя, МПа	Коэффициент сохранения, K
Исходное состояние	σ_v	1120	1
	$\sigma_{и}$	1023	1
	σ_c	410	1
Якутск, 28 мес.	σ_v	1206	1,08
	$\sigma_{и}$	1115	1,08
	σ_c	428	1,04
Якутск, 51 мес.	σ_v	1275	1,14
	$\sigma_{и}$	1022	0,99
Якутск, биозараженные, 12 мес.	σ_e	910	0,81
Якутск, биозараженные, 24 мес.	σ_e	920	0,82
Тикси, биозараженные, 12 мес.	σ_e	997	0,89
Тикси, биозараженные, 24 мес.	σ_e	941	0,84

Из анализа влияния экспонирования в экстремально-холодном и арктическом климате на деформационно-прочностные показатели БПА диаметром 6 мм видно, что при провокационном микробиологическом поражении прочность на растяжение снижается уже после 12 мес. экспонирования. После 24 месяцев: в климатических условиях г. Якутска на 18%, п. Тикси – на 16%. Без микробиологического поражения прочность БПА после 51 месяцев не претерпевают существенных изменений. Полученный результат повышения вызван доотверждением эпоксидной матрицы [7].

Для определения открытой пористости образцов базальтопластиковой арматуры (БПА) применялся апробированный метод гидростатического взвешивания [8] и согласно ПНСТ 532-2021. Пористость исходных образцов определялась случайной выборкой из стержней складского хранения в течение 5 лет. Измерения были проведены на образцах БПА с диаметрами 6, 8 и 10 мм. Для проведения измерений были вырезаны по 5 образцов из стержней БПА с длинами по 30 мм.

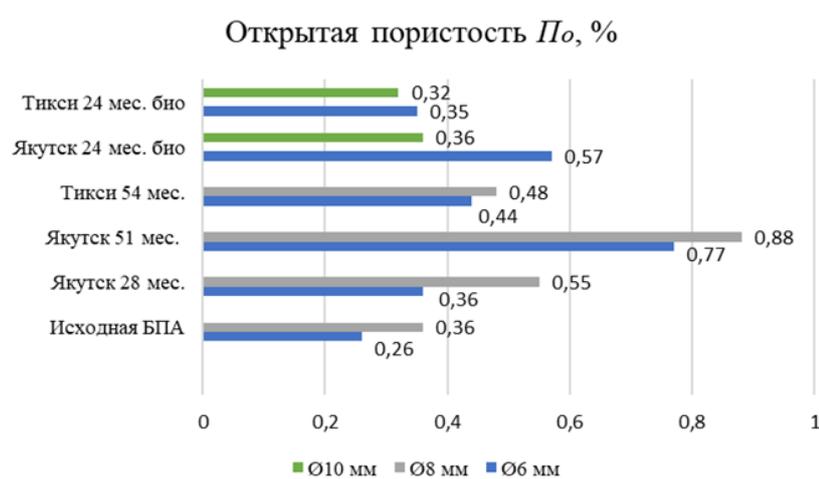


Рис. 1. Средние значения открытой пористости БПА с разными диаметрами, экспонированные в г. Якутске и п. Тикси

На рис. 1 показаны результаты измерений открытой пористости БПА с различными диаметрами и экспонированные при различных условиях и сроках. Для сравнения результатов, также была определена открытая пористость исходной БПА из образцов складского хранения.

Как показывают результаты измерений, открытая пористость БПА диаметром 6 мм в условиях г. Якутска возрастает в течение всего срока экспонирования с 0,26% до 0,77%, до 3 раз, у БПА с диаметром 8 мм, открытая пористость возрастает до 2,5 раз. Пористость поверхностного слоя P_n : у БПА 6 мм с 0,14% до 0,26%, а у БПА 8 мм с 0,03% до 0,3%.

Проведенные измерения открытой пористости БПА, экспонированных в п. Тикси, показывают, что открытая пористость БПА с диаметром 6 мм возрастает с 0,26% до 0,44%, а у БПА с диаметром 8 мм – с 0,36% до 0,48%. Пористость поверхностного слоя с 0,14% до 0,37% у 6 мм БПА и с 0,03% до 0,19% у 8 мм БПА.

При этом, пористость поверхностного слоя составляет до 30% от открытой пористости у образцов, экспонированных в климатической зоне г. Якутска, а у образцов, экспонированных в п. Тикси – до 80% от общей.

Как видно, наибольшее увеличение открытой пористости показали биозараженные БПА, экспонированные в г. Якутске. При этом, пористость поверхностного слоя для диаметра 6 мм составляет 65% от общей пористости, для диаметра 10 мм – 39% в условиях г. Якутска. В климатических условиях Арктики: для диаметра 6 мм – 51%, для диаметра 10 мм – 28%.

При сравнении открытой пористости с исходной (незараженной) БПА в климатических условиях г. Якутска открытая пористость повысилась в 2,19 раза, в условиях Арктики – в 1,34 раза, при этом наличие микропор, образованных при экспонировании в течение 24 месяцев внутри образца, в условиях г. Якутска повысилось на 67%, а в условиях п. Тикси на 42%.

О наличии и образовании микропор внутри образцов свидетельствуют проведенные исследования на монолитность красителем «фуксин» (табл. 4).

Таблица 4. Результаты испытания на монолитность образцов диаметрами 6, 10 мм БПА после биозаражения в г. Якутске и п. Тикси

Маркировка	Число проявлений красителя на торце образца, кол-во	Время до момента проявления первой точки красителя на торце образца, мин
БПА Тикси био 6 мм	22	20
БПА Тикси био 10 мм	134	20
БПА Якутск био 6 мм	23	35
БПА Якутск био 10 мм	10	40

По результатам проведения испытания на монолитность наибольшее число проявления красителя внутри образцов наблюдалось у базальтопластиковой арматуры, экспонированной в п. Тикси, и меньшее для образцов, экспонируемых в г. Якутске. Результат исследований на монолитность показывает, что на стороне БПА, которая подвергалась солнечному излучению, проникновение красителя идет интенсивнее, заполняя поверхностные слои, подвергнутые деградации. У биозараженных образцов время до момента проявления первой точки красителя на торце образца меньше в 4 раза, что констатирует о более высокой размерности образованных пор. Можно предположить, что присутствие таких пор и трещин предоставляет микроорганизмам возможность свободно проникать в структуру материала, заполнять их и продолжать там свой рост. Со временем, при наличии благоприятных условий, микроорганизмы могут активно участвовать в ускорении разрушения материалов и ухудшении их физических свойств.

Заключение. Наибольшее увеличение открытой пористости показали биозараженные БПА, экспонированные в г. Якутске. При этом, пористость поверхностного слоя для диаметра 6 мм составляет 65%, для диаметра 10 мм – 39% в климатических условиях г. Якутска. В арктических условиях п. Тикси, для диаметра 6 мм – 51%, для диаметра 10 мм – 28%.

При сравнении открытой пористости с исходной (незараженной) БПА в климатических условиях г. Якутска открытая пористость повысилась в 2,19 раза, в условиях Арктики – в 1,34 раза, при этом наличие микропор, образованных при экспонировании в течение 24 месяцев внутри образца, в условиях г. Якутска повысилось на 67%, а в условиях п. Тикси на 42%.

Анализ результатов исследования влияния экспонирования в экстремально-холодном и арктическом климате на деформационно-прочностные показатели БПА диаметром 6 мм показывают, что при микробиологическом поражении прочность на растяжение снижается: в г. Якутске на 18%, в п. Тикси на 16%. Без микробиологического поражения прочность на растяжение БПА повышается на 8%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что микробиологическое поражение влияет на прочностные свойства полимерных композиционных материалов и ускоряют разрушение материала в условиях Севера и Арктики.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0095) и с использованием научного оборудования ЦКП Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН.

Литература

1. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. Москва, 2018 . 308 с.
2. 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. // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Том 1. Якутск, 24–29 июня 2013 г. Якутск, Ахсаан, 2013, С. 5–7.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников. // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2. С. 47–58.
4. Pochiraju K. V. [et all.]. Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites // Long-Term Durability of Polymeric Matrix Composites / под ред. Pochiraju K. V., Tandon G.P., Schoepner G.A. Boston, MA: Springer US, 2012. 677 p.
5. Ageing of composites / ed. Martin R. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. 544 p.
6. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. The effects of aggressive environments on the mechanical properties of basalt plastics // Heliyon. 2020. Vol. 6, No 3. Article e03481.
7. Startsev V.O., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Influence of moderately warm and extremely cold climate on properties of basalt plastic armature // Heliyon. 2018. Vol. 4. Article e01060.
8. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Подымова Н.Б., Сидорова Е.В., Школьников Е.И. Определение пористости газотермических покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 5. С. 71–77.

DOI: 10.24412/ci-37269-2024-1-230-234

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ БОРИДНЫХ СЛОЕВ НА ШТАМПОВЫХ СТАЛЯХ

Мишигдоржийн У.Л.¹, Улаханов Н.С.¹, Гуляшинов П.А.², Тихонов А.Г.³,
Нгуен Ван Вин³, Балановский А.Е.³

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

² Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

undrakh@ipms.bscnet.ru

Способность сопротивления коррозии является одним из основных свойств металлических изделий, работающих в условиях агрессивных и влажосодержащих сред. Такие методы поверхностного упрочнения сталей и сплавов как борирование и бороалитирование позволяют значительно повысить физико-механические свойства изделий, в том числе коррозионную стойкость. В настоящей работе проведено упрочнение сталей 5ХНМ и 3Х2В8Ф упомянутыми методами и проведена оценка их коррозионной стойкости с помощью потенциостат–гальваностата “ПИ-50-Pro” в 3% растворе NaCl. Борирование проводили в насыщающих пастах из карбида бора, алюминия (только при бороалитировании) и фторида натрия в качестве активатора при температуре 950 и 1050 °С в течение 2 ч. Установлено, что упрочнение приводит к формированию диффузионных слоев толщиной от 15 мкм до 12×10^2 мкм. Снятые кривые “потенциал – ток (E–I)” демонстрируют, что все покрытия обладают коррозионной стойкостью, превышающей стойкость необработанных образцов. Наибольшее сопротивление коррозии продемонстрировали образцы после бороалитирования при температуре 950°С для обеих сталей.

Введение. Борирование применяется для повышения износостойкости и коррозионной стойкости металлов и сплавов. Подавляющее большинство работ в области борирования посвящено износостойкости. Однако, зачастую упрочняемые детали и инструменты работают под действием износа и механических нагрузок в условиях агрессивных и влажосодержащих сред. Поэтому способность сопротивления коррозии является одним из основных характеристик изделий горного, нефтегазового машиностроения. В отечественной литературе коррозионная стойкость боридных слоев описана крайне мало. В работе [1] исследованы коррозионные свойства нержавеющей стали 08X18H10T после жидкостного борирования. Проведенные испытания в 5% солевом растворе и в камере солевого тумана показали, что после жидкостного борирования коррозионная стойкость данной стали не ухудшается. При этом, поверхностная микротвердость стали значительно возрастает после борирования. В зарубежных источниках встречаются работы по исследованию кинетики окисления борированных низкоуглеродистых сталей [2, 3]. Коррозионные свойства штамповых и быстрорежущих сталей рассмотрены в работах турецких ученых [4–6]. Борирование легированных сталей аустенитного и мартенситного класса для повышения их коррозионных свойств рассмотрено в работах американских и китайских ученых [7–9].

Несмотря на наличие работ в данном направлении необходимо отметить, что отсутствуют данные по коррозионным испытаниям распространенных штамповых сталей 3X2B8Ф и 5XHM после борирования. Помимо этого, для многокомпонентных боридных слоев, например, бороалитированных, также отсутствуют сведения по коррозионным свойствам указанных марок сталей. Целью данной работы является оценка коррозионных свойств штамповых сталей 3X2B8Ф и 5XHM после борирования и бороалитирования.

Методика. В качестве исследуемых материалов выбраны инструментальные штамповые стали 3X2B8Ф и 5XHM (табл. 1 и 2).

Таблица 1. Химический состав стали 3X2B8Ф, вес. %

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	W	V	Cu	Fe
0.3–0.4	0.15–0.4	0.15–0.4	до 0.35	до 0.03	до 0.03	2.2–2.7	до 0.5	7.5–8.5	0.2–0.5	до 0.03	86.16–89.5

Таблица 2. Химический состав стали 5XHM, вес. %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
0.5–0.6	0.1–0.4	0.5–0.8	до 0,03	до 0,03	0.5–0.8	1.4–1.8	до 0,3	0.15–0.3	94.94–96.85

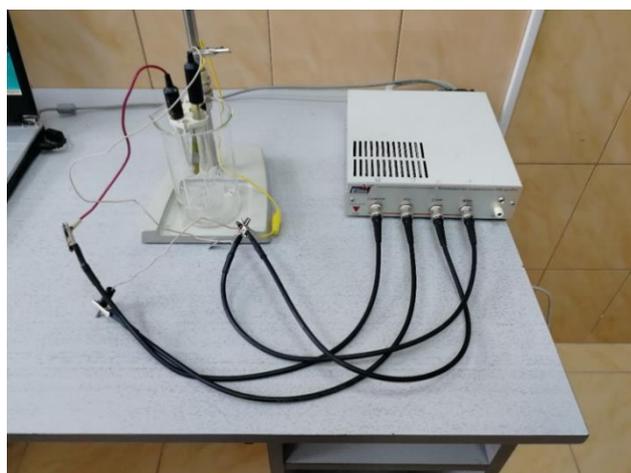


Рис. 1. Гальваностат “ПИ-50-Pro” с установленными образцами

Стальные образцы размером 80×60 мм и толщиной 1,8 мм подвергали борированию и бороалитированию в насыщающих пастах. Обработку осуществляли в насыщающих пастах, содержащих порошки карбида бора, алюминия и фторида натрия в качестве активатора следующего состава: 80% В₄С + 16% Al + 4% NaF [10]. Порошки смешивали с органическим клеем и наносили на образцы. Полученные брикеты просушивали при температуре 50–100 °С в течение двух часов в сушильной камере. Далее брикеты загружали в предварительно нагретую до температуры обработки печь. Длительность обработки составляла 2 ч, температура – 950 и 1050 °С.

Охлаждение образцов проводили вне печи на спокойном воздухе при комнатной температуре. Исследование микроструктуры проводили с помощью оптической и растровой электронной микроскопии, на приборах MET 2С Альтами и JSM-6510LV JEOL в ЦКП «Прогресс» ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления. Оценка поведения коррозии на диффузионных слоях для сталей 3X2B8Ф и 5XHM выполнена с помощью потенциостат–гальваностата “ПИ-50-Pro” в 3% растворе NaCl (Рис. 1).

В результате борирования на поверхности сталей получают диффузионные слои толщиной 15–20 мкм на стали 3Х2В8Ф и 65–75 мкм на стали 5ХНМ (Рис. 2).

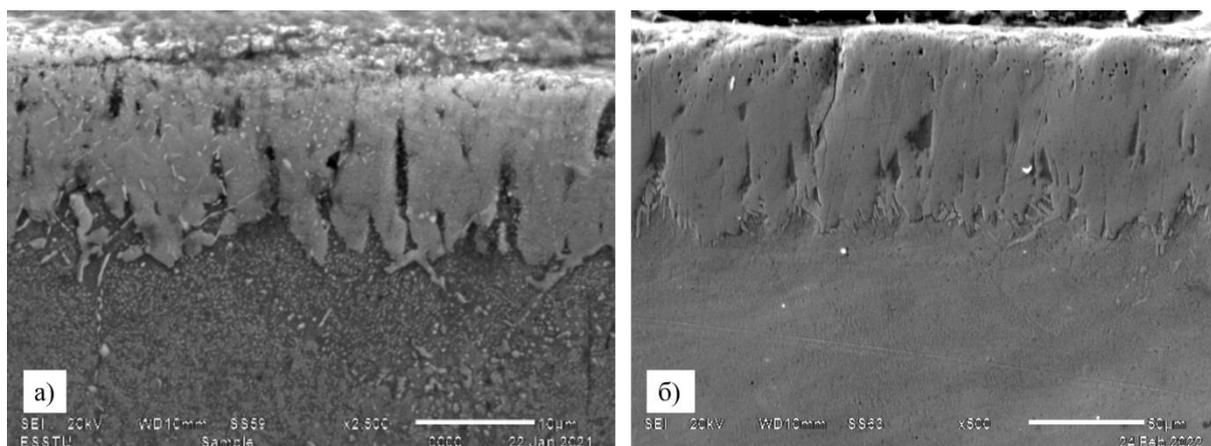


Рис. 2. Микроструктура боридного слоя на стали 3Х2В8Ф (а) и 5ХНМ (б)

В результате бороалитирования на поверхности сталей получают диффузионные слои толщиной $4,2 \times 10^2$ – 12×10^2 мкм, состоящие из боридов и алюминидов железа, а также твердых растворов (Рис. 3) [11].

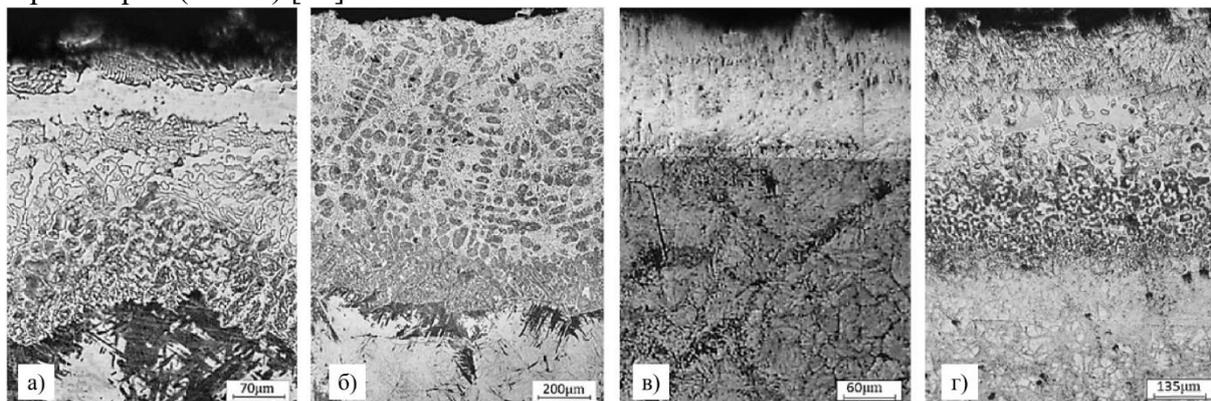


Рис. 3. Микроструктура бороалитированного слоя на стали 5ХНМ (а) 950 °С, (б) 1050 °С и 3Х2В8Ф (в) 950 °С, (г) 1050 °С [11]

Результаты. Снятые кривые потенциал – ток (Е–I) приведены на рисунке 4. Линии зависимости для всех покрытий имеют участок посередине, параллельный горизонтальной оси, а затем ток коррозии резко возрастает для в диапазоне потенциалов –300–(–200) мВ. Форма этих линий показывает, что все покрытия обладают коррозионной стойкостью, превышающей исходный образец без диффузионного слоя. Наибольшая стойкость у диффузионных слоев после бороалитирования. Причем потенциал стали 3Х2В8Ф выше после ХТО при 950 °С, по сравнению с обработкой при 1050 °С, а для стали 5ХНМ потенциалы сопоставимы для обоих температурных режимов бороалитирования.

С помощью аппроксимирующей кривой с величиной достоверности аппроксимации получены средние значения тока и потенциала коррозии, приведенные в таблице 3. Наиболее высокое значение тока коррозии получено в исходных образцах без диффузионного слоя, где дополнительное воздействие оказывает наличие микротрещин в поверхности после механической обработки, вследствие чего поверхность быстрее окисляется при контакте с коррозионной средой. Потенциал коррозии $E_{кор}$ для диффузионных слоев наибольший после бороалитирования при 950 °С для обеих сталей. Известно, что алюминий в диффузионном слое повышает коррозионное сопротивление за счет его пассивации в агрессивных средах. Известно, бороалитирование при 950 °С обеспечивает максимальное содержание алюминия в слое [11].

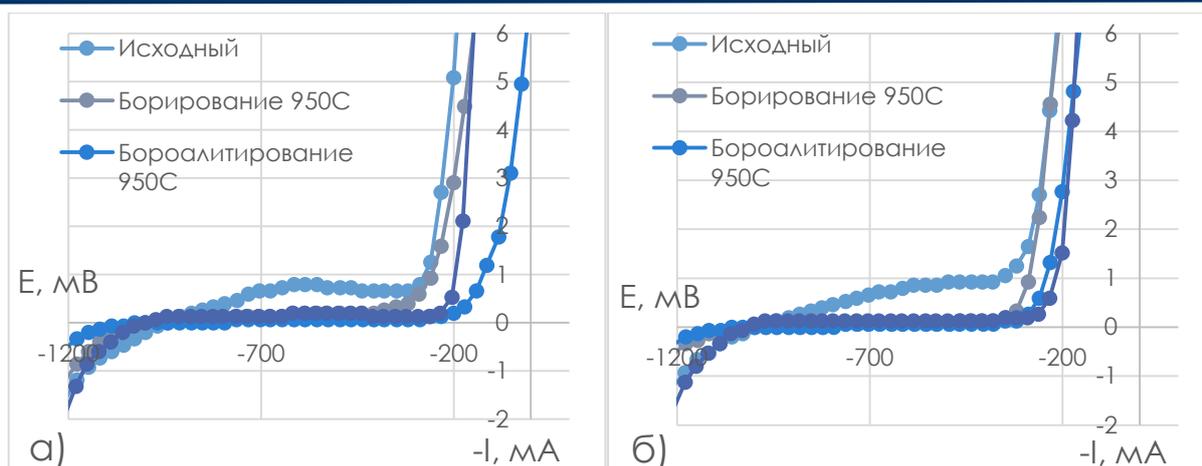


Рис. 4. Зависимости силы тока (мА) от потенциала (мВ) относительно хлорсеребряного электрода для диффузионных слоев на стали: а) 3Х2В8Ф; б) 5ХНМ

Таблица 3. Средние значения тока и потенциала коррозии покрытий

Марка стали	Вид обработки	$I_{кор.}, \text{мА/см}^2$	$E_{кор.}, \text{мВ}$
3Х2В8Ф	Исходный	0,1523	-938
	Борирование 950 °С	0,0661	-978
	Бороалитирование 950 °С	0,0661	-1052
	Бороалитирование 1050 °С	0,0789	-967
5ХНМ	Исходный	0,1817	-1022
	Борирование 950 °С	0,0661	-1043
	Бороалитирование 950 °С	0,0661	-1100
	Бороалитирование 1050 °С	0,1321	-1013

Заключение. Борирование и бороалитирование повышают коррозионную стойкостью сталей 3Х2В8Ф и 5ХНМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-79-10163-П).

Литература

1. Химико-термическая обработка стали 08Х18Н10Т для повышения ее эксплуатационных характеристик / А. А. Красуля, А. А. Пермитина, А. С. Помельникова, С. Г. Цих // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19, № 9. С. 419–421. DOI 10.36652/1684-1107-2021-19-9-419-421
2. Suwattananont N., Petrova R. S. Oxidation Kinetics of Boronized Low Carbon Steel AISI 1018 // Oxidation of Metals. 2008. № 5–6 (70). P. 307–315. DOI 10.1007/s11085-008-9123-0
3. Oxidation stability of boride coatings /. Ptačinová [et al.] // Kovove Materialy. 2015. Vol. 53. P. 175–186. DOI 10.4149/km-2015-3-175.
4. Properties and Corrosion Resistance of AISI H13 Hot-Work Tool Steel with Borided B_4C Powders / A. Günen [et al.] // Metals and Materials International. 2020. № 9 (26). P. 1329–1340. DOI 10.1007/s12540-019-00421-0
5. Günen A. Properties and Corrosion Resistance of Borided AISI H11 Tool Steel // Journal of Engineering Materials and Technology. 2020. № 1 (142). DOI 10.1115/1.4044667
6. Kayali Y. Wear and corrosion behaviour of borided and nitrided m2 high speed steel // Journal of the Balkan Tribological Association. 2013. Vol. 19. P. 340–353
7. Petrova R.S., Suwattananont N. Surface modification of ferrous alloys with boron // Journal of Electronic Materials. 2005. № 5 (34). P. 575–582. DOI 10.1007/s11664-005-0068-7
8. Petrova R.S., Suwattananont N., Samardzic V. The Effect of Boronizing on Metallic Alloys for Automotive Applications // Journal of Materials Engineering and Performance. 2008. № 3 (17). P. 340–345. DOI 10.1007/s11665-008-9228-2

9. Improving the wear and corrosion resistance of martensitic stainless steel by paste boriding treatment / M. Shi [et al.] // Materials Science and Technology. 2023. № 3 (39). P. 300–309. DOI 10.1080/02670836.2022.2110392

10. Microstructure and Wear Behavior of Tungsten Hot-Work Steel after Boriding and Boroaluminizing / U. Mishigdorzhijn [et al.] // Lubricants. 2020. № 3 (8). P. 26. DOI 10.3390/lubricants8030026

11. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-АI-слоев химико-термической обработкой / Н. С. Улаханов, У. Л. Мишигдоржийн, А. Г. Тихонов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17, № 12(204). С. 557-564. DOI 10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-234-238

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДНОКОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ДЕГРАДИРОВАННОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Москвичев Е.В.¹, Еремин Н.В.², Фесик С.А.²

¹ Федеральный исследовательский центр информационных
и вычислительных технологий, г. Красноярск

² Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

juqr@ict.nsc.ru

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению влияния длительного УФ-излучения и температуры на механические свойства углеродного композиционного материала. Исследовалось влияние модификаторов связующего на механические свойства материала до и после деградации. Модифицированный композиционный материал с добавлением нанотрубок и каучука показал удовлетворительные результаты по стойкости к воздействию УФ-излучения и температуры.

При длительном воздействии УФ-излучения и температуры происходит деградация физико-механических свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–4]. Это может ограничивать их широкое применение в ответственных конструкциях машиностроительной, авиационной и космической техники, работающих в неблагоприятных условиях окружающей среды. Для решения этой проблемы требуется создание новых модифицированных ПКМ, а также прогнозирование их деформирования путем определения достоверных физико-механических свойств в условиях близких к условиям эксплуатации.

Соответствующие экспериментальные исследования были проведены в данной работе на образцах однонаправленного композиционного материала на основе волокон ИМС65 и эпоксидных связующих Т26 и Т67. Был изучен характер изменения механических свойств материала с различной структурой армирования в зависимости от времени деградации. Также исследовалось влияние модификаторов на механические свойства ПКМ до и после деградации.

В настоящий момент существует множество методов деградации ПКМ [5]. В данном исследовании деградация образцов проводилась на разработанном в СибГУ им. М.Ф. Решетнева стенде, который включает в себя термокамеру и УФ-лампу (рис. 1). Данный стенд обеспечивает контролируемую стабильную среду, имитирующую комбинированное воздействие теплового и УФ-излучения на материал в течение длительного времени. Мощность применяемой УФ-лампы составляет 15 Вт, длина волны – 253,7 нм с выходом по ультрафиолету от 33 до 40%. Интенсивность УФ-излучения в ходе эксперимента составляла примерно 2281,25 Вт/м², а температура 100 °С.

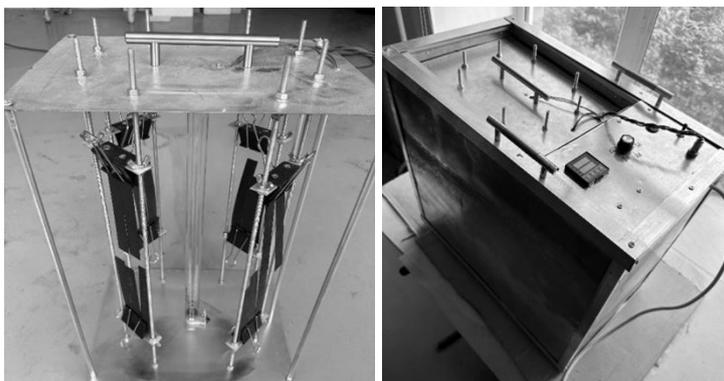


Рис. 1. Стенд для деградации образцов

Для оценки влияния деградации на механические свойства ПКМ были изготовлены плоские образцы с 3 схемами армирования: $[0]_8$, $[\pm 45]_8$, $[90]_8$. Образцы изготавливались методом прессования из однонаправленных композиционных лент и высокотемпературной эпоксидного связующего Т26. Средняя толщина образцов составила 0,33 мм, ширина – 20 мм, длина – 150 мм. Всего было изготовлено 60 образцов, которые подверглись деградации на стенде при различном времени выдержки.

Испытания образцов проводились в Инженерно-испытательном центре ФИЦ ИВТ на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST. Методика испытаний принималась на основе ГОСТ 32656-2017. Перед испытаниями на рабочую часть образцов приклеивались метки, по которым измерялась продольная деформация с помощью видеоекстензометра. Образцы нагружались со скоростью 2 мм/мин до разрушения. Для образцов с поперечной схемой армирования $[90]_8$ применялся датчик малых усилий, работающий в диапазоне до 250 Н, поскольку жесткость и прочность таких образцов сравнительно малы. Скорость нагружения для таких образцов устанавливалась равной 0,2 мм/мин.

В ходе испытаний были построены диаграммы «напряжение-деформация», по которым определялись механические свойства ПКМ. На рисунке 2 представлены графики изменения механических свойств ПКМ в зависимости от времени деградации и их экспоненциальная аппроксимация согласно следующему уравнению:

$$k(t) = k_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (1)$$

где k_0 – механическая характеристика без учета деградации, Па; t – время, ч; λ – экспериментальная константа, 1/ч.

Как видно из графиков для образцов со схемой армирования $[0]_8$ механические свойства после деградации снижаются на 2–9%. Для образцов со схемами армирования $[45]_8$ и $[90]_8$ механические свойства снижаются сильнее – от 30 до 70%. Это можно объяснить тем, что эпоксидная матрица вносит гораздо больший вклад в жесткость и прочность таких образцов. При воздействии УФ-излучения и температуры матрица деградирует, что приводит к образованию микротрещин, которые ухудшают связь и передачу нагрузки между волокнами.

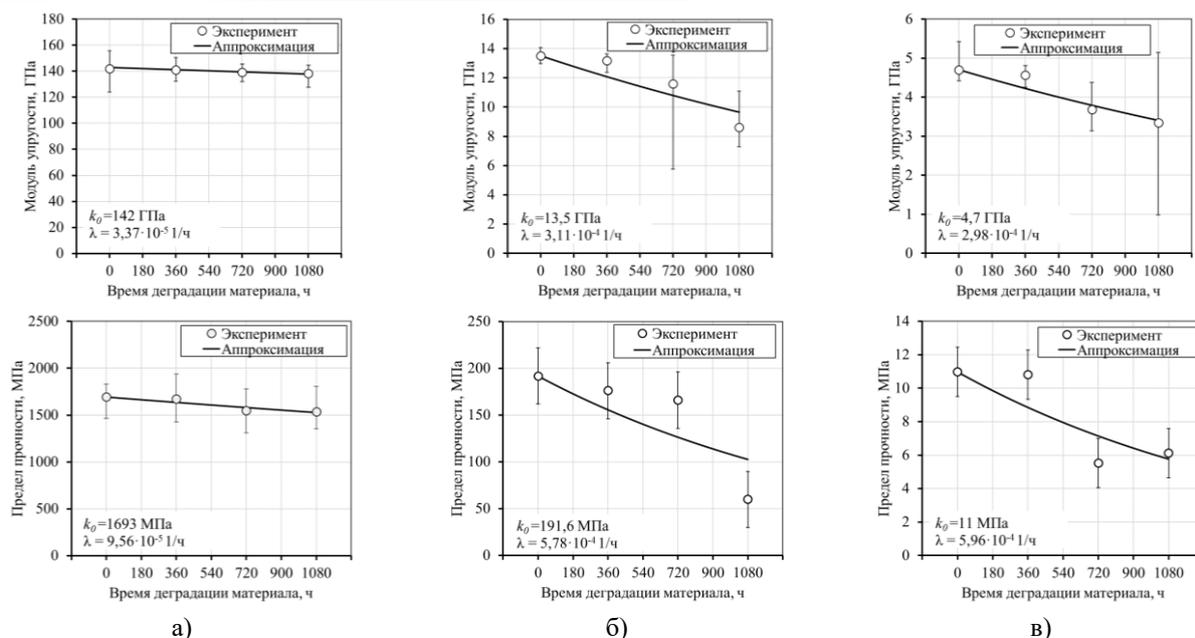


Рис. 2. Зависимость механических свойств от времени деградации образцов со структурой армирования: а – [0]8; б – [±45]8; в – [90]8

На следующем этапе исследования проводилась модификация ПКМ с помощью добавления компонентов в эпоксидную смолу с последующей оценкой их влияния на механические свойства до и после деградации. В качестве материала для образцов был выбран ПКМ на основе однонаправленной углеродной ленты IMS65 и эпоксидного связующего T67 со схемой армирования [0]4. Модификаторами являлись: карбид кремния (SiC 1200), графен (АМГ-47), углеродные нанотрубки (Matrix 301) и уретановый каучук (ПЭФ-3А).

Результаты испытаний представлены на рисунке 3. Из них следует, что модуль упругости и предел прочности ПКМ модифицированного графеном и карбидом кремния значительно ниже исходного. Модификация каучуком также показала пониженные результаты. Однако ПКМ модифицированный нанотрубками имел более чем на 18% повышенные механические свойства.

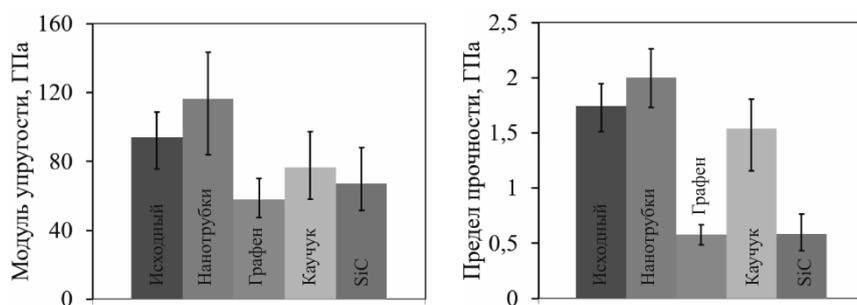


Рис. 3. Механические свойства модифицированного ПКМ без деградации

После анализа полученных данных ПКМ модифицированные нанотрубками и каучуком были выбраны как наиболее перспективные для дальнейших исследований. Образцы из этих материалов были подвергнуты деградации с различным временем выдержки и с последующим определением механических свойств. Соответствующие результаты испытаний представлены на рисунке 4.

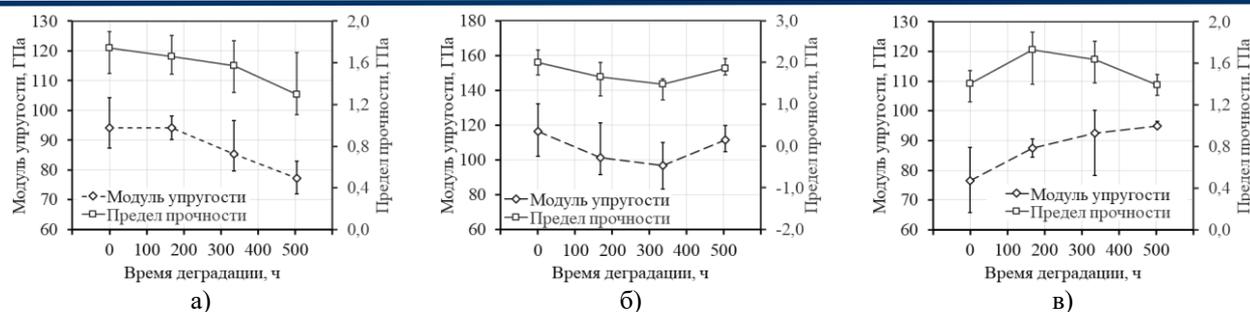


Рис. 4. Зависимость механических свойств ПКМ от времени деградации: а – исходный; б – модифицированный нанотрубками; в – модифицированный каучуком

Результаты показывают, что для исходного ПКМ модуль упругости и предел прочности значительно снижаются после длительной деградации. Это качественно соответствует представленным ранее результатам, полученных на образцах на основе связующего Т26. Однако образцы из модифицированного ПКМ демонстрируют другой характер влияния деградации на механические свойства.

После 300 часов деградации у ПКМ модифицированного нанотрубками значения модуля упругости и предела прочности сперва снижаются на 17%, но затем частично восстанавливаются. Предположительно это объясняется тем, что углеродные нанотрубки, обладающие высокой прочностью, могут способствовать поддержанию целостности частично разрушенной матрицы путем ограничения роста микротрещин и поглощения энергии деформирования. Таким образом, после начального периода деградации, структура материала может стабилизироваться за счет взаимодействия между нанотрубками и полимерной матрицей.

Модуль упругости и предел прочности ПКМ, модифицированного каучуком, увеличился на 20%. Однако предел прочности после 500 часов деградации вернулся к своему исходному значению. Такой характер изменения механических свойств может быть связано с тем, что фазовое состояние каучуковых частиц становится более жесткими под воздействием УФ-излучения, что способствует временному упрочнению материала.

Обобщая результаты проведенного исследования, можно сделать вывод, что длительное воздействие УФ-излучения и температуры существенно влияет на механические свойства ПКМ. Характер этого влияния особенно зависит от структуры армирования. Для решения этой проблемы были предложены различные модификаторы эпоксидного связующего. В ходе экспериментов ПКМ модифицированные нанотрубками и каучуком показали удовлетворительные результаты по механической стойкости после длительной деградации. Это указывает на перспективность использования таких модификаторов для улучшения долговечности и эксплуатационных характеристик ПКМ, применяемых в неблагоприятных и экстремальных условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Литература

1. Тоискин Г. Н. Сравнительные испытания деградации механических свойств двух композиционных материалов в условиях повышенной влажности и температуры // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (Национального исследовательского университета). 2012. № . 5-2 (36). С. 282–287.
2. Галимулин А. Х., Тюменев Ю. Я., Мухамеджанов Г. К. Установление старения полипропиленовых укрывных материалов под действием ультрафиолетового излучения // Известия высших учебных заведений. Серия: Технология текстильной промышленности. 2006. № 6 (294). С. 23–25.
3. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов / А.Г. Хантимиров [и др.]. // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № . 3(65). С. 26–35.

4. Bhavesh G. Kumar, Raman P. Singh, Toshio Nakamura. Degradation of Carbon Fiber-reinforced Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation // Journal of Composite Materials. – 2002. – Т.36. – № 24. – С. 2713–2733.

5. Проектирование ультрафиолетовой камеры для исследования деструкции полимерных композиционных материалов / И. Г. Лукачевская, Е. Д. Васильева, А. Н. Иванов, А. А. Кычкин // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 6(52). С. 289–296. – DOI 10.25699/SSSB.2023.52.6.043.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-238-241

ВЛИЯНИЕ НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА КИНЕТИКУ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Низина Т.А., Низин Д.Р., Спириин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск

nizinata@yandex.ru

Приведены результаты расчета кинетики накопления повреждений в структуре полимера, получаемого на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М, в зависимости от уровня напряжения и относительного удлинения при растяжении. Показано, что для оценки климатической стойкости полимерных материалов, в том числе экспонирующихся в различных климатических условиях, целесообразно к комплексу интегральных физико-механических показателей (модуль упругости, предел прочности и относительное удлинение при растяжении и разрыве) определять накопленное число повреждений и удельный показатель повреждений в момент разрушения.

Окружающая среда представляет собой самый распространенный вид агрессивного воздействия, которому подвержены практически все виды строительных изделий и конструкций. Как следствие, для обеспечения их длительной эксплуатации, строительные материалы и композиты на их основе должны обладать достаточной стабильностью свойств в условиях действия природных климатических факторов [1–3]. Учитывая существенное изменение климата Российской Федерации в зависимости от климатической зоны, говорить о стойкости и достаточной долговечности того или иного материала без указания региона последующей эксплуатации не вполне корректно. Например, климатические условия арктических и субарктических зон России характеризуются значительными перепадами температур, достигающими 100 °С, а также повышенной солнечной радиацией. Кроме того, натурное климатическое воздействие представляет собой комплексное влияние различных факторов (температура, относительная и абсолютная влажность, скорость и направление ветра, вид и количество осадков, актинометрические показатели и др.), различные комбинации которых могут приводить к существенно меняющемуся отклику материалов.

Ранее в научных исследованиях, в том числе авторских [2–4], было показано, что в зависимости от концентрации влаги наблюдается существенное изменение свойств полимерных материалов, причем не только для полимеров после природного климатического старения, а и для контрольных серий образцов. Следовательно, концентрация влаги в окружающем воздухе, в свою очередь существенно варьирующаяся в зависимости от времени суток, сезона, года, климатического района и др. также будет оказывать значительное воздействие на весь комплекс эксплуатационных показателей. Кроме того, учитывая, что многие климатические факторы взаимосвязаны друг с другом (например, солнечная радиация и температура; солнечная радиация

и относительная влажность; абсолютная влажность и температура и т. д.), для оценки климатической стойкости необходимо использовать не только интегральные характеристики, а и скорость накопления повреждений в их структуре под действием механических нагрузений.

При проведении натурных испытаний с целью выявления климатической стойкости традиционно определяется комплекс физико-механических характеристик в контрольном состоянии, а также их изменение с течением времени. При испытаниях полимерных материалов, как правило, оценивают изменение предела прочности $\sigma_{\text{раст.}}$ и модуля упругости $E_{\text{раст.}}$ при растяжении, относительного удлинения при растяжении $\varepsilon_{\text{раст.}}$ (при максимальной нагрузке) и разрыве ($\sigma_{\text{разр.}}$, $\varepsilon_{\text{разр.}}$). Авторским коллективом предложено расширить комплекс показателей исследуемых материалов, необходимых при проведении натурных климатических испытаний. В частности, помимо вышеприведенных упруго-прочностных характеристик, целесообразно производить расчет интегрального накопленного числа повреждений $\omega_{\text{раст.}}$ и удельного показателя $\theta_{\text{раст.}}$, а также оценку кинетики накопления повреждений в зависимости от уровня прикладываемого напряжения $\omega(\sigma)$ и относительной деформации $\omega(\varepsilon)$ в процессе нагружения [2, 5–7].

Суть метода заключается в расчете локальных $\mu(t)$ и интегрального $\mu_{\text{раст.}}$ индексов фрактальности кривой деформирования образцов при растяжении, фиксируемой с высокой частотой снятия показаний (в частности, 0,01 сек.). Расчет индексов фрактальности осуществляется с помощью авторского программного продукта [8], использующего метод наименьшего покрытия, широко используемого для анализа разнообразных временных рядов [2]. Затем осуществляется подсчет общего числа фиксируемых точек кривой деформирования и числа значений, для которых индексы фрактальности $\mu(t)$ меньше 0,5. Расчет накопленного числа повреждений (%) за весь период деформирования образца осуществляется по формуле:

$$\omega_{\text{раст.}} = \frac{m_{\mu(t)}}{n_{\mu(t)}} 100\%, \quad (1)$$

где $m_{\mu(t)}$ – число индексов фрактальности исследуемого ряда, для которых выполняется условие $\mu(t) < 0,5$; $n_{\mu(t)}$ – общее число анализируемых значений $\mu(t)$, фиксируемых до уровня достижения максимальной растягивающей нагрузки.

Удельный показатель накопления повреждений (%/МПа) при анализе всей истории нагружения образца рассчитывается как:

$$\theta_{\text{раст.}} = \frac{\omega_{\text{раст.}}}{\sigma_{\text{раст.}}} \quad (2)$$

Выбор в качестве «критического» уровня состояния значений $\mu(t) < 0,5$ связан с тем, что данный уровень показателей индексов фрактальности интерпретируют как «тренд» – период резкого движения вверх или вниз, свидетельствующего, как правило, о возникновении «критического» состояния в исследуемой системе; если $\mu(t) > 0,5$, то такое состояние оценивают как «флэт» – период относительного спокойствия [2].

Для оценки кинетики накопления повреждений предлагается производить расчет числа повреждений в зависимости от уровня прикладываемого напряжения $\omega(\sigma)$ и относительного удлинения при растяжении $\omega(\varepsilon)$ по формулам:

$$\omega(\sigma) = \frac{m_{\mu(\sigma)}}{n_{\mu(\sigma)}} 100\%, \quad (3)$$

$$\omega(\varepsilon) = \frac{m_{\mu(\varepsilon)}}{n_{\mu(\varepsilon)}} 100\%. \quad (4)$$

где $m_{\mu(\sigma)}$, $m_{\mu(\varepsilon)}$ – число индексов фрактальности исследуемого ряда, для которых выполняется условие $\mu(t) < 0,5$, накопленных, соответственно, до определенного уровня напряжения σ и относительных удлинений при растяжении ε ; $n_{\mu(\sigma)}$, $n_{\mu(\varepsilon)}$ – общее число анализируемых значений $\mu(t)$ до достижения, соответственно, уровня напряжения σ и относительных удлинений при растяжении ε .

Проиллюстрируем анализ изменения кинетики накопления повреждений на примере полимера, получаемого на основе эпоксидного связующего Этал-247, отверждаемого отвердителем Этал-45М (АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ»). Длительность натурального экспонирования в условиях умеренного континентального климата (г. Саранск) соответствовала 67, 151, 306 и 531 суткам (рисунок).

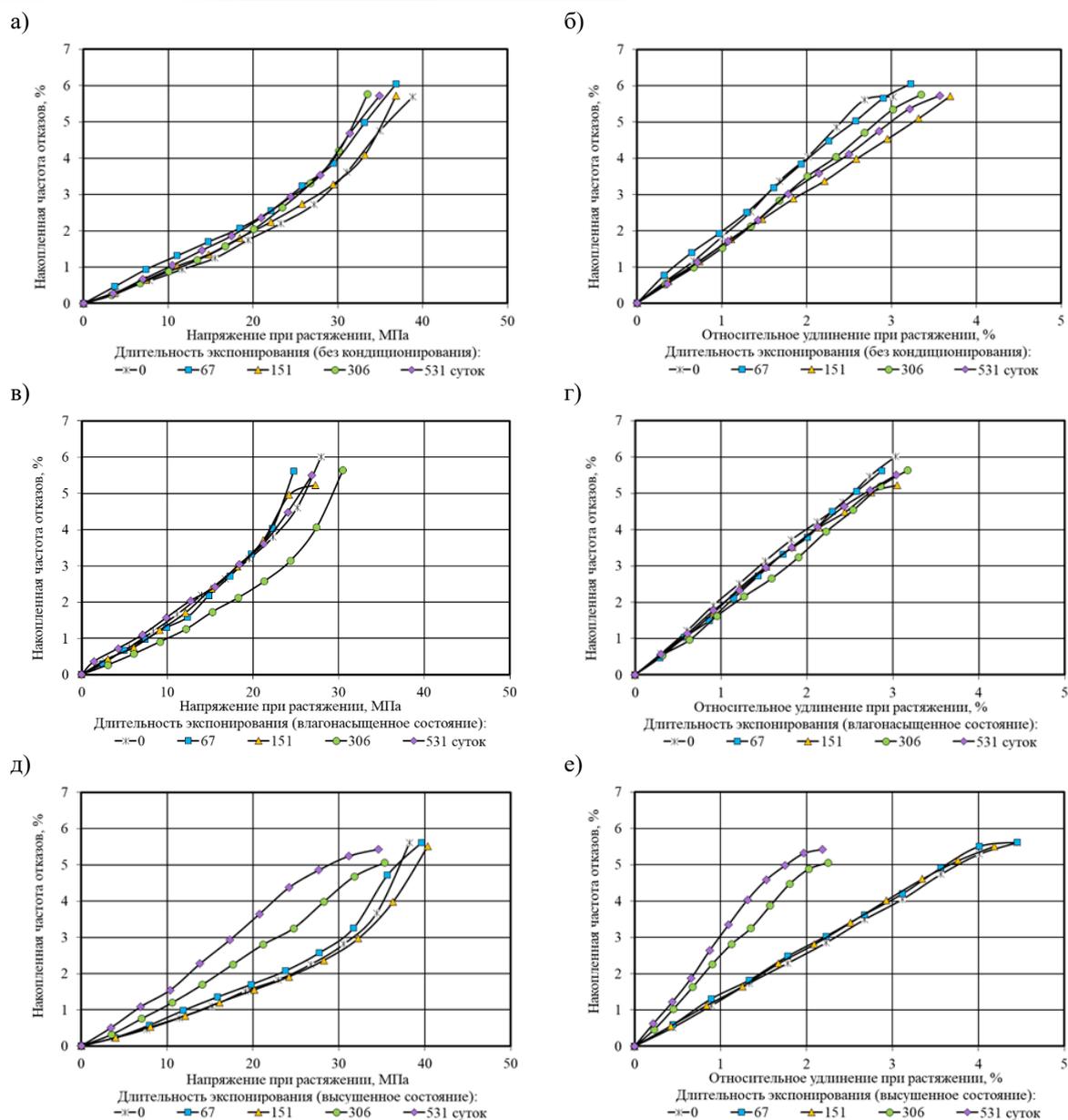


Рис. Кривые накопления отказов в структуре эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-45М в зависимости от уровня напряжения (а, в, д) и относительного удлинения (б, г, е) при растяжении серий «без кондиционирования» (а, б), «влагонасыщенные» (в, г) и «высушенные» (д, е) после натурального климатического воздействия различной продолжительности

Для выявления влияния влажностного состояния на изменение свойств полимерных материалов производилось кондиционирование образцов в соответствии с ГОСТ 12423-2013 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов». После снятия с испытательных стенов серия образцов эпоксидных полимеров делилась на три партии, которые испытывались:

- сразу после снятия с испытательной площадки (серия «без кондиционирования»);
- после увлажнения при относительной влажности $98 \pm 2\%$ до постоянной массы (серия «влагонасыщенные»);
- после сушки при $60\text{ }^\circ\text{C}$ до постоянной массы (серия «высушенные»).

Из анализа графических зависимостей, представленных на рисунке 1, можно проследить как изменение средних показателей предела прочности и относительного удлинения при растяжении серий образцов (для каждой серии испытывалось не менее 10–12 образцов) в зависимости от длительности климатического воздействия, так и изменение кинетики накопления повреждений с увеличением уровня прикладываемого напряжения и относительного удлинения. Для исследуемого состава выявлено, что влагонасыщенные образцы изначально характеризуются более низкими значениями предела прочности и относительного удлинения

при растяжении по сравнению с другими сериями. Наибольшие изменения в характере деформирования с увеличением длительности натурального экспонирования (306 суток и более) наблюдаются для серии «высушенные», что, очевидно, связано с охрупчиванием полимера. Установлено, что разрушение образцов наступает при выходе из строя от 5 до 6% структурных элементов, причем для каждой кривой можно количественно выявить «критический» уровень напряжений и деформаций, начиная с которого начинается более интенсивное накопление повреждений. Проведение подобных исследований по оценке кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов, экспонированных в различных климатических зонах, позволит получить дополнительные сведения о климатической стойкости полимерных материалов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0095).

Литература

1. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. О.В. Старцева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.Т. Ерофеева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.П. Селяева. – М.: Издательство АСВ, 2017. 558 с.
2. Низина Т.А. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин. – Саранск: Изд-во Мордов. Ун-та, 2020. 188 с.
3. Каблов Е.Н. Старение полимерных композиционных материалов / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев, А.Б. Лаптев. – Москва, 2023. 536 с.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2011. № 1. С. 34–40.
5. Nizina T.A., Kanaeva N.S., Nizin D.R. The effect of moisture state on kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples under tensile stresses // Lecture notes in civil engineering, 2021. Vol 151. Pp. 208–214. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_30
6. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses. Key engineering materials. 2019. Vol. 799. Pp. 217–223. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
7. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Artamonov D.A. Method for analyzing the kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials under tensile stresses // AIP Conference Proceedings 2371(1):020010 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0059899>.
8. Низин Д.Р., Низина Т.А., Канаева Н.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022612647 «Расчет локальных и интегрального индексов фрактальности кривых деформирования образцов полимерных материалов» от 28.02.2022 (заявка № 2022611934 от 15.02.2022 г.).

ДОСТОВЕРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ НЕНАПОЛНЕННЫХ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Низин Д.Р., Низина Т.А., Спириин И.П., Чибулаев И.А., Пивкин Н.А.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск

nizindi@yandex.ru

Представлены результаты сравнительного анализа различных способов размещения и крепления датчиков температуры, а также методик измерения температуры поверхности образцов эпоксидных полимеров в процессе натурального климатического старения. Продемонстрированы эффекты, возникающие на уровне данных при различных способах защиты датчиков от атмосферного воздействия. Приведены статистические данные, количественно описывающие разницу в исследуемых методиках измерения температуры поверхности (датчики – полупроводниковая; пирометр – инфракрасная фотоэлектрическая).

Эффект перегрева поверхности материалов под действием факторов окружающей среды широко известен и изучен. В зависимости от температуры окружающей среды и климатической зоны экспозиции разница между температурами может достигать 50 °С и более [1–5], что, в свою очередь, обуславливает высокий интерес к данному эффекту при исследовании климатической стойкости полимерных материалов. Подобное увеличение температуры может сопровождаться переходом материала в высокоэластическое состояние, что в совокупности с одновременным присутствием факторов атмосферной влажности и осадков, ветровым воздействием, кислородным и озоновым старением и др. приводит к нелинейной интенсификации процессов термо-влажностного старения полимеров и деградации их эксплуатационных свойств. Как следствие, температура поверхности представляет собой важный показатель процесса климатического старения полимерных материалов, фиксация которого целесообразна.

Одним из возможных путей перехода к достоверному прогнозированию климатической стойкости полимерных материалов является использование методов машинного обучения применительно к данным, описывающим исследуемый процесс. При этом, основным требованием к данным с точки зрения точности прогнозирования является их качество и полнота описания процесса. Однако, с технико-экономической точки зрения, важной является также возможность непрерывного сбора соответствующих данных с минимальными затратами труда и материальных ресурсов. В случае «поверхностных показателей» полимерных материалов инструментальным решением обозначенного вопроса являются автономные датчики температуры и влажности поверхности, использование которых, в свою очередь, поднимает вопросы соответствия фиксируемых значений показателю «температуры поверхности», а также их размещения и крепления на поверхности – в первую очередь, с точки зрения минимизации вклада перегрева самого технического устройства в результирующий показатель и обеспечения его бесперебойной работы под действием окружающей среды. В работе приведены результаты исследования способов размещения и крепления датчиков DS1923-F5, а также сравнительный анализ различных способов измерения показателя температуры поверхности образцов эпоксидных полимеров.

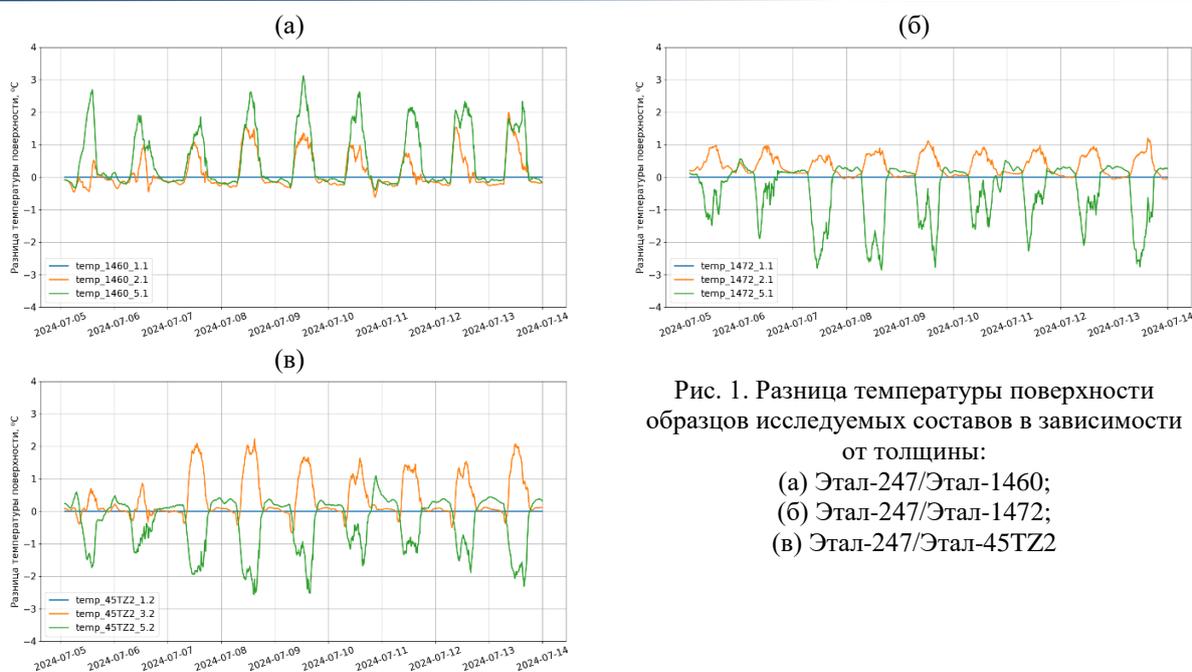


Рис. 1. Разница температуры поверхности образцов исследуемых составов в зависимости от толщины:
 (а) Этал-247/Этал-1460;
 (б) Этал-247/Этал-1472;
 (в) Этал-247/Этал-45TZ2

В качестве объектов исследования выступили образцы-пластины эпоксидных полимеров трех составов на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителей Этал-1460, Этал-1472 и Этал-45TZ2 (все – производства АО «ЭНПЦ Эпитал»). В качестве «эталонных» данных в работе рассматривались результаты, полученные для исследуемых образцов с помощью инфракрасного пирометра марки DT-8835. Фиксация значений осуществлялась с расстояния 30 ± 2 см от поверхности образца с показателем коэффициента излучения прибора, равным 0,95. Выбор данного показателя обусловлен рекомендациями производителя при работе с материалами органического происхождения.

Значения температуры поверхности фиксировались датчиками с шагом 10 минут. На рис. 1 приведены кривые изменения скользящего среднего (период = 6) разницы между значениями температуры поверхности образцов исследуемых составов различной толщины. За «базовые» принимались значения температуры поверхности образцов наименьшей толщины (образцы серии 1.1). Очевидно, что различие в температуре поверхности образцов возникает не только как следствие разницы в толщине образцов, но и в связи с различием в их колориметрической составляющей. Представленные данные получены для способа фиксации датчика без дополнительных приспособлений.

На рис. 2 приведены кривые изменения скользящего среднего (период = 6) разницы между значениями температуры поверхности образцов исследуемых составов в зависимости от дополнительных используемых приспособлений. Помимо непосредственного крепления датчика к поверхности образца (на расстоянии до 1 мм от поверхности) с помощью этиленвинилацетатного клея (по контуру датчика с сохранением «открытого» сектора с центральным углом от 60 до 90°) они дополнительно «закрывались» прозрачным (рис. 2, а) и непрозрачным (рис. 2, б) колпачком (с аналогичным способом фиксации и единой ориентацией «открытого» сектора).

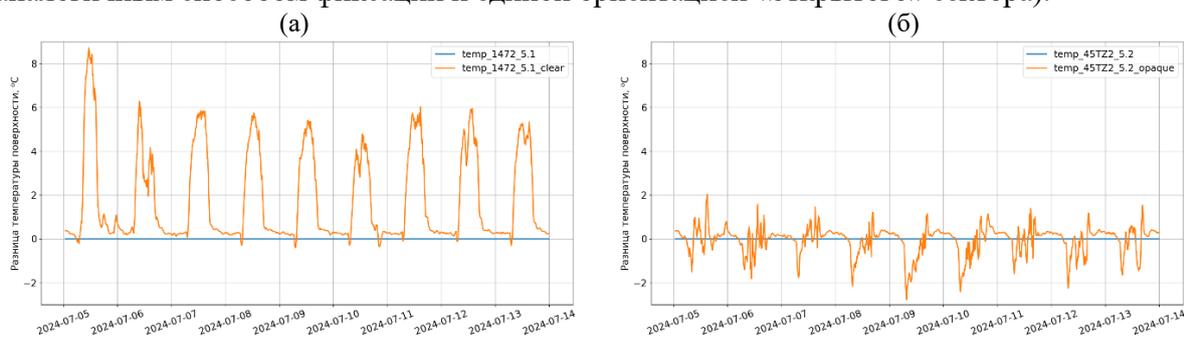


Рис. 2. Разница в температуре поверхности образцов исследуемых составов в зависимости от используемых дополнительных приспособлений: (а) – Этал-247/Этал-1472, прозрачный колпачок; (б) – Этал-247/Этал-45TZ2, непрозрачный колпачок

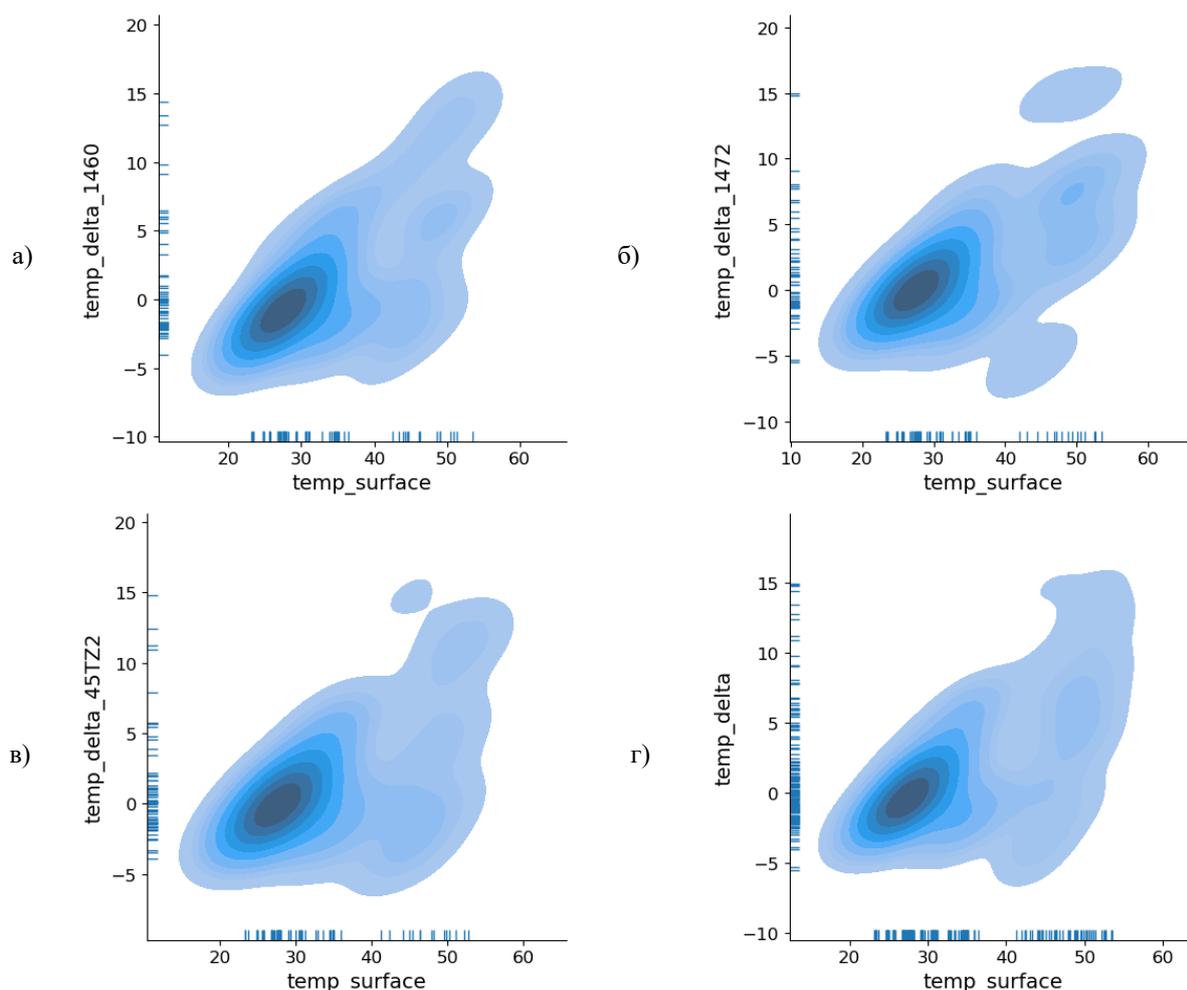


Рис. 3. Графики плотности значений температуры поверхности (`temp_surface`), полученных с помощью датчиков, и их разницы (`temp_delta`) со значениями, полученными с помощью пирометра: (а) Этал-247/Этал-1460; (б) Этал-247/Этал-1472; (в) Этал-247/Этал-45TZ2; (г) для всех составов в совокупности

Результаты, полученные для датчиков с прозрачным колпачком, свидетельствуют о возникновении дополнительного температурного эффекта на временных участках, соответствующих световому дню, достигающего $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для датчиков, защищаемых непрозрачным колпачком, в свою очередь, помимо высокого шума на аналогичных участках (сохраняющегося в т.ч. на графиках скользящего среднего), наблюдается изменение паттерна проявления локальных экстремумов графика с точкой минимума в начале светового дня и максимума ближе к его окончанию. При этом полученные абсолютные значения находятся в окрестностях погрешности измерения датчиков ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от -10 до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

На рис. 3 приведены графики плотности распределения сочетания значений температуры поверхности, полученных с помощью датчиков, и их разницы со значениями, полученными с помощью пирометра как для составов по-отдельности, так и для всех составов в совокупности.

Несмотря на тот факт, что значения температуры поверхности образцов, полученные с помощью датчиков, преимущественно отличаются от показаний пирометра не более чем на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (что кратно выше значения погрешности измерения используемых технических средств измерения), данное утверждение справедливо лишь для ограниченного диапазона температур поверхности (полученных с помощью датчиков). С увеличением температуры поверхности, верхняя граница распределения разницы значений увеличивается вплоть до $+15$ градусов. При этом в основе данного факта может лежать как принципиальное различие в методиках определения температуры поверхности используемыми техническими средствами (полупроводниковая и инфракрасная фотоэлектрическая соответственно), так и «реальная» разница в температуре поверхности исследуемых образцов. Уточнение данного вопроса требует проведения

дополнительных изысканий как с привлечением измерительного оборудования, использующего исследованные методы измерения, так и других способов – в т.ч., контактного толка. Однако, в настоящий момент именно автономные датчики температуры остаются наиболее доступным, как с технической, так и с экономической точки зрения, способом получения больших данных для обучения моделей машинного обучения, прогнозирующих изменения свойств полимерных материалов под действием факторов окружающей среды.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0095).

Литература

1. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. О.В. Старцева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.Т. Ерофеева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.П. Селяева. – М.: Издательство АСВ, 2017. 558 с.
2. Низина Т.А. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин. – Саранск : Изд-во Мордов. Ун-та, 2020. 188 с.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2010. № 11. С. 19–27.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2010. № 12. С. 40–46.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2011. № 1. С. 34–40.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-245-248

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЦЕНТРОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ РАСПЛАВОВ ЛИТЫХ СПЛАВОВ, МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

Петров П.П., Тарасов П.П., Степанова К.В., Данилов А.Д.

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр»
обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

ppp32@mail.ru

Основные направления НИР в области металлургии по созданию новых сплавов являются: разработка и создание высокого комплекса рабочих свойств в сталях Северного исполнения за счет оптимизации структуры (формирование мелкого зерна) сильно карбонитридообразующими элементами (ванадием, титаном и ниобием); освоение технологии комплексного микролегирования сталей различного назначения из ванадийсодержащей руды, взамен никеля, вольфрама, молибдена и ниобия; разработка технологии по созданию высокопрочных коррозионно-стойких хладостойких ванадийсодержащих специальных сплавов и внедрение их для конструкций и деталей ответственного назначения в газо-нефтеперерабатывающих и железнодорожных комплексах; оптимизация внутреннего строения сталей Северного исполнения путем карбо нитридного упрочнения при микролегировании ванадием и ниобием с целью достижения – дисперсионного упрочнения, измельчения зерна, а также образования субзеренной структуры.

Современный уровень развития науки и техники, особенно в условиях холодного климата, например, в условиях Республики Саха (Якутия), требует более широкое применение новых материалов трех типов, отличающихся по своим физико-механическим и технологическим свойствам:

- материалы первого типа должны быть хладостойкими и коррозионностойкими с различными уровнями прочности;
- материалы второго типа – высокопрочными и износостойкими, но они обычно склонны к хрупкому разрушению;
- материалы третьего типа одновременно должны обладать и хладостойкими и высокопрочными свойствами.

Одним из механизмов повышения прочности и хладостойкости сталей является регулирование размеров зерен. Существуют несколько путей уменьшения размеров зерен:

- оптимизация химического состава стали и технологии ее выплавки;
- микролегирование элементами *IVa* и *Va* групп периодической системы;
- модифицированием редкоземельными и щелочноземельными металлами с целью получения оптимальной формы неметаллических включений.

Задачи. Разработка, внедрение и освоение производства новых конструкционных, машиностроительных хладостойких среднеуглеродистых сталей с более высоким уровнем механических свойств и новых технологий их производства остаются приоритетными задачами современного металловедения.

Цель. На наш взгляд, целью создания новых поколений хладостойких и износостойких материалов различных уровней прочности является следующее:

1. Сохраняя достаточно высокую пластичность, увеличить прочность и твердость.
2. Создать материалы с высокой износостойкостью, но при этом увеличить их пластичность.
3. Создать материалы, одновременно обладающие и хладостойкими, и износостойкими свойствами.
4. При создании новых сплавов, с целью значительного сокращения себестоимости металлопродукции и повышения работоспособности техники Северного исполнения, необходимо максимально уменьшить и даже полностью исключить дорогостоящие и дефицитные легирующие элементы.

В процессе кристаллизации сталей и сплавов из жидкого расплава происходят сложные структурно-фазовые превращения, приводящие к получению материала с определенными: химическим составом, физико-механическими свойствами и эксплуатационными характеристиками. Модифицирование железо–углеродистых сплавов применяют для получения мелкозернистой структуры. Модификаторы выполняют роль центров кристаллизации, о которых начинается рост зерен при относительно высоких температурах в процессе кристаллизации, например, тугоплавкие металлы и РЗМ или их соединения W ($T_{пл.} = 3370^{\circ}\text{C}$); Nb ($T_{пл.} = 1950^{\circ}\text{C}$); Ce; Y; La; Al_2O_3 или их (карбиды, нитриды, оксиды).

Модификаторы первого рода – поверхностно – активные вещества – адсорбируются на зародышах, возникающих на центрах кристаллизации, и тормозят их рост, в результате чего появляется большое количество новых зародышей, рост которых становится возможным из-за уменьшения концентрации модификатора на их поверхности.

Модификаторы второго рода – т. е. модификаторы инокулирующего действия облегчают образование в расплаве центров кристаллизации, например, коллоидных частиц, оказывающих влияние на зарождение кристаллов металлических фаз при затвердевании. При появлении большого числа *таких центров* образуется повышенное количество мелких зерен основной фазы или мелких включений других фаз.

Главной роли модификаторов при создании высокопрочных, износостойких и хладостойких сплавов является создание локальных центров кристаллизации в жидком расплаве при высоких температурах, например, в интервале *от 1600°С до 2500°С*, что способствует образованию мелкозернистой структуры с минимальным содержанием вредных примесей по границам зерен.

Роль РЗМ в процессе кристаллизации:

– при выплавке литых хладостойких сталей наиболее часто используют металлы цериевой (Ce) группы (Pr; Nd; Pm; Sm), а также лантан (La), реже иттрий (Y). Эти элементы имеют температуру плавления, ближе к температуре плавления кальция ($T_{пл.} = 810 \text{ }^{\circ}\text{C}$), однако значительно более высокие температуры кипения ($T_{кип.} > 3000 \text{ }^{\circ}\text{C}$);

– в начале процесса кристаллизации расплава в температурном интервале $(1800 \div 2300) \text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит зарождение локальных центров вокруг атомов *цериевой группы*, которые способствуют обособлению сульфидной (CeS ; Ce_2S_3) или оксисульфидной ($\text{O}-\text{Ce}-\text{S}$) фазы на ранних стадиях;

– происходит минимальная *адсорбция* (поглощение газов поверхностным слоем твердого тела) вредных примесей при кристаллизации, что дает возможность получить литой металл с чистыми границами зерен и высокой пластичностью;

– снижают *анизотропию* и улучшают литейные свойства стали, способствуют улучшению жидкотекучести расплава;

– за счет дегазационного воздействия увеличивается *плотность* стали;

– происходит повышение динамических характеристик сплавов, связанное с превращением пленочных форм сульфидов в сфероидальные формы, что сопровождается уменьшением доли крупных включений и получением более чистых границ зерен.

Целесообразность применения железомарганцовистых руд обусловлено;

– высоким процентным содержанием железа [$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 86,78\%$ рудопоявление Куртанг (район Буотама центральная Якутия)];

– комплексным составом руды [доля оксидов следующих элементов (Na; Mg; Al; Si; P; K; Ca; Ti; V; Cr; Ni; Cu; Zn; Ga; As; Rh; I; Cs; Ba; Pr) составляет в среднем $(0,001 \div 0,3)\%$], включающий примесь марганца ($\text{MnO} = 12,2\%$) и РЗМ ($\text{Tb}_4\text{O}_7 = 0,12\%$; $\text{Dy}_2\text{O}_3 = 0,02\%$; $\text{Er}_2\text{O}_3 = 0,02\%$);

– легковосстановимость руды при плавке;

– уникальность минералого-геохимического состава руды;

– доступность месторождения.

Микролегирующие элементами, обладающими высокими степенями локализации валентных электронов приводит к существенному возрастанию ударной вязкости. В случае низколегированной малоуглеродистой стали добавление редкоземельных металлов приводит к увеличению работы зарождения трещины связано с некоторым уменьшением содержания неметаллических включений, а также изменением их дисперсности и формы. Равномерное распределение мелкодисперсных частиц с жестко направленными связями в объеме образца приводит к более равномерному распределению внешней нагрузки по сечению образца, т. е. охватывается большое количество атомов, что ведет к существенному повышению энергоемкости образца. В таком случае, увеличивается работа зарождения трещины. Снижение работы распространения трещины объясняется тем, что с понижением температуры испытания и ростом скорости деформации увеличивается доля ковалентных связей.

Кроме основных легирующих элементов (Si; Mn; Mg; Cr; Mo; Ni; Cu), в последнее время отмечается увеличение тенденции легирования редкоземельными металлами (La, Ce, Y и др.) металлов и сплавов для улучшения физико-механических свойств.

Введение микродобавок редкоземельных металлов (в виде модифицирующих добавок) дает положительные эффекты:

– измельчение зерна 1–2 балла (ГОСТ 5639-65);

– количество неметаллических включений не изменяется, но наблюдается их коагуляция и замена строчечных включений округлыми и точечными;

– снижение относительной энергии границ зерен;

– сдерживание роста аустенитного зерна в интервале $900-1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Наш подход к *научным основам создания* высокопрочных, хладостойких низколегированных феррито-перлитных сталей базируются на следующих принципах:

– микролегирующие карбо- и нитридообразующими элементами: NbC, NbN, Nb (C, N); VC, VN, V (C, N); TiC, TiN, Ti (C, N); AlN.

– комплексное соединение этих микролегирующих элементов: (V, Nb) C; (V, Nb) N; (V, Nb) (C, N).

– определенная технология производства.

– термическая обработка.

Параметрами оптимизации являлись:

– временное сопротивление;

– предел текучести;

– относительное удлинение;

– ударная вязкость;

– температура вязко-хрупкого перехода.

Минеральное сырье

Железомарганцовистые руды Ленского рудного поля характеризуются следующими свойствами:

- высокое процентное содержание железа;
- комплексный состав руды, включающий примесь марганца;
- легковосстановимость руды при плавке;
- уникальность минералого-геохимического состава руды;
- доступность месторождения.

Выводы.

1. Наиболее перспективным путем повышения прочности и хладостойкости сталей является регулирование размером зерен. Уменьшение действительных и наследственных зерен может быть достигнуто несколькими технологическими приемами – оптимизацией химического состава стали и технологии ее выплавки; микролегированием, например, одним или несколькими элементами из группы V, Nb, Zr, Ti; модифицированием редкоземельными и щелочноземельными металлами с целью глобуляризации неметаллических включений.

2. С этой точки зрения особый интерес представляют собой природнолегируемые железомарганцевые руды Ленского рудного поля республики Саха (Якутия), в составе которых содержатся как микролегирующие, так и модифицирующие примеси.

Литература

1. Гаврилин И.В., Рыжиков А.А., Каллиоппин И.К. О выборе рациональных модификаторов первого рода для стали // Изв. ВУЗов Черная металлургия. 1977. С. 4–9.

2. Усманов Р.Г., Голубцов В.А. Мелкокристаллические быстроохлажденные модификаторы: опыт применения при получении чугуна стального литья // Сб. докладов Литейного консилиума. Теория и практика металлургических процессов при производстве отливок из черных сплавов, Челябинск: Челябинский дом печати, 2007. 124 с.

3. Шуб Л.Г., Ахмадеев А.Ю. О целесообразности модифицирования стального литья // Металлургия машиностроения. 2006. № 5. С. 38 – 41.

4. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Металлургия, 1986. 271 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПЭНД НА ПОЛИГОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ «ЯКУТСК»

Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

evgspar@rambler.ru

Представлены результаты длительных климатических испытаний материалов на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД), различного функционального назначения. Показано, что введение в ПЭНД трубного назначения стабилизирующих добавок обеспечивает значительный рост их стойкости к воздействию естественных климатических факторов. За счет формирования пространственной сетки стабилизирующие добавки не рекомендуются применять в составе электропроводящих материалов, так как их введение приводит к существенному снижению электропроводности.

Многолетняя практика применения полимерных материалов на открытом воздухе показала, что под воздействием естественных климатических факторов (низкие и высокие температуры, суточные и сезонные перепады температур, воздействие солнечного излучения и пр.) скорость деградации материалов и изделий из них значительно возрастает. Одним из путей повышения надежности и оценки работоспособности полимерных изделий при эксплуатации в рабочих узлах техники Севера, является изучение процессов их старения в условиях резко-континентального климата путем проведения комплексных климатических испытаний.

На полигоне климатических испытаний «Якутск», расположенном на территории г. Якутска в течение нескольких десятков лет осуществляются испытания полимерных и дорожно-строительных материалов с целью определить их стойкость к воздействию естественных климатических факторов. В период с 2017 г по настоящее время проводятся исследования стабилизированных материалов на основе полиэтиленов низкого давления (ПЭНД) различных марок, предназначенных для изготовления продукции различного функционального назначения. План климатических испытаний составлен с учетом требований ГОСТ 9.708-83. Продолжительность испытаний составляла 18–36 месяцев с этапами выемки после 1, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24 и 36 мес. экспонирования. Для контроля стойкости материалов к климатическому старению определяли динамику изменения физико-механических характеристик материалов по ГОСТ 11262-2017 и 9550-81, показателя текучести расплава (ПТР) по ГОСТ 3682-2000, плотности по ГОСТ 15139-69, удельного объемного электрического сопротивления по ГОСТ 20214-74. Для определения характера химических изменений, протекающих в материале при экспонировании, проводили ИК-спектроскопические исследования (Nicolet Protege 460 ESP (США)). Исследование степени кристалличности, температуры и энтальпии плавления проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе NETZSCH DSC 204 HP Phoenix (Германия).

Длительные климатические испытания полиэтилена марки 273-83 (ПАО «Казаньоргсинтез»), проведенные в период с июля 2017 по октябрь 2018 г, показали, что одним из наиболее чувствительных физических параметров к старению является удлинение при разрыве. После экспонирования в течение 9 месяцев, деформационные свойства 273-83 сохраняются на удовлетворительном уровне, после 12 месяцев экспонирования материал охрупчивается (рисунок 1, а). ИК-спектроскопические исследования показали (рисунок 1, б), что с увеличением продолжительности экспонирования величины карбонильного и винильного индексов повышаются, что свидетельствует о протекании реакций окисления и разрыва макромолекулярных цепей, сопровождающегося увеличением количества концевых винильных групп. Причиной охрупчивания материала при экспонировании является структурирование аморфной части полимерного материала, обеспечивающего его пластичность, за счет укорочения полимерных

цепей, характеризующихся более высокой подвижностью, в особенности в периоды, сопровождающиеся значительным повышением температуры окружающего воздуха. Подробнее с результатами данного исследования возможно ознакомиться в [1].

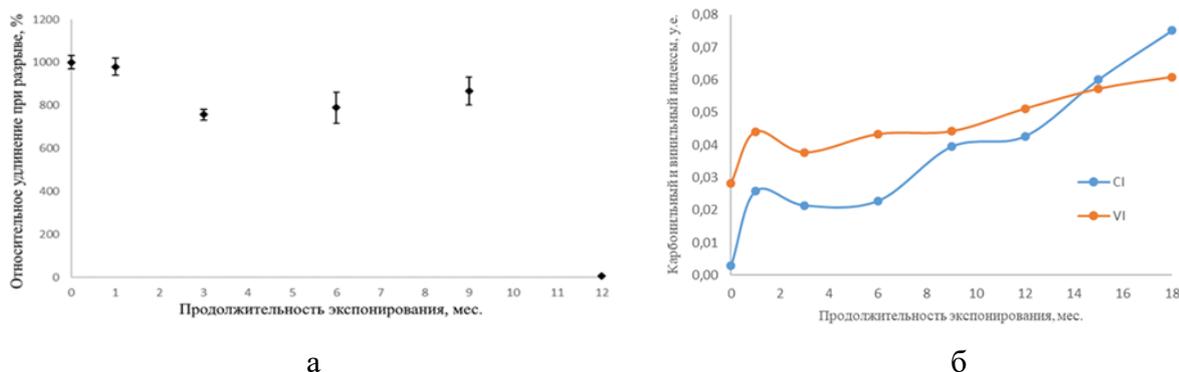


Рис. 1. Зависимость удлинения при разрыве (а) и величины карбонильного (CI) и винильного индексов (VI) полиэтилена марки 273-83 от продолжительности экспонирования

В последние годы на отечественном рынке появляются новые эффективные климатические стабилизирующие добавки. Исследования влияния стабилизаторов марок СО-3, СО-4 и Стафен (Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН) на свойства ПЭНД марки 273-83 при натурном экспонировании, показало, что стабилизаторы марок СО-3 и СО-4 увеличивают стойкость полимера к воздействию естественных климатических факторов на 25% (с 9 до 12 месяцев) (рисунок 2).

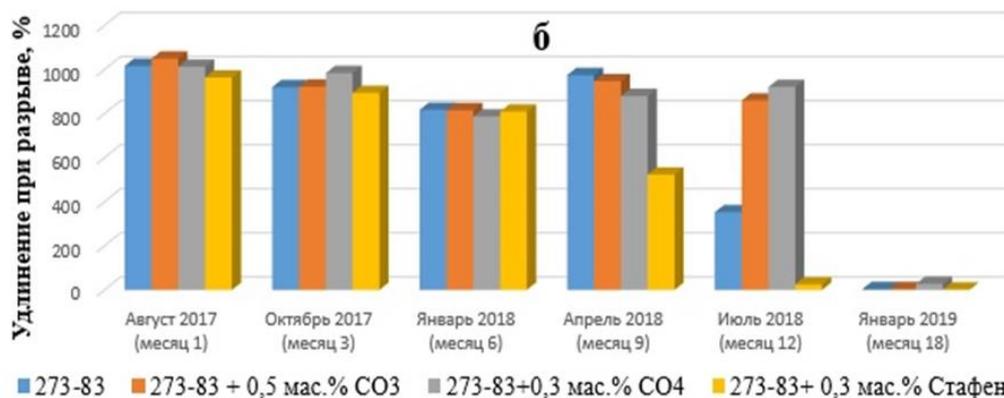


Рис. 2. Удлинение при разрыве ПЭ марки 273-83, содержащего стабилизирующие добавки, в зависимости от продолжительности экспонирования

Для транспортировки топлив в отдаленные арктические районы Республики Саха (Якутия) применяется полиэтиленовый электропроводящий композит, состоящий на 50% из стандартного ПЭНД и 50% электропроводящего компаунда марки Pre-elec PE1296 фирмы PREMIX (Финляндия). Экспонирование данных материалов, в том числе со стабилизирующими добавками марок СО-3, СО-4 и Стафен, показало, что сажа, содержащаяся в большом количестве в данных композитах для придания материалу электропроводных свойств, обеспечивает материалу достаточно высокую устойчивость к воздействию естественных климатических факторов. Введение в состав таких композитов стабилизирующих добавок приводит к снижению электропроводности композитов. В таблице 1 для примера представлены результаты исследования удельного объемного электрического сопротивления нестабилизированного композита, и материала, содержащего СО-3 после 18 месяцев экспонирования в отапливаемом помещении, а также на открытом испытательном полигоне в свободном состоянии и в среде бензина.

Таблица 1. Удельное объемное электрическое сопротивление электропроводящих полиэтиленовых композитов после 18 месяцев экспонирования в различных условиях

Материал	Отапливаемое помеще- ние (контроль)	На полигоне климатиче- ских испытаний в сво- бодном состоянии	На полигоне климатиче- ских испытаний в среде бензина
273-83/PE1296	172	22	127
273-83/PE1296+0,5 мас.% СО-3	1479	1431	76706

Видно (таблица 1), что введение стабилизатора в состав композита приводит к многократному повышению удельного сопротивления, усугубляющегося при экспонировании в среде бензина. Полученный результат обусловлен формированием поперечных сшивок, а также набуханием, вызывающим разрыв некоторых токопроводящих цепочек [2].

Таким образом, показано, что в зависимости от состава и функционального назначения полиэтиленовых композитов, их стойкость к воздействию естественных климатических факторов существенно различается. Для достоверного оценивания стойкости материалов к воздействию ожидаемых эксплуатационных условий следует проводить длительные климатические испытания.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ № 122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г. Исследование механизмов деградации полиэтилена при продолжительном воздействии естественных климатических факторов // Высокмолекулярные соединения. Серия Б. – 2023. – Т. 65, № 5. – С. 392–402. DOI: 10.31857/S2308113923700572
2. Петухова Е.С., Федоров А.Л., Аргунова А.Г. Исследование климатической стойкости полиэтиленовых электропроводящих материалов для топливных канистр в условиях Севера и Арктики // Материаловедение. – 2023. – № 2. – С. 12–17. DOI: 10.31044/1684-579X-2023-0-2-12-17

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-251-253

РАЗРАБОТКА МАШИНЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Федоров А.Л.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

gelvirb@mail.ru

В данной работе приведены характеристики и возможности разработанной машины трения для исследования полимерных материалов, отличительной особенностью которой является компактность и мобильность. Данное свойство машины позволит проводить испытания внутри термических, барометрических и др. видов камер, обеспечивающих всевозможные условия.

Исследование процессов изнашивания полимерных материалов является важной составляющей при определении надежности узлов трения, в которых эти материалы используются. Часто на практике с целью исследования триботехнических характеристик используются испытательные машины универсального действия, которые обеспечивают различные схемы трения. Однако, универсальность этих машин прямо пропорциональна их стоимости. В нынешних реалиях экономической и политической ситуации в стране доступность оборудования для приобретения (либо самого оборудования, либо аксессуаров) очень сильно снижена.

В связи с этими обстоятельствами, разработка испытательного оборудования является актуальной задачей. Кроме выигрыша в стоимости при самостоятельной разработке, имеется преимущество в том, что разрабатываемое оборудование можно оснастить всевозможными аксессуарами по мере востребования тех или иных задач, например, оснастить термокамерой, оборудовать камерой для поддержания определенной газовой среды и влажности и т. д. В рамках данной работы была разработана машина трения, обеспечивающая схему трения «палец-диск». Разрабатываемая машина трения, благодаря своим компактным габаритам может быть помещена в термическую камеру и, таким образом, можно провести испытания материалов в температурном диапазоне, на который способна термическая камера. Опять же, благодаря малым габаритам машину можно установить в вакуумную/барометрическую камеру, чтобы проводить испытания в различных газовых средах, либо в вакууме или при разных давлениях. Кроме этого, машина трения сконструирована таким образом, чтобы можно было использовать оптические/спектральные оснастки для визуального/спектроскопического наблюдения за поверхностью контртела в режиме *in-situ* для получения более информативных данных.

Технические характеристики машины трения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики машины трения

Параметр	Значение
Габариты (Д/Ш/В), мм	300x140x250
Вес (без учета грузов для создания усилия прижима), кг	10,5
Прижимающее усилие, Н	0–200
Скорость оборотов диска, об/мин.	5–500
Скорость скольжения, м/с	0,01–1
Потребляемая мощность, Вт, не более	500
Электропитание	~230 В/50 Гц

На рис. 1 приведена фотография машины трения.



Рис. 1. Внешний вид машины трения

Кинематика. Принципиальная кинематическая схема машины трения приведена на рис. 2. Вращение передается штоку (1), на котором установлено контртело (диск) (2) от двигателя (3) через ременную передачу. В качестве ремня использован зубчатый ремень (4), в качестве шкивов использованы зубчатые шкивы (5). Выбор такого рода передачи обусловлен устранением эффекта проскальзывания при повышенных нагрузках на вращающийся диск.

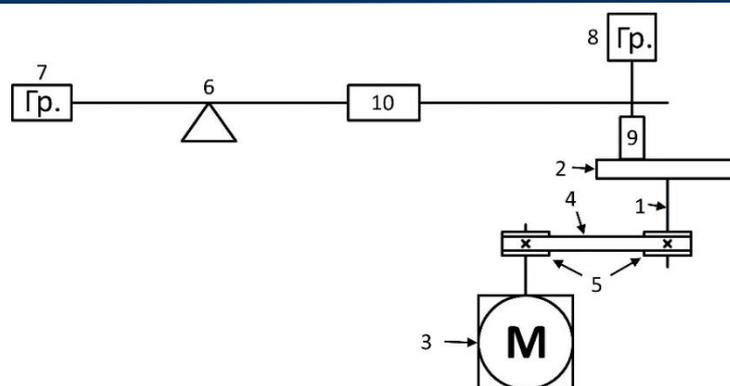


Рис. 2. Кинематическая схема машины трения

Механизм нагружения образца и измерение момента трения. Механизм нагружения образца при трении можно также рассмотреть на рис. 2. Механизм нагружения выполнен в виде коромысла (6). С противоположной стороны от конца, где устанавливается образец (9) имеется груз с резьбой (7), предназначенный для уравнивания рычага (коромысла). Нагружение непосредственно осуществляется установкой грузов (8) над той частью коромысла, где закреплен образец. Выбор того или иного значения нагрузки производится подбором грузов. Тензометрический датчик (10), установленный в сам рычаг, используется для измерения сил, отклоняющих образец при вращении диска, из которых рассчитывается коэффициент трения.

Электроника. Электронное управление осуществляется на основе Arduino UNO. В задачи электроники входит, управление электромотором, считывание сигнала с датчика момента трения и расчет коэффициента трения, запись данных на карту памяти, отсчитывание количества времени, которое соответствует определенному пути трения. Рассчитанные значения коэффициента трения также передаются через последовательный порт, на случай если необходимо отображать данные на компьютере в режиме реального времени.

Тарировка датчика момента трения. В качестве датчика момента трения используется тензометрический датчик (измерение силы до 200Н) совместно с платой АЦП НХ711. Данный датчик можно калибровать при помощи весовых гирь, установив машину трения в горизонтальное положение, чтобы вектор направления силы датчика совпадал с вектором ускорения свободного падения тел, т. е. вертикально вниз. Другой способ калибровки подразумевает использование поверенного динамометра.

Заключение. Разработана машина трения для исследования полимерных материалов. Уникальностью данной машины является мобильность и компактность, которые смогут способствовать обеспечению определенных условий при проведении триботехнических испытаний.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-253-256

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОЛИЭТИЛЕНА

Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г.

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

gelvirb@mail.ru

В работе представлены результаты исследования эффективности отечественных стабилизаторов на основе пространственно-затрудненных фенолов, введенных в полиэтилен. Эффективность оценена по времени, которое необходимо для начала окисления полимера при температурном воздействии в среде воздуха.

Полиэтилен является наиболее распространенным полимерным материалом во многих отраслях. Изделия из полиэтилена должны быть устойчивы к воздействию окружающей среды, особенно к солнечному излучению при эксплуатации на открытом воздухе. Длительное

воздействие ультрафиолетового (УФ) излучения вызывает фотодеградацию полиэтилена, приводящую к изменению цвета, структуры поверхности, а также ухудшению механических, физических и химических свойств материала. Фотодеградация вызывает окисление, разрыв полимерных цепей и потерю функциональных групп. Для защиты полиэтилена от УФ-излучения в него добавляют стабилизаторы, в частности, пространственно-затрудненные фенолы, которые прерывают цепь радикальных окислительных реакций. Сами по себе пространственно-затрудненные фенолы являются достаточно эффективными, однако их эффективность может быть существенно повышена путем добавления в их структуру других фрагментов или функциональных групп, например, 2-аминотиазола, фосфатной группы, серы и многих других [1]. Среди гибридных стабилизаторов наиболее привлекательными, благодаря нетоксичности и высокой эффективности, являются серосодержащие производные пространственно-затрудненных фенолов [2]. В данной работе исследовано стабилизирующее действие на полиэтилен отечественных марок стабилизаторов путем определения времени окислительной индукции (ВОИ) на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК). Оценка эффективности добавок, предназначенных для защиты от УФ-излучения, вполне может быть осуществлена путем сравнения термической стойкости образцов, содержащих эти добавки, так как при ультрафиолетовом и термическом воздействии происходят одни и те же деструктивные процессы, радикально-окислительного типа [3].

Объекты и методы исследования. В качестве полимерной матрицы использован полиэтилен низкого давления марки Снолен EP 0.26/51N (Газпром Нефтехим Салават). В роли добавок были выбраны стабилизаторы марок СО-3, СО-4, У-меркаптан, Каликсарен и Стафен, представляющие собой пространственно-затрудненные фенолы, в том числе, с сульфидными группами. Структурные формулы данных марок стабилизирующих добавок представлены на рисунке 1.

Для оценки эффективности представленных стабилизаторов проведена серия измерений с использованием дифференциального сканирующего калориметра NETZSCH DSC 204 HP Phoenix. Испытание проведено согласно ГОСТ Р 56756-2015, в котором подразумевается нагрев полимерного образца в среде инертного газа (азот), с последующей сменой инертного газа на окислительную атмосферу (воздух) и отсчет времени до момента начала термической деструкции. Термограмма испытаний приведена на рис. 2. В данном случае нагрев осуществляли до 240 °С. Навеска образца составляла $5 \pm 0,2$ мг.

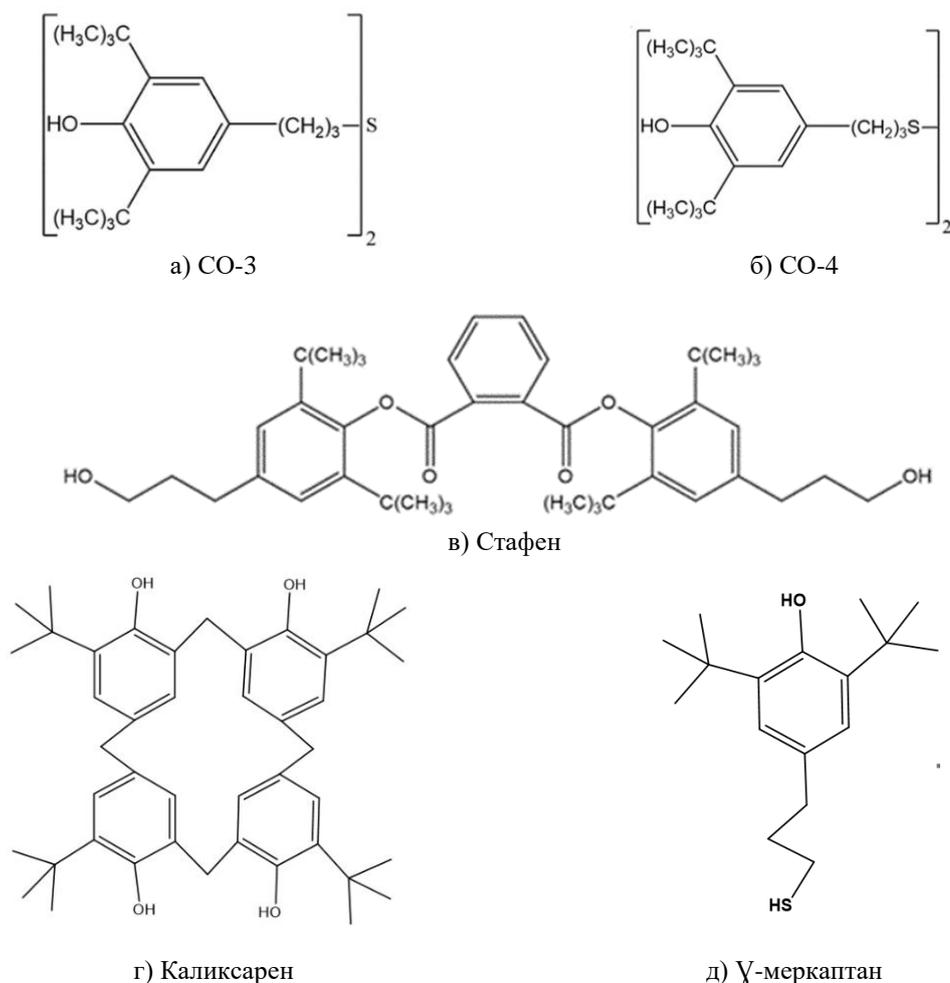


Рис. 1. Структурные формулы стабилизирующих добавок

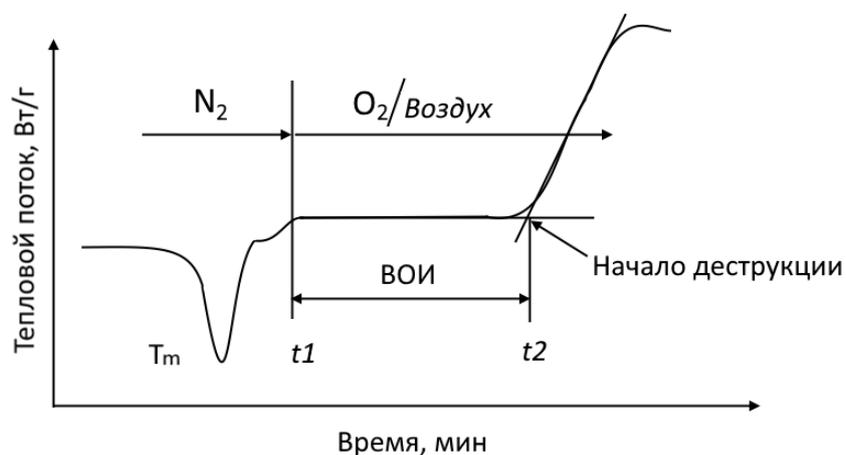


Рис. 2. Термограмма ДСК образца при определении времени окислительной индукции (ВОИ)

Содержание стабилизаторов в полиэтилене составляла 1 масс.%.
Результаты. По результатам испытаний образцы имеют следующие ВОИ:

Таблица 1. Время окислительной индукции образцов в зависимости от типа стабилизатора

Образец	ВОИ, мин
Без стабилизатора	3,4
+1 мас.% CO3	40,4
+1 мас.% CO4	33,8
+1 мас.% У-меркаптан	9,3
+1 мас.% Каликсарен	21,9
+1 мас.% Стафен	26,8

Полимер без добавок начал термически разлагаться уже по прошествии 3-х минут и имеет самое низкое ВОИ. Наиболее продолжительное ВОИ имеет образец с добавлением стабилизатора CO₃ (более 40 минут). Чуть менее стабильным оказался образец с добавлением CO₄ (почти 34 минут). В то же время образец, имеющий в своем составе третий серосодержащий стабилизатор γ -меркаптан продемонстрировал самое малое ВОИ среди стабилизированных образцов.

Заключение. Показана высокая эффективность стабилизаторов, содержащих серу (CO₃, CO₄), однако, в случае γ -меркаптана несмотря на наличие серы, данный стабилизатор оказался наименее эффективным.

Литература

1. Mankar V. H., Chhavi (2020) Sterically Hindered Phenols as Antioxidant // European Journal of Molecular & Clinical Medicine, vol. 7, no. 7, P. 3481–3491.
2. Синтез и исследование антиокислительных свойств новых серосодержащих производных пространственно-затрудненных фенолов / А. Е. Просенко, Е. И. Терах, Н. В. Кандалицева [и др.] // Журнал прикладной химии. 2001. Т. 74. № 11. С. 1839–1842.
3. Wang, Y.; Feng, G.; Lin, N.; Lan, H.; Li, Q.; Yao, D.; Tang, J. Degradation and Life Prediction of Polyethylene. Encyclopedia. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/42013>.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-256-259

ПРИМЕСНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДАМИ НРНТ И БАРС АЛМАЗОВ

Федотова М.А.¹, Эверстова Д.Г.², Иванов М.А.¹

¹ Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

ma.fedotova@s-vfu.ru

Объектами исследования являются 22 выращенных методами НРНТ и БАРС алмаза, ограненных в форме Кр-57. Методом ИК-спектроскопии были обнаружены азот в одиночной и агрегированных формах, также водород и другие дефекты. Вычислены концентрации выявленных дефектных центров. В образцах, выращенных НРНТ-методом, выявлены В- и Х-центры; в алмазах БАРС – С-, А-, В-, Х-, Н-центры, определены их концентрации. Описана люминесценция исследованных образцов.

Выращенные в лабораторных условиях алмазы являются аналогами природных, имея одинаковые с ними кристаллическую структуру, физические и химические свойства. Поскольку отличить их можно по примесному составу, для идентификации природных/синтетических алмазов требуется специальное лабораторное оборудование, основанное на физических методах. Одним из основных методов диагностики алмаза является ИК-спектроскопия. В данной работе ставилась цель определить примесные дефекты и их концентрации в 22 синтетических ограненных в форме Кр-57 алмазах, 12 из которых были выращены методом НРНТ (high pressure high temperature), и 10 – методом БАРС (беспрессовый аппарат разрезная сфера). Вес образцов варьировался от 0,15 до 1,16 карат.

Спектры регистрировались на ИК-микроскопе Perkin–Elmer Spotlight 200i (Perkin Elmer Inc., США). Обработка спектров проводилась методом базовой линии и нормирования по 3 точкам в программе Excel. В настоящее время используют разные методики расчета концентраций дефектных центров, которые применяются к различным типам алмаза по физической классификации. В данной работе для расчета концентрации А- и В- агрегированного азота в смешанном типе алмаза был использован унифицированный метод, предложенный в работе [1]. Для «чистых» типов алмаза использовался метод линейной зависимости содержания при-

месей от коэффициента поглощения соответствующих спектральных максимумов [2]. За концентрацию водорода и бора были приняты значения их коэффициентов поглощения и обозначены в усл.ед., что также принято в реализации упомянутого унифицированного метода.

Выращенные методом НРНТ ограненные алмазы были бесцветными за исключением двух образцов, в которых наблюдался ясно различимый голубой цвет. Образцы были средней чистоты, так как имели различные видимые включения от незначительных до больших размеров. В синтетических алмазах, выращенных методом НРНТ, характерно присутствие металлических включений, облаков и трещин. При выращивании методом НРНТ кристалл алмаза может «улавливать» частички металла из расплавленного флюса, который в основном состоит из железа, иногда из никеля или кобальта [3]. В некоторых исследованных кристаллах алмаза наблюдались темные включения с металлическим блеском или же они казались прозрачными из-за сильного отражения света от его поверхности. Также была обнаружено, что образцы данной группы инертны под УФ-излучением.

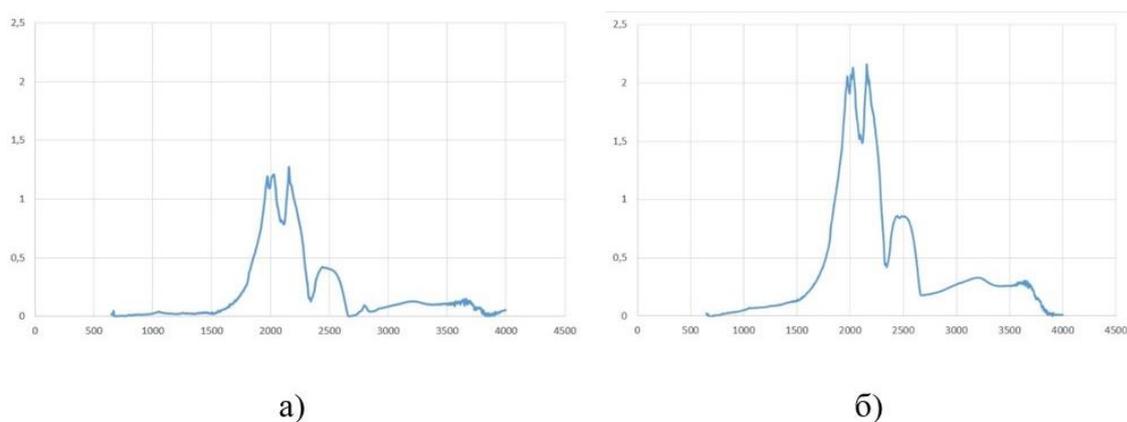


Рис. 1. Спектры образцов, выращенных методом НРНТ: а – образец М-1, б – образец М-10

В ИК-спектрах группы алмазов, выращенных методом НРНТ (рис. 1), обнаружены поглощения в пиках 1054 см^{-1} , 1331 см^{-1} . Эти линии тесно связаны друг с другом и соответствуют X-центру [5], который наблюдается лишь в выращенных алмазах. Также были обнаружены пики в полосах поглощения 2803 см^{-1} и 2941 см^{-1} , которые отвечают примеси бора и наблюдались у 6 образцов. Бор вызывает голубой цвет в алмазе, так у 2-х образцов с видимым голубым цветом наблюдалась самая высокая концентрация бора. У одного образца наблюдался A-центр, концентрация которого составляет около 4 ppm. Считается, что алмазы, выращенные методом НРНТ, относятся исключительно к типу II. В данном случае, так как концентрация A-агрегированного азота исключительно низка, можно отнести данный образец к типу IIb. Таким образом, 6 образцов данной группы были отнесены к типу IIa, а также 6 образцов – к типу IIb (таблица 1).

Таблица 1. Концентрации примесей образцов, выращенных методом НРНТ

№	Образец	A-центр, ppm	Бор, усл.ед.	X-центр, усл.ед
1	САМ-1	~4	0,9	0,4
2	САМ-2	-	0,7	0,3
3	САМ-3	-	-	0,2
4	САМ-4	-	-	-
5	САМ-5	-	-	0,3
6	САМ-6	-	1,5	0,4
7	САМ-7	-	3,1	0,1
8	САМ-8	-	-	0,3
9	САМ-9	-	1,3	0,4
10	САМ-10	-	-	0,4
11	САМ-11	-	1,3	0,5
12	САМ-12	-	-	0,1

Для группы кристаллов, выращенных методом БАРС, характерна высокая степень чистоты, так как процесс синтеза позволяет контролировать содержание примесей в кристаллической решетке алмаза. Также благодаря такой возможности, алмазы могут иметь разнообразные цветовые оттенки, включая фантазийные цвета [4]. Исследованные образцы данной группы имели фантазийный желтый цвет различной интенсивности.

В ИК-спектрах образцов БАРС зарегистрированы полосы поглощения: 2688 см^{-1} , что соответствует наличию примеси водорода; 1344 см^{-1} и 1131 см^{-1} , что отвечает С-центру; 1282 см^{-1} и 1175 см^{-1} – А- и В-дефекты, соответственно; также 1054 см^{-1} , что отвечает Х-центру (рис. 2). Данные вычисленных концентраций по зарегистрированным спектрам показали, что в соответствии с увеличением концентрации примеси одиночного С-центра в алмазе увеличивалась и интенсивность цвета образцов. Например, образец Н-2 имел самое низкое содержание азота из всей группы образцов и, соответственно, у него проявилась самая низкая интенсивность желтого цвета.

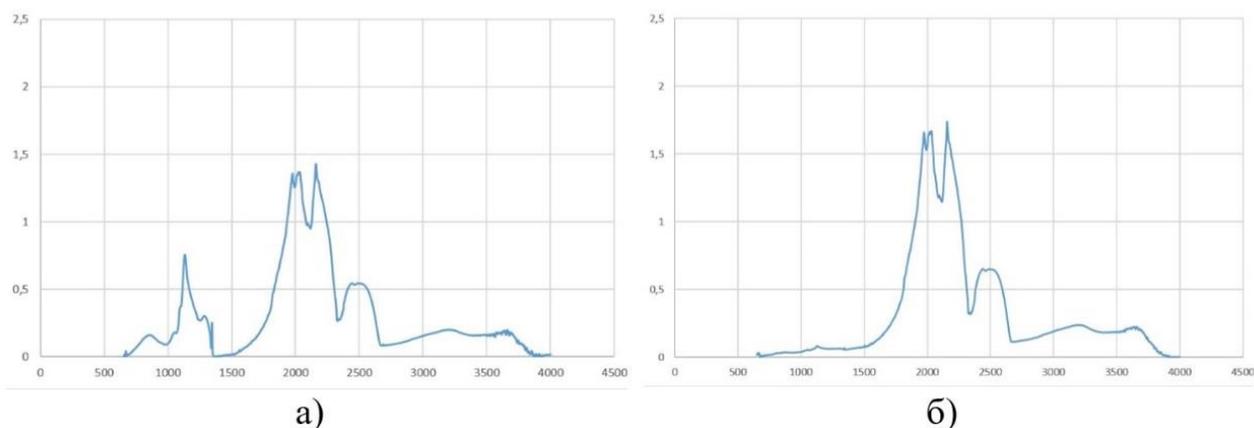


Рис. 2. Спектры образцов, выращенных методом БАРС: а – образец Н-1, б – образец Н-2

По нашим наблюдениям, коричневый и желтый составляющие цвета 4-х образцов накладывались друг на друга, поэтому цвет этих образцов казался более насыщенным. Даже если у образца низкая концентрация одиночного азота, за счет коричневого цвета, который проявляется из-за наличия пластической деформации в алмазе, наблюдался яркий желто-коричневый цвет. Среди образцов, выращенных методом БАРС, 7 образцов отнесены к типу IaA+Ib, 2 – к типу IaAB + Ib, 1 образец – к типу Ib (таблица 2).

Таблица 2. Концентрация примесей образцов, выращенных методом БАРС

№	Образец	С-центр, ppm	А- центр, ppm	В-центр, ppm	Х центр, усл.ед	Водород усл.ед	Люминесценция	
							ДВ	КВ
1	САН-1	169,5	44,7	-	1,6	0,8	-	-
2	САН-2	14,8	-	-	0,4	0,9	-	-
3	САН-3	128,4	168,4	-	-	0,7	Сильная	Слабая
4	САН-4	138	155,	105,3	-	0,9	Умеренная	Слабая
5	САН-5	139,8	145,2	112,1	1,1	0,9	Слабая	-
6	САН-6	120,7	52,3	-	1	0,7	Слабая	-
7	САН-7	166,4	73,9	-	1,5	0,7	Слабая	-
8	САН-8	166,8	74,1	-	1,5	0,7	-	-
9	САН-9	132	39,6	-	1,1	0,9	-	-
10	САН-10	112,6	26,8	-	1	0,8	-	-

У группы образцов алмазов, выращенных методом БАРС, наблюдалась люминесценция. В работе [5] указывается, что у выращенных алмазов интенсивность свечения в КВ УФ области бывает выше, чем в ДВ УФ области. В 5 образцах наблюдалась желтая люминесценция, при этом в КВ области люминесцировали только 2 образца. При сравнении дефектных центров этих образцов было замечено, что только у этих 2-х образцов отсутствует Х-центр.

Стоит обратить внимание и изучить этот вопрос детальнее, так как, возможно, X-центр отвечает за тушение люминесценции в алмазах.

Таким образом, результаты исследования показали следующее. Образцы алмазов, выращенных методом НРНТ, относились к типу IIa и IIb (50/50). Установлено, что при концентрации примеси бора выше 1,55 усл.ед. в алмазах, выращенных методом НРНТ, наблюдается видимый голубой цвет. Алмазы, выращенные методом БАРС, содержали C-, A-, B-, H-, X-центры. Большинство из них отнесены к смешанному типу IaA+Ib и IaAB + Ib, при этом 1 образец принадлежал к чистому типу Ib.

Концентрация C-центра в алмазе напрямую влияет на интенсивность желтого цвета. Однако при наличии дополнительной коричневой составляющей образец приобретает интенсивный желто-коричневый цвет. Яркий чистый желтый цвет у алмаза, выращенного методом БАРС, наблюдался при концентрации одиночного атома азота более 100 ppm.

По чистоте алмазы, выращенные методом БАРС, были лучшими среди исследованных в данной работе, соответствующими 1–2 по стандартной оценке. Чистота алмазов, выращенных методом НРНТ, соответствовала 3–7. Половина образцов, выращенных методом БАРС, люминесцировала желтым цветом в длинноволновой области, 2 образца из них люминесцировали также в коротковолновой области УФ-излучения. При этом НРНТ-алмазы были инертны под УФ-излучением.

Литература

1. Хачатрян Г.К. Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений: дис. ...канд. гео.-мин. наук : 25.00.11.,25.00.05/ Хачатрян Галина Карленовна; ФГУП ЦНИГРИ. – Москва, 2016. – 254 с.
2. Boyd S.R. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond/ S.R. Boyd, I. Kiflawi, G.S. Woods // *Phil. Mag.* В. 1995. V. 72. P. 351–361.
3. Лагутенков, А. А. Идентификация синтетических алмазов / А. А. Лагутенков // *Международный научный журнал «Символ науки»*. 2017. № 02-2/2017. С. 42–47.
4. Пальянов Ю. Н., Малиновский И. Ю., Борздов Ю. М., Хохлаков А. Ф., Чепуров А. И., Годовиков А. А., Соболев Н. В. Выращивание крупных кристаллов алмаза на беспрессовых аппаратах типа «разрезная сфера» / Пальянов Ю. Н. и др.// Доклады Академии наук СССР. 1990. № 5. С. 1221–1224.
5. Серов Р.С., Машкина А.А. Исследование бесцветных синтетических НРНТ бриллиантов российского производства / Серов Р.С., Машкина А.А. [Электронный ресурс] // Геммологический Центр МГУ: [сайт]. URL: <https://www.gem-center.ru/Colorless-russian-НРНТ.htm> (дата обращения: 01.08.2024).

РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Шадринов Н.В.

Институт проблем нефти и газа СО РАН
обособленное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск
nshadrinov@gmail.com

Исследованы закономерности, связанные с рецептурно-технологическими параметрами получения полимерэластомеров на основе маслобензостойкого бутадиен-нитрильного каучука и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Исследовано влияние режима смешения полимеров, молекулярной массы полиэтилена, количество акрилонитрила в каучуке, концентрации сверхвысокомолекулярного полиэтилена в смеси, а также состав вулканизирующей системы на комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств вулканизатов.

Использование смесей полимеров является весьма эффективным и широко применяемым способом при создании материалов с заданными свойствами. Путем смешения каучуков с термопластичными полиолефинами можно получить морозостойкие полимерэластомерные материалы, обладающие высоким комплексом технических свойств, позволяющих использовать их в качестве уплотнительных устройств техники, эксплуатируемой в климатических условиях Севера.

Полимерэластомеры на основе термодинамически несовместимой пары каучука и термопластичного полиолефина относятся к несмешиваемым смесям с гетерогенной морфологией, где микрофазы термопласта распределены в непрерывной фазе эластомера. Известно [1–3], что достижение высокого комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств на основе подобных материалов зависит не только от физико-химических и структурных особенностей смешиваемых полимеров, но и многих других технологических факторов их переработки.

В данной работе приведены результаты изучения закономерностей, связанных с рецептурно-технологическими параметрами изготовления полимерэластомеров на основе маслобензостойкого бутадиен-нитрильного каучука (БНК) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Рассмотрены такие значимые технологические аспекты получения полимерэластомеров как режим смешения компонентов [4], ММ полиэтилена [5], количество акрилонитрила в БНК, концентрация СВМПЭ в смеси, а также состав вулканизирующей системы [6–7], влияющие на перерабатываемость смеси и позволяющие достигать высокий комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств вулканизатов.

Исследования проведены на полимерэластомерах на основе разных марок промышленно выпускаемого БНК содержащего от 18 до 40% акрилонитрила (БНКС-18АМН, БНКС-28АМН и БНКС-40АМН) производства ОАО «Красноярский завод СК» и двух разных фракций полиэтилена: ПЭНД с ММ от 0,3 до $0,5 \times 10^6$ г/моль, представленные марками GHR 8020 и 273-83; СВМПЭ с ММ от 3,9 до $9,2 \times 10^6$ г/моль, представленные марками GUR 4113, GUR 4120 и GUR 4150.

В результате проведенных исследований установлено, что в разработке морозостойких маслобензостойких полимерэластомеров наиболее высокий комплекс физико-механических свойств, морозостойкости, маслобензостойкости и износостойкости достигается при использовании БНК с низким содержанием НАК от 17 до 23% и 10 мас. ч. СВМПЭ со средневязкостной ММ от 3,9 до $9,2 \times 10^6$ г/моль путем вулканизации комбинированной серо-пероксидной системой. При этом, в целях упрощения технологии переработки, смешение компонентов полимерэластомерной смеси можно проводить по одностадийному режиму смешения СВМПЭ с каучуком до или после введения вулканизирующей группы и наполнителей.

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.

Литература

1. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров. М.: Химия, 1980. 304 с.
2. Utracki L.A. Polymer blends handbook. Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. 1442 p.
3. Muralisrinivasan N.S. Polymer Blends and Composites: Chemistry and Technology. Massachusetts: Scrivener Publishing LLC, 2017. 324 p.
4. Шадрин Н.В., Федорова А.Ф., Гоголев В.Д. Сравнительный анализ влияния ПЭНД и СВМПЭ на свойства бутадиен-нитрильной резины // Химическая технология. 2024. № 1. С. 8–15.
5. Shadrinov N.V., Borisova A.A., Khaldeeva A.R., Antoev K.P. Influence of the Technological Mode of Mixing and Curing System on the Properties of Compositions Based on Nitrile Rubber and Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene // Inorganic Materials: Applied Research. 2023. Vol. 14. No. 5–6. P. 1395–1401.
6. Shadrinov N.V., Khaldeeva A.R., Fedorova A.L., Kondakov M.N., Sokolova M.D. Effect of Vulcanization System on the Structure and Properties of Polymer-Elastomer Composite Materials // Polymer Science, Series A. 2023. Vol. 65. No. 5. P. 374–383.
7. Shadrinov N.V., Gogolev V.D. Rheological and Physical and Mechanical Properties of Frost-Resistant Elastomer Blends // Inorganic Materials: Applied Research. 2023. Vol. 14. No. 4. P. 921–927.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-261-265

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ОЧАГОВОЙ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ, ПОВЛЕКШЕЙ КВАЗИДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Махарова С.Н., Яковлева С.П., Васильева М.И.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

snmachar@yandex.ru

Исследовано структурно-механическое состояние алюминиевого сплава в зоне малоциклового усталостной трещины, повлекшей квазидинамическое разрушение сосуда высокого давления. Проведен анализ микроструктуры и распределения микротвердости в областях с разными уровнями поврежденности, включая зону предразрушения. Рассмотрено микростроение усталостного излома. Результаты могут быть полезны при изучении предельных состояний, вызванных внешним нагружением материалов.

Введение. 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. В связи с большой чувствительностью этих процессов к природе материала, влиянию различных технологических, эксплуатационных, конструктивных факторов, они по-прежнему остаются во многом не изученными. Этим определяется актуальность исследования проблем накопления повреждений и развития процессов разрушения в конкретных материалах и объектах с учетом особенностей эксплуатации.

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 важное значение имеет приближение параметров экспериментов к эксплуатационным, а особый интерес представляет возможность выполнения исследований на объектах, разрушившихся в ходе реальной эксплуатации.

Исследование проведено на сосуде высокого давления – несущем металлическом лейнере газотопливного баллона² для сжатого природного газа, претерпевшем квазидинамическое (со значительной фрагментацией конструктивных элементов) эксплуатационное разрушение. Подробно этот случай разрушения баллона рассмотрен в работе [1], в которой показана усталостная природа очаговых трещин, возникших в лейнере под воздействием малоцикловых нагрузок, характерных для режимов работы автомобильных газотопливных баллонов. Анализ структурных изменений в локальных объемах материала лейнера с системой повреждений, сформировавшейся ко времени появления усталостных трещин, позволяет изучить поврежденность, созданную реальными условиями эксплуатации. Цель данной работы – выявить особенности структурно-механического состояния материала в зоне очаговой усталостной трещины, обнаруженной в претерпевшем аварийное квазидинамическое разрушение сосуде высокого давления из деформируемого алюминиевого сплава АД 33.

Методы исследования. В настоящее время нет универсальных методов, позволяющих достаточно объективно и надежно оценить накопленную при эксплуатации структурную поврежденность металла. В работе для изучения поврежденности был использован показатель микротвердости, интегрально отражающий результаты протекающих в металле при воздействии внешних нагрузок процессов упрочнения и разупрочнения, состоящих в изменениях кристаллической решетки, фрагментировании зерен, изменении ориентировок фрагментов и т. п. Очевидно, что сопротивляемость микрообъема материала вдавлению индентора характеризует уровень его дефектности.

Замеры микротвердости проводили на шлифе, перпендикулярном плоскости усталостного излома. Были подготовлены три выборки значений микротвердости из трех зон материала, находящихся на разных расстояниях (по сути, 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); зона 3 – на расстоянии $\approx 1,0$ мм от излома (усталостно-поврежденная зона предразрушения).

Микротвердость измеряли на приборе «ПМТ-3» при нагрузке на индентор 0,098 Н (10 гс). Объем выборки для каждой зоны более 200 отпечатков. Металлографические и фрактографические исследования проведены на оптических микроскопах «Neofot-32», «Axio Observer D1m», стереомикроскопе «Stemi 2000C», электронном растровом микроскопе НІТАСНІ-ТМ 3030.

Основные результаты и их обсуждение. Квазидинамическое разрушение баллона модели БА 100.20.327/1660 произошло летом в гаражном боксе, вскоре после заправки, с отрывом днища лейнера со стороны заглушки, разделением его на несколько частей и метанием осколков. Участки очаговых усталостных трещин сформировались в эксплуатационной горловине (рис. 1 а).

² Баллон относится к металлокомпозитным и представляет собой систему из внутреннего металлического сосуда давления (лейнера), армированного композитной наружной оболочкой, создаваемой методом «мокрой» намотки ленты из высокопрочного волокна.

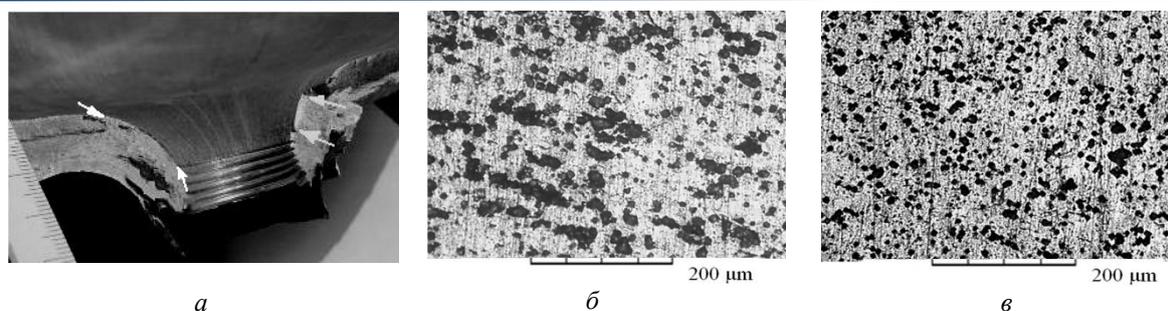


Рис. 1. Разрушившаяся горловина лейнера (*a*), его микроструктура (*б*) и микроструктура контрольного лейнера (*в*). Между стрелками – очаговые усталостные трещины

При анализе микроструктуры для сравнения была исследована микроструктура контрольного лейнера, принадлежащего неразрушившемуся баллону из той же партии, что и аварийный. Оба сосуда высокого давления изготовлены из термически упрочняемого алюминиевого сплава АД 33 на основе системы Al-Mg-Si. Как видно на рис. 1 б, металл аварийного баллона характеризуется неоднородной структурой с кластерами укрупненных железосодержащих частиц упрочняющей интерметаллидной фазы, в расположении которых прослеживается некоторая анизотропия. Укрупнение частиц приводит к уменьшению их количества, увеличивает расстояния между ними и способствует снижению прочности и твердости металла. Кроме того, микрорентгеноспектральным анализом выявлено присутствие в нем хрупких интерметаллидов систем Al-Fe-Si и Al-Fe-Mg-Si, ухудшающих сопротивление зарождению и распространению разрушения. В металле контрольного лейнера частицы интерметаллида значительно более дисперсны и распределены достаточно однородно (рис. 1 в). Значения твердости аварийного и контрольного лейнеров составили соответственно НВ 838 и 866 МПа.

Процессы микродеформаций, протекающие в металлах при действии внешнего нагружения как механизм адаптации к нагрузкам, меняют структурное состояние металла и формируют в нем систему повреждений, что проявляется в изменении микротвердости. Усталостные трещины распространяются в локальных объемах материала со сформировавшейся к этому времени системой повреждений [2]. В силу высокой локальности процессов в вершинах усталостных трещин, можно считать достаточно корректным определение зоны 3, расположенной на расстоянии ≈ 1 мм от берегов усталостной трещины, как зоны предразрушения, сохранившей свое структурно-механическое состояние после ее прохождения. Соответственно, статистика значений микротвердости данной зоны будет отражать особенности поврежденности, накопленной в сплаве на стадии достижения предельного состояния при малоцикловом нагружении. Действительно, уровень развития и характер поврежденности в зоне 3 существенно отличаются от таковых в зоне 1 условно-исходного состояния материала и в промежуточной зоне 2, что показывают гистограммы соответствующих распределений микротвердости на рис. 2. Следует отметить особо высокую неоднородность структуры зоны предразрушения, что следует из сравнения коэффициентов неоднородности структуры, рассчитанных по рассеянию значений микротвердости (отношению средней микротвердости к минимальной) и равных: 1,2 (зона 1); 1,3 (зона 2); 3,2 (зона 3).

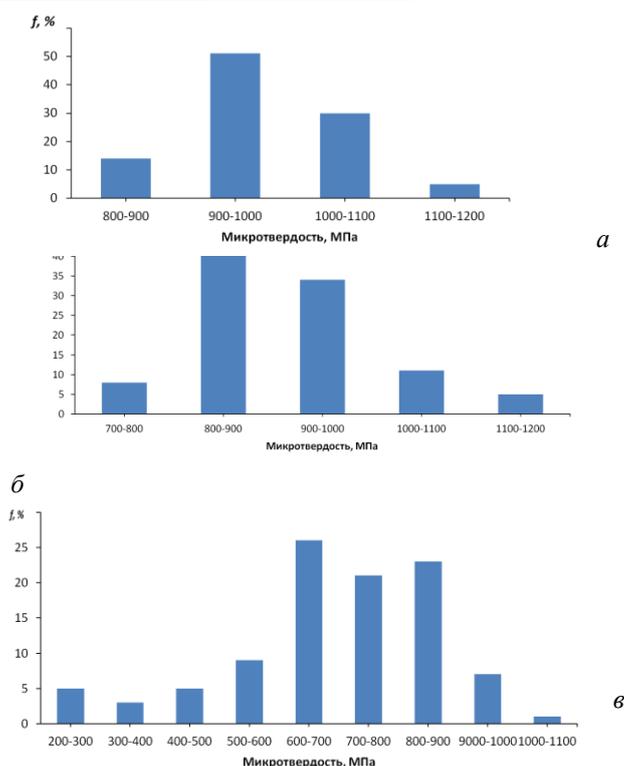


Рис. 2. Гистограммы распределения микротвердости металла лейнера: *а* – в зоне 1, *б* – в зоне 2, *в* – в зоне 3

Очевидно, что изменение микротвердости в процессе циклического нагружения предопределяется качествами материала, его способностью сопротивляться развитию субструктурного разупрочнения (усталостной поврежденности). В ходе эксплуатации в металлах меняется количество зерен с большей и меньшей поврежденностью, приводя к появлению очень высоких и очень низких (по сравнению со средними) значений микротвердости, что влияет и на вид гистограмм. Смещение пика гистограммы микротвердости зоны 2 влево по сравнению с гистограммой зоны 1, то есть возрастание количества низких значений микротвердости, указывает на рост деградации материала и о более высокой степени 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 (рис. 2 в). В этой зоне 3 циклического повреждения вблизи трещины можно говорить уже о системном разрыхлении металла до уровня появления микропустот, так как средняя микротвердость этой зоны существенно ниже средней микротвердости зон 2 и 1: 692, 914 и 987 МПа соответственно. Это согласуется с данными работы [3], в которой было показано, что усталостное разрушение алюминиевого сплава 6061 (зарубежный аналог сплава АД 33) вызвано образованием ряда микропустот, их ростом и последующим слиянием. Такой же механизм усталостного разрушения пластичных сплавов подтверждается в исследованиях [4, 5]. Там же обосновано, что «усталостные пустоты» образуются в результате отделения некогерентных и хрупких вторичных частиц от алюминиевой матрицы на ранних стадиях усталости. Такие пустоты становятся впоследствии видимыми на усталостном изломе после прохождения фронта трещины через них. Фрактографический анализ поверхности усталостного разрушения лейнера выявил на ней вязкие бороздки с ямочным узором, гребнями и канавками, появление которых связано с присутствием в материале микропустот (рис. 3). Кроме того, характерной особенностью излома являются множественные светлые частицы хрупкой интерметаллидной фазы.

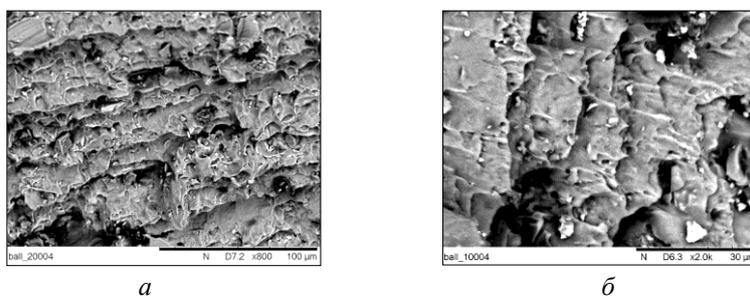


Рис. 3. Типичные участки поверхности усталостного излома лайнера (*a* – $\times 800$; *б* – $\times 2000$)

Заключение. Сравнение результатов статистического анализа значений микротвердости металла зон лайнера с различным уровнем развития поврежденности показало, что возникающая в условиях малоциклового эксплуатационного нагружения зона предразрушения характеризуется: а) существенно меньшими значениями микротвердости; б) существенно большей структурной неоднородностью; в) отклонением закона распределения микротвердости от закона Гаусса.

Пониженная микротвердость зоны предразрушения обусловлена высокой степенью развития процессов разупрочнения и появлением так называемых «усталостных микропустот», формированию которых способствовали частицы хрупких интерметаллидов. Эти факторы снизили сопротивление материала зарождению трещин и его трещиностойкость, что фрактографически проявилось в возникновении картины вязких бороздок с ямочным узором, содержащих множественные частицы интерметаллидов.

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.

Литература

1. 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. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-6-40-47>
2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин Ч. 14. Связь статических и циклических свойств конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития. 2017. № 4 (116). С. 31-43.
3. Wang Q.Y., Kawagoishi N., Chen Q. Fatigue and fracture behaviour of structural Al-alloys up to very long life regimes // Int. J. of Fatigue. 2006. Vol. 28. Is.11. P. 1572-1576.
4. 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.
5. Jogi B.F., Brahmanekar P.K. et al. Some studies on fatigue crack growth rate of aluminum alloy 6061 // Journal of Materials Processing Tech. 2008. No. 201. P. 380-384.

МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ 4. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-266-268

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КАУЧУКОВ НЕПОЛЯРНОЙ ПРИРОДЫ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ХЛОРОПРЕНОВЫХ РЕЗИН

Белослюдцева Д.Я.¹, Федорова А.Ф.²¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск² Федеральный исследовательский центр Якутский научный центр СО РАН,
Институт проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН), г. ЯкутскAlexana98@gmail.com

При создании современных морозостойких резин для применения в арктических зонах применяют комбинацию каучуков разной природы. Исследованы свойства эластомерных композиций на основе хлоропренового и бутадиенового каучуков с добавлением бутадиенстирольного каучука. Установлено, что такая комбинация каучуков позволяет получить материал с удовлетворительным комплексом физико-механических и низкотемпературных свойств.

Резины на основе хлоропренового каучука обладают такими механическими свойствами, как высокая прочность и упругость [1–3]. Однако они недостаточно морозостойки и могут использоваться при температурах от плюс 90 до минус 25 °С. Для повышения низкотемпературных характеристик материала можно использовать смеси каучуков [4–6]. Актуальность данной работы заключается в необходимости разработки морозостойких резин, способных сохранять свои механические свойства в экстремально низкотемпературных условиях Арктики. Учитывая стратегическое значение арктического региона и возрастающий интерес к его освоению, создание материалов, устойчивых к суровым погодным условиям, является приоритетной задачей. В связи с этим целью работы являлось исследование влияния неполярных каучуков на низкотемпературные характеристики хлоропреновых резин.

Объектом исследований являлся хлоропреновый каучук (ХПК) марки Denka S-40 производства компании Denki Kaçaku Коçуо (Япония), так как он хорошо сбалансирован по физическим свойствам, мало кристаллизуется, а также устойчив к воздействию внешних факторов окружающей среды, таких как тепло, озон, масло и пламя. Поскольку хлоропреновый каучук представляет собой полимер регулярной структуры, способный к кристаллизации, для создания морозостойких резин на его основе широко используют смеси каучуков. Для повышения морозостойкости материала выбран полибутадиеновый каучук (СКД) марки В-Ті завода изготовителя АО «Воронежсинтезкаучук» партии № 0119-1473. Дивинил-стирольный синтетический каучук (ДССК) марки 1810Ф завода изготовителя АО «Воронежсинтезкаучук» партии № 1519-0005 использовали для предотвращения кристаллизации. Соотношение каучуков в эластомерных композициях представлено в таблице 1.

Таблица 1. Соотношение каучуков в резиновых смесях

Ингредиент	Обозначение резиновых смесей				
	РС1	РС2	РС3	РС4	РС5
	Содержание, мас.ч.				
ХПК Denka S40	100,0	90,0	80,0	90,0	80,0
СКД В-Ті	-	8,0	16,0	6,7	13,3
ДССК 1810Ф	-	2,0	4,0	3,3	6,7

Кроме того, резиновые смеси содержали в своем составе серу, N,N'-дифенилгуанидин, тетраметилтиурамдисульфид, оксид магния, оксид цинка, технический углерод П-803, стеариновую кислоту. Резиновые смеси готовили при температуре, не превышающей 100 °С, в течение 40 мин на вальцах См350 150/150 (Китай). Были исследованы следующие показатели резин: вулканизационные характеристики (ГОСТ Р 54547); упруго-прочностные свойства (ГОСТ 270-75), плотность (ГОСТ 267-73), твердость по Шору А (ГОСТ 263-75), стойкость к воздействию углеводородных сред (ГОСТ 9.030-74), износостойкость при абразивном истирании (ГОСТ 23509-79), относительная остаточная деформация сжатия (ГОСТ 9.029-74), температурный предел хрупкости (ГОСТ 7912-74); коэффициент морозостойкости при растяжении (ГОСТ 408-78).

По результатам исследования вулканизационных характеристик образцы резин в виде пластин и столбиков вулканизованы в вакуумном гидравлическом прессе Y1000D (КНР) при температуре 150 °С в течение 25 мин.

Результаты физико-механических испытаний показали, что условная прочность при растяжении всех исследованных вулканизатов практически одинакова, изменение прочности не превышает 10%. Напряжение при 100% удлинении по мере увеличения содержания в резиновых смесях бутадиенового и бутадиенстирольного каучуков постепенно повышается, относительное удлинение при разрыве снижается, кроме смеси РС5. Твердость образцов резин с введением СКД и ДССК увеличивается на 8–17% и составляет 64–71 единиц по Шору А, также увеличивается объемный износ резин (от 9 до 22%). Минимальными значениями остаточной деформации сжатия характеризуются резины с максимальным содержанием ДССК, а именно смеси РС3 и РС5.

Один из недостатков резин на основе хлоропренового каучука связан с ограниченным температурным диапазоном эксплуатации изделий из этого материала, особенно в контексте низкой морозостойкости. Включение в состав резины бутадиенового и бутадиен-стирольного каучуков позволяет значительно увеличить устойчивость к низким температурам (таблица 2).

Таблица 2. Низкотемпературные характеристики резиновых смесей

Показатель	РС1	РС2	РС3	РС4	РС5
Температура хрупкости, °С	-33	-37	-59	-39	-61
Температура стеклования, °С	-37,8	-40,7	-42,4	-40,4	-41,8
Коэффициент морозостойкости при растяжении при минус 45 °С	0,01	0,031	0,193	0,033	0,362

Температура хрупкости резины на основе хлоропренового каучука составляет –33 °С. Однако после добавления 16,0 мас.ч. СКД и 4,0 мас.ч. ДССК (смесь РС3) температура хрупкости снижается до –59 °С, а при введении 13,3 мас.ч. СКД и 6,7 мас.ч. ДССК (смесь РС5) достигает –61 °С. Это обусловлено высокой морозостойкостью СКД и предотвращением кристаллизации добавлением ДССК. Также резина, полученная из смеси хлоропренового, бутадиенового и бутадиенстирольного каучуков, обладает пониженной температурой стеклования. Это свойство позволяет материалу сохранять эластичность и механические характеристики при низких температурах, что особенно важно для использования в условиях сильного холода, таких как арктические зоны. Кроме того, резиновые смеси РС-3 и РС-5 с максимальным содержанием ДССК из всей серии исследованных резин характеризуются повышенным коэффициентом морозостойкости при разрыве. Этот показатель указывает на способность материала сохранять прочность и сопротивляться разрушению под воздействием низких температур, что делает его пригодным для эксплуатации в экстремально холодных условиях.

Таким образом, показано, что введение бутадиенового и бутадиенстирольного каучуков в резиновые смеси на основе хлоропренового каучука позволяет получить морозостойкий материал с удовлетворительным комплексом физико-механических свойств при следующих соотношениях каучуков ХПК/СКД/ДССК (мас.ч.): 80,0/16,0/4,0 и 80,0/13,3/6,7.

Литература

1. Ильин В.М., Резова А.К. Производство хлоропреновых каучуков в мире // Каучук и резина. 2014. № 6. С.52–56.
2. Захаров Н.Д. Хлоропреновые каучуки и резины на их основе. М.: Химия, 1978. 272 с.
3. Большой справочник резинщика. Ч.2. Резины и резинотехнические изделия/ Под ред. С.В. Резинченко, Ю.Л. Морозова. Москва: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 649 с.
4. Гришин Б.С. Резиновая промышленность России – от настоящего, через прошлое к будущему //Промышленное производство и использование эластомеров. 2015. № 1. С. 3–9.
5. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1 (11). С. 98–107.
6. Чайкун А.М., Елисеев О.А., Наумов И.С., Венедиктов М.А. Особенности построения рецептур для морозостойких резин // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 3. С. 53–55.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-268-271

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО 2-МЕРКАПТОБЕНЗТИАЗОЛОМ И ОКСИДОМ МЕДИ

Васильев А.П.¹, Дьяконов А.А.^{1,2}, Данилова С.Н.¹, Макаров И.С.¹,

Оконешникова А.В.¹, Охлопкова А.А.¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

gtvap@mail.ru

В данной работе приведены результаты исследования триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного нано-SiO₂ и 2-меркаптобензтиазолом в разных массовых соотношениях. Показано, что введение наполнителей в полимер приводит к повышению износостойкости в 2,95–3,27 раз при трении по стали 45 и на 48–57% при трении по абразивной бумаге. Разработанные материалы могут найти применение в качестве деталей узлов трения машин и техники.

Введение. В настоящее время все большее внимание уделяется применению полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе полимерной матрицы с самосмазывающимися свойствами в качестве деталей узлов трения. Особенно актуальным является применение ПКМ в техники и технологическом оборудовании, эксплуатирующихся в суровом климате Арктики и северных территорий РФ. Среди полимерных материалов с высокой морозостойкостью, химической стойкостью и отличными антифрикционными свойствами выделяется сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Полимерная матрица СВМПЭ часто используется в сочетании с наполнителями, которые обеспечивают улучшение триботехнических характеристик [1–3]. Для модификации триботехнических свойств полимеров наиболее предпочтительными являются нанонаполнители, имеющие по крайней мере один размер в диапазоне от 1 до 100 нм [4]. С целью разработки композиционных материалов триботехнического назначения в качестве наполнителя особенно примечателен оксид меди (CuO). Оксид меди обладает рядом существенных преимуществ, так он легко синтезируется, а наночастицы CuO обладают более превосходными свойствами в отношении износостойкости и снижения трения, чем другие наночастицы, такие как оксид алюминия, циркония, железа и кобальта [5, 6]. Ускоритель вулканизации каучука 2-меркаптобензотиазол (МБТ) представляет собой бициклическую гетероатомную молекулу, широко используемую в производстве шин, резиновой обуви и других резиновых изделий [7]. Благодаря высокой химической активности потенциально может повысить его совместимость с неорганическими наполнителями при введении

в полимер. Так, нами ранее были изучено влияние волластонита и 2-меркаптобензотиазола на свойства СВМПЭ [8].

В данной работе для разработки износостойких композиционных материалов на основе СВМПЭ предлагается применение 2-меркаптобензотиазола для усиления межфазного взаимодействия между СВМПЭ и нано-CuO, что способствует улучшению триботехнических свойств. Таким образом целью настоящей работы является исследование на трение полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного оксидом меди с 2-меркаптобензотиазолом.

Материалы и методы исследования. Полимерной матрицей служил СВМПЭ марки Ticopa GUR-4130 (Celanese, Китай) с молекулярной массой $6,8 \times 10^6$ г/моль и плотностью $0,93$ г/см³. В качестве наполнителей СВМПЭ использовали 2-меркаптобензотиазол (МБТ) (ГОСТ 739-74) и наноразмерный оксид меди CuO (ТУ 1791-003-36280340-2008) с чистотой не менее 99,8%, со средними размерами частиц 50 нм и удельной поверхностью 15–20 м²/г.

Для получения комплексного наполнителя применяли планетарную мельницу Активатор-2S (Россия). Смешение смеси наполнителей проводили в планетарной мельнице при 600 об/мин в течение 10 мин. В массовых соотношениях оксид меди CuO / МБТ – 1:1 далее 1CuO/1МБТ и CuO / МБТ – 2:1 далее 2CuO/1МБТ. В данной работе содержание комплексных наполнителей составляло от 0,5 до 2 масс.%. Далее порошки СВМПЭ и комплексный наполнитель смешивали в лопастном смесителе в сухом виде со скоростью вращения перемешивающего устройства 1200 об/мин в течение 2 мин. Изготовление композитов из СВМПЭ проводилось методом горячего прессования при температуре $175 \pm 5^\circ\text{C}$, давлении $10 \pm 0,5$ МПа и выдержке 20 мин с последующим охлаждением до 80°C . Триботехнические характеристики определяли на трибомашине UMT-3 (SETR, США). Коэффициент трения определяли согласно ГОСТ 11629-2017 по схеме трения «палец – диск». Для чего, были изготовлены образцы с диаметром $10,0 \pm 0,1$ мм и высотой 20 ± 1 мм. В качестве контртела используется стальной диск из стали #45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатостью $R_a = 0,06–0,08$ мкм. При этом удельная нагрузка на образец составляет 1,9 МПа, линейная скорость скольжения – 0,3 м/с, продолжительность испытания 3 ч. Характеристики абразивного износа оценивались по схеме трения «палец – диск» на абразивной бумаге P320 (aluminium oxide, размер зерна ~50 мкм), путь трения составлял – 200 м, нагрузка – 10 Н, при постоянной скорости скольжения – 0,2 м/с. После каждого эксперимента меняли абразивную бумагу, образец очищали и взвешивали на аналитических весах (0,00001 г). Износ измеряли по разнице веса до и после эксперимента и рассчитывали объемный износ. Более подробно по методикам исследований приведены в ранее проведенной работе [9].

Результаты и их обсуждение. Результаты скорости изнашивания и коэффициента трения (f) по стали 45 исходного СВМПЭ и ПКМ на его основе, содержащих комплексные наполнители (CuO/МБТ в массовом соотношении 1:1 и 1:2) представлены на рис. 1.

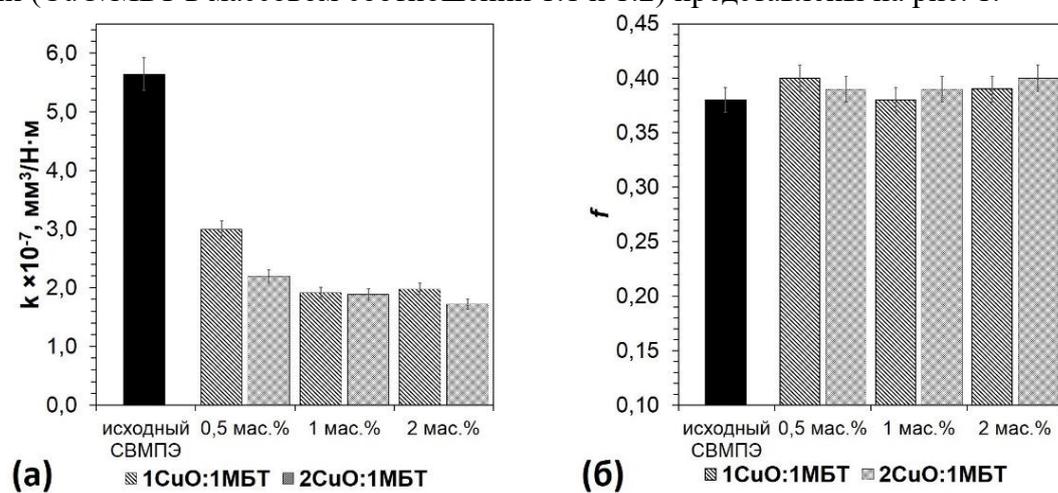


Рис. 1. Триботехнические характеристики исходного СВМПЭ и ПКМ на его основе: а) интенсивность изнашивания; б) коэффициент трения

Из рис. 1 видно, что износостойкость нанокompозитов на основе СВМПЭ повышается во всех образцах, и с увеличением содержания комплексных наполнителей достигает наименьшего значения при содержании 2 масс.% при массовом соотношении компонентов наполнителя 2:1. Видно, что интенсивность изнашивания при массовом соотношении компонентов 1:1 в ПКМ снижается в 1,88–2,95 раз, а при соотношении 2:1 в 2,56–3,27 раз относительно полимерной матрицы. Коэффициент трения полимерных композитов во всех образцах находится в диапазоне 0,39–0,41. Таким образом, для полимерных композитов сохраняется относительно низкое значение коэффициента трения, соответствующая значениям исходного полимера, независимо от содержания и соотношения компонентов наполнителя.

На рис. 2 приведены результаты исследования абразивного изнашивания полимерных композитов по наждачной бумаге Р320 в условиях сухого трения в зависимости от их массового соотношения и содержания комплексных наполнителей.

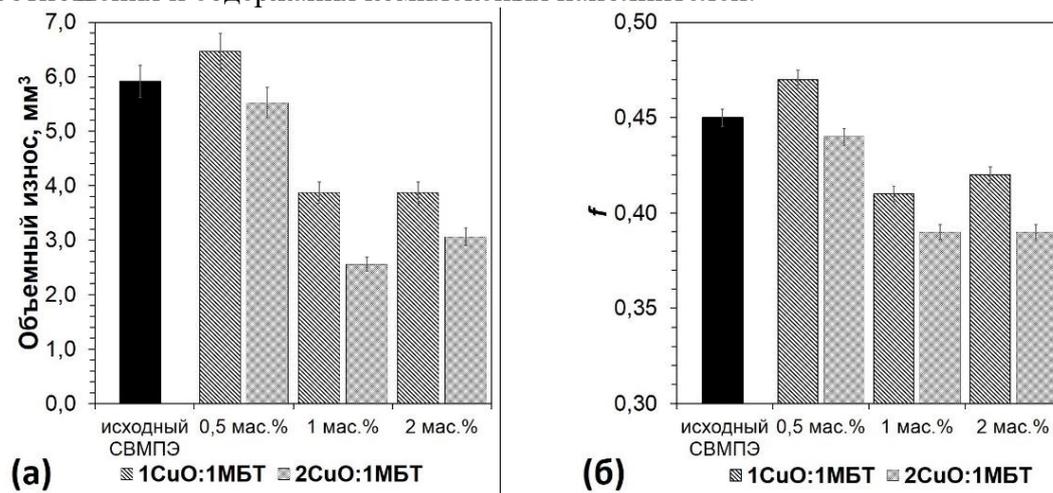


Рис. 2. Трибологические характеристики исходного СВМПЭ и ПКМ на его основе: а) скорость изнашивания; б) коэффициент трения

Как видно из рис. 2 а, стойкость к абразивному изнашиванию ПКМ с содержанием 0,5 масс.% комплексных наполнителей находится на уровне исходного СВМПЭ, также как и коэффициент трения. Сравнительно низкая стойкость к абразивному изнашиванию при содержании 0,5 масс.% CuO/MBT в СВМПЭ в обоих массовых соотношениях, возможно связано с пластической деформацией полимера и композитов, тем самым наблюдаются относительно высокие значения коэффициента трения. Видно, что при содержании 1 масс.% комплексных наполнителей в СВМПЭ наблюдается снижение объемного износа на 34–57%, а при содержании 2 масс.% на 34–48% относительно полимерной матрицы. Коэффициент трения ПКМ снижается на 9–13% при содержании 1 масс.% и на 7–13% при содержании 2 масс.%, соответственно. Это возможно связано с тем, что CuO/MBT может накапливаться на изношенной поверхности, образуя смазочную пленку.

Видно, что в результате абразивного изнашивания с увеличением содержания комплексных наполнителей в полимерной матрице значение объема изнашивания проходит через минимум при соотношении 1:1. Значение объема износа СВМПЭ+1 масс.% 2CuO/1MBT ниже на 34%, по сравнению с СВМПЭ+1 масс.% 1CuO/1MBT. В случае СВМПЭ+2 масс.% 2CuO/1MBT ниже на 21% относительно ПКМ при соотношении 1:1. Из рис. 2 б видно, что коэффициент трения ПКМ при соотношении 2:1 на 5–6% ниже по сравнению с композитами при соотношении 1:1 во всех массовых содержаниях комплексного наполнителя. Таким образом выявлено, что при большем содержании нано-CuO оказались более эффективными в полимерных композитах, так стойкость к абразивному износу выше, а коэффициент трения ниже.

Заключение. Исследованы триботехнические свойства полимерных композитов на основе СВМПЭ, наполненного комплексными наполнителями CuO/MBT, отличающихся массовым соотношением 1:1 и 2:1. Триботехнические исследования показали улучшение износостойкости во всех ПКМ относительно полимерной матрицы. Наилучшие результаты по износостойкости получены в ПКМ с 2 масс.% 2CuO/1MBT и 1 масс.% 1CuO/1MBT, что

в 2,95–3,27 раз выше исходного полимера. Результаты абразивного изнашивания показали, что наилучшие результаты показали ПКМ при содержании 1 масс.% гибридных наполнителей в СВМПЭ, независимо от соотношения компонентов. Полимерный композит состава СВМПЭ+1 масс.% 2CuO/1МБТ характеризуется высокой устойчивостью к абразивному изнашиванию и на 34% ниже по сравнению с СВМПЭ+1 мас.% 1CuO/1МБТ. Полученные данные могут быть интересны разработчикам материалов, работающих с комплексными наполнителями, а как материалы могут найти применение в технических приложениях, где необходима высокая износостойкость и низкий коэффициент трения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-00076, (<https://rscf.ru/project/22-73-00076/>)».

Литература

1. Влияние наноразмерных оксидов металлов и 2-меркаптобензотиазола на свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 17, № 2. С. 162–174.
2. Влияние термически обработанного политетрафторэтилена на триботехнические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 15, № 7. С. 850–860.
3. Исследование комплекса активных наполнителей на механические свойства СВМПЭ / А. П. Васильев, С. Н. Данилова, А. А. Дьяконов [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 2(48). С. 146–151.
4. Chan J. X. et al. Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development // *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 17. P. 2867.
5. Li Y. et al. UHMWPE Modified by Halogenating Reagents: Study on the Improvement of Hydrophilicity and Tribological Properties // *Tribology Transactions*. 2022. Vol. 65, № 2. P. 193–209.
6. Jatti V.S., Singh T.P. Copper oxide nano-particles as friction-reduction and anti-wear additives in lubricating oil // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. Vol. 29. P. 793–798.
7. Skotnicka A., Kabatc-Borc J. Design, Synthesis, and Spectral Properties of Novel 2-Mercaptobenzothiazole Derivatives // *Materials*. 2024. Vol. 17, № 1. P. 246.
8. Danilova S.N. et al. Study on the Impact of a Combination of Synthetic Wollastonite and 2-Mercaptobenzothiazole-Based Fillers on UHMWPE Polymeric Matrix // *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7, № 10. P. 431.
9. Vasilev A.P. et al. Effect of Nano-CuO and 2-Mercaptobenzothiazole on the Tribological Properties of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // *Lubricants*. 2024. Vol. 12, № 5. P. 174.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ МИКРОБОЦЕНОЗА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ ПОСЛЕ БИОРЕМЕДИАЦИИ

Далбаева Е.А.^{1,2}, Ерофеевская Л.А.², Салтыкова А.Л.¹, Вит А.А.¹

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

aselka-333@mail.ru

Микроорганизмы, обитающие в почвах территории нефтебазы, могут сыграть ключевую роль в процессе очистки грунтов от нефтяных загрязнений. В результате анализа выявлено, что в почвах филиала нефтебазы преимущественно присутствуют бактерии вместо грибов из-за физико-химических особенностей почвы, при этом рН составляет 8,1, что неблагоприятно влияет на рост грибов. Применение биоремедиации способствовало уменьшению фитотоксичности почв и повышению активности азотфиксирующих бактерий, однако оказало негативное воздействие на процессы нитрификации и денитрификации из-за содержания токсичных компонентов. Рост процессов гниения привел к увеличению токсичности и замедлению процесса очистки почвы. В конце сезона вегетации замечена значительная активность углеводородоразрушающих микроорганизмов в почвах точки 1. В почвах точки 2 и 3 подвержены отрицательному воздействию углеводов и требуют очистки.

Микроорганизмы, обитающие в почвах территории нефтебазы, могут сыграть ключевую роль в процессе очистки грунтов от нефтяных загрязнений [1]. Проведенные микробиологические исследования направлены на изучение биологической активности почв и на поиск аборигенных культур (углеводородоокисляющих микроорганизмов (УОМ)), которые способны эффективно разлагать нефть и нефтепродукты в условиях криолитозоны. С целью повышения эффективности процесса биологической деструкции нефтяных загрязнений, необходимо выявить наиболее активные и адаптированные к условиям среды микроорганизмы в почвах и грунтах территории нефтебазы [2].

Исследование микробного ценоза почв в территории нефтебазы включало метод посева на питательные среды [7, 8, 9]. Выявлены аммонифицирующие и азотфиксирующие микроорганизмы, а также участие микробов в циклах нитрификации, денитрификации, разложении органического материала и присутствие нефтеокисляющих организмов.

Таблица 1. Микробиологическая характеристика почв на территории нефтебазы, 02.06.2022 г.

№ пробы по каталогу	Глубина отбора, см	Место отбора проб	Общая численность, млн КОЕ/г АСВ почвы			
			Бактерии	Грибы	Актинобактерии	УОМ
Фоновая проба	0–20	На границе территории НБ	922,2±5,5	не выделены	0,002±0,0001	0,0002±0,00001
Точка 1	0–20	Площадка 2, 28 кв.м Загрязн.нефтью.	8,0±0,4	не выделены	0,01±0,0005	0,0005±0,00002
Точка 2	0–20	Площадка 1, 6 кв.м загрязн. ДТ	4,4±0,2	0,03	0,002±0,0001	0,001±0,0005
Точка 3	0–20	Площадка 3, 2 кв.м. загр.бензином.	7,2±0,3	не выделены	0,002±0,0001	0,004±0,0002

Влияние условий окружающей среды на структуру микробных сообществ необходимо тщательно изучать для понимания процессов, происходящих в природных экосистемах [3]. Анализ, проведенный на территории филиала нефтебазы, показал, что в почвах этой зоны преобладают бактериальные формы микроорганизмов, в то время как грибные формы встречаются реже (таблица 1).

Такое доминирование бактерий над грибами может быть обусловлено не только физико-химическими свойствами почвы, но и другими факторами, влияющими на окружающую среду. Интересно отметить, что микроскопические грибы, в отличие от бактерий, часто предпочитают развиваться в условиях тепла, влажности и кислотности. В почвах же, расположенных вблизи нефтебазы, среднее значение pH составляет 8,1, что может оказывать негативное воздействие на грибы.

В июне 2022 года содержание бактерий в фоновой почве на глубине 0–20 см составляла – 922,2 млн КОЕ/г АСВ и 6,5 млн КОЕ/г АСВ в нефтезагрязненных участках (точки 1, 2, 3). К окончанию вегетационного сезона количество почвенных микроорганизмов возросло, превысив в среднем на один уровень как в фоновых, так и в загрязненных участках на глубине 0–20 см, составляя 1896 млн КОЕ/г АСВ в фоновой почве и 62–119 млн КОЕ/г АСВ в нефтезагрязненных участках (точки 1, 2, 3) (таблица 2).

Таблица 2. Микробиологическая характеристика почв на территории нефтебазы, 05.09.2022 г.

№ пробы по каталогу	Глубина отбора, см	Общая численность, млн КОЕ/г АСВ почвы				Всхожесть семян биотест-растений, %
		Бактерии	Грибы	Актинобактерии	УОМ	
Фоновая проба	0–20	1890±4,4	не выделены	6,2±0,3	0,0008±0,00001	40,0±2,0
Точка 1	0–20	62±2,3	не выделены	0,04±0,002	6, 2±3,0	44,0±2,1
Точка 2	0–20	82±4,1	25	0,02±0,001	0, 04±0,002	36,0±1,7
Точка 3	0–20	119±5,0	не выделены	0,02±0,001	0, 005±0,0002	20,0±1,0

После проведения биоремедиации в почвах снизилась фитотоксичность (табл. 2) и повысилась активность азотфиксирующих бактерий, однако процессы нитрификации и денитрификации в почвах нарушены.

Активность нитрифицирующих бактерий в почвах снижается из-за действия токсичных веществ и условий окружающей среды, которые препятствуют их развитию. Температура около +20°C является оптимальной для нитрификации в почвах. В случае сильного загрязнения нефтью процессы нитрификации могут изменить направление. Высокое количество аммонифицирующих бактерий при уменьшении активности нитрифицирующих микроорганизмов способствует переходу к доминированию гнилостных процессов, что повышает токсичность рекультивированных почв, увеличивает концентрацию УОМ в почвах и замедляет очистку почв от нефтепродуктов.

В почвах точки 1 к окончанию вегетационного сезона была обнаружена значительная концентрация углеводородокисляющей микрофлоры, достигающая 6 млн КОЕ/г АСВ. Это свидетельствует об успешной адаптации инокулированных с биопрепаратом микроорганизмов к условиям почвы. В то же время, в почвах точки 2 и 3 наблюдается негативное воздействие углеводородных компонентов, что требует дополнительной очистки и поддержания оптимальных показателей абиотической среды. Для этого необходимо сохранять влажность почв на уровне 60–70%, проводить регулярное рыхление почв для обеспечения потока кислорода, а также контролировать pH почвенной среды от 6,0 до 7,2.

Длительное воздействие нефтепродуктов на мерзлотные почвы нефтебазы привело к токсичности почв и снижению их биологической активности. Это выражается в снижении общей численности и разнообразия почвенных микроорганизмов, а также в потере экосистемных функций и нарушении микробиологических процессов окисления углеводов, разложения органических веществ и аммиака нитрифицирующими бактериями. Процесс нитрификации снижается под воздействием любых концентраций углеводов. Для того чтобы процесс нитрификации был остановлен, достаточно всего 0,5% уровня нефтяного загрязнения. В процессе реабилитации нефтезагрязненных почв на территории нефтебазы необходимо учитывать возможность обратного направления нитрификации при увеличении загрязнения нефтью, что может привести к токсичности почв. Использование общей численности нитрифицирующих

бактерий в качестве маркера загрязнения почв нефтью может быть полезным при мониторинге процесса восстановления загрязненных участков нефтегазового комплекса. На фоне уменьшения активности нитрифицирующих микроорганизмов в почвах наблюдается редукция разнообразия и численности микроскопических 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.

Литература

1. Lamichhane S., Krishna K.C.B., Sarukkalige R. Surfactant-enhanced remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: a re-view // Journal of Environ. Manag. 2017. Vol. 199. P. 46–61. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.037.
2. Ерофеевская Л.А. Разработка способа очистки мерзлотных почв и грунтов от нефтезагрязнений в природно-климатических условиях Якутии: автореф. на соиск. ученой степ. канд. биол. наук: 03.02.08: Якутск: 2018. 28 с.
3. Сивцев С.И., Ерофеевская Л.А. Санация и рекультивация нефтезагрязненных земель в почвенно-климатических условиях Республики Саха (Якутия) // Высшая школа: научные исследования. Часть 2. Уфа: Инфинити, 2019. С. 125–131.
4. Патент № 2565549 РФ. Биопрепарат для биоремедиации нефтезагрязненных почв для климатических условий Крайнего Севера / Л.А. Ерофеевская, Ю.С. Глянцева. Опубл. 20.10.2015. Бюл. № 29.
5. Донерьян Л.Г., Водянова М.А., Тарасова Ж.Е. Микроскопические почвенные грибы – организмы-биоиндикаторы нефтезагрязненных почв // Гигиена и санитария. 2016. Т. 95. № 9. С. 891–894. DOI: 10.1882/0016-9900-2016-9-891-894.
6. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализов.
7. Керстен Д.К. Морфологические и культуральные свойства индикаторных микроорганизмов нефтегазовой съемки // Микробиология. 1963. № 5. С. 1024–1030.
8. РД 39–0147098–90. Инструкция по контролю за состоянием почв на объектах предприятий Миннефтегазпрома. 1990. 57 с.
9. ГОСТ Р ИСО 22030–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. Стандартиформ, 2010. 15 с.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-274-276

ВЛИЯНИЕ СТЕКЛОВОЛОКНА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Данилова С.Н., Иванова Н.Н., Лазарева Н.Н., Васильев А.П., Охлопкова А.А.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

dsn.sakhayana@mail.ru

В работе проведено исследование влияния стеклянных волокон на механические и трибологические свойства полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Для сравнения были использованы стеклянные волокна с длиной 0,2 мм и 3 мм. Установлено, что использование стеклянных волокон способствует снижению коэффициента трения композитов и повышению модуля упругости по сравнению с исходным полимером.

В настоящее время в конструкциях транспортных средств и технологических оборудований насчитывают множество деталей, сделанных из полимерных композиционных материалов (ПКМ). При этом эксплуатационные характеристики всей техники и транспортного обо-

рудования во многом зависят от работоспособности и надёжности полимерных изделий. Особенно в климатических условиях северных регионов Российской Федерации существует острая проблема, связанная с повышением срока службы полимерных деталей, вследствие непригодности техники выдерживать жесткие условия эксплуатации в резкоконтинентальном климате. Поэтому необходимо создание нового класса материалов с повышенным комплексом функциональных свойств, и обладающих высокими значениями морозостойкости. Одним из перспективных полимерных матриц для изготовления морозостойких ПКМ выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Его свойства во многом предопределяются высокой молекулярной массой, благодаря чему СВМПЭ характеризуется высокой прочностью, износостойкостью, жесткостью и химической инертностью, что обуславливает область его использования в качестве деталей, непосредственно работающих в среде масел и топлива. Известно [1], что изделия или детали из СВМПЭ могут эксплуатироваться при низких температурах, так как сохраняют высокую ударостойкость даже при $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ударную вязкость до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако, материалы из СВМПЭ характеризуются низким значением модуля упругости, вследствие чего необходимо модификация полимерной матрицы. Одним из самых доступных методов модификации полимерных матриц является введение наполнителей, в том числе армирование короткими волокнами. Стекловолоконное волокно (СВ) широко используется для создания волокнистых композиционных материалов (ВКМ), которые обладают высокой прочностью, гибкостью, жесткостью и долговечностью и т. д. [2]. Механическое поведение волокно-армированных ПКМ зависит от прочности и модуля упругости вводимых волокон, а также его однородности и ориентации в полимерной матрице. В данное время, не раскрыто в полной мере влияние стеклянных волокон с различной размерностью длин волокон на армирование полимерных матриц с высокой вязкостью.

Целью исследования является изучение влияния стеклянного волокна на механические и трибологические свойства композиционных материалов на основе СВМПЭ.

В работе в качестве полимерной матрицы использовали СВМПЭ марки GUR 4150 (Celanese, Германия) с молекулярной массой 8,7 млн г/моль, со средним размером частиц 120 мкм и внутренней вязкостью 3000. В качестве наполнителей выступают стеклянные волокна с размерами: волокна с длиной 3 мм и диаметром 9–14 мкм, и измельченные волокна с длиной 0,2 мм и диаметром 9–14 мкм. Композиты для исследований получали методом горячего прессования при температуре $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10 МПа, при выдержке в течение 20 мин. Исследование механических свойств ПКМ проводили на разрывной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония) согласно ГОСТ 11262-2017. Количество образцов на каждое испытание составляло – 6. Трибологические исследования проводились на испытательной машине UMT-3 (SETR, США) при удельной нагрузке 1,9 МПа и линейной скорости скольжения 0,5 м/с по схеме трения «палец–диск» в течение 3 ч. Количество параллельных испытаний на каждую композицию составляло – 3.

Результаты механических испытаний СВМПЭ и ПКМ в зависимости от содержания и размера СВ приведены на рис. 1.

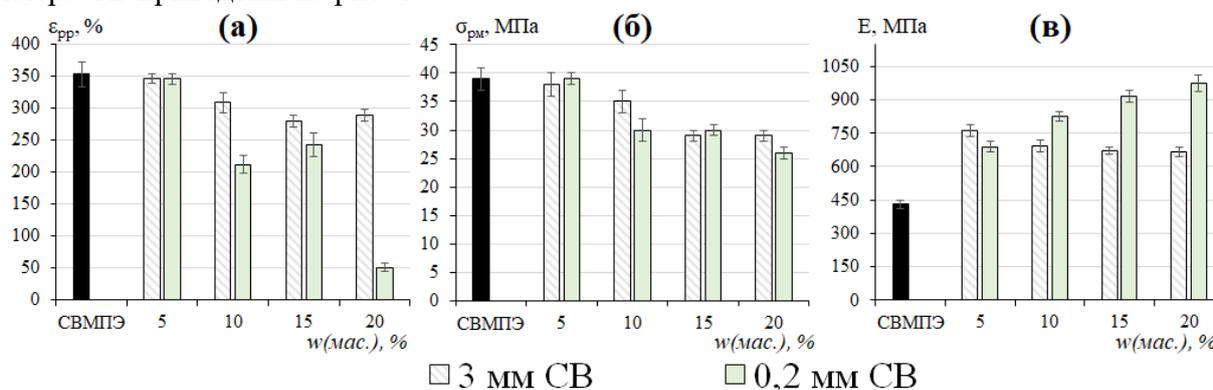


Рис. 1. Зависимость относительного удлинения при разрыве (а), предела прочности при растяжении (б) и модуля упругости (в) СВМПЭ и ПКМ от содержания СВ

На основании проведённых исследований установлено, что значение предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве ПКМ с 5 масс.% СВ остаётся на уровне исходного полимера. С увеличением содержания стекловолокна от 10 до 20 масс.% в полимере наблюдается снижение деформационно-прочностных свойств. Так, при введении СВ с длиной 3 мм зафиксировано снижение относительного удлинения на 18% и предела прочности на 25%, тогда как СВ с длиной 0,2 мм способствует к снижению этих параметров на 85% и на 33%, соответственно. Несмотря на это, введение стекловолокон в СВМПЭ сопровождается существенным увеличением модуля упругости: СВ с длиной 3 мм – на 76% и СВ с длиной 0,2 мм – на 126%.

Результаты трибологических исследований СВМПЭ и ПКМ в зависимости от содержания и размера СВ представлены на рис. 2.

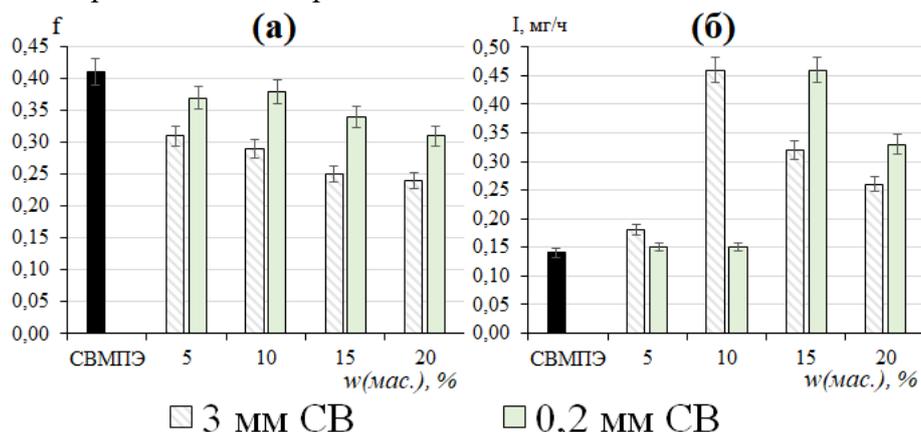


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения (а) и скорости массового изнашивания (б) СВМПЭ и ПКМ от содержания СВ

Как видно из рис. 2, композиты, содержащие СВ, характеризуются снижением коэффициента трения. Максимальное снижение на 41% относительного ненаполненного СВМПЭ зафиксировано у композита, наполненного 20 масс.% СВ с длиной 3 мм. В этом случае, более длинные стекловолокна участвуют в ориентационных эффектах при трении по сравнению с измельченными, тем самым снижают сдвиговое напряжение. Однако, введение стекловолокон сопровождается увеличением значения скорости массового изнашивания, что может быть вызвано вытеснением волокон на поверхность при изнашивании, которые могут в дальнейшем действовать как дополнительные абразивные частицы.

Таким образом, установлено, что измельченные стекловолокна существенно увеличивают жесткость ПКМ, тогда как длинные волокна, участвуют в ориентационных эффектах при трении, тем самым снижают коэффициент трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР FSRG-2023-0026.

Литература

1. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И., Печенкин А.Д., Бухгалтер В.И., Поляков А.В. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. Л.: Химия, 1982. 80 с.
2. Morampudi P., Namala K.K., Gajjela Y.K., Barath M., Prudhvi G. Review on glass fiber reinforced polymer composites // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 43. P. 314–319.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИАМИДОВ

Двирная Е.В., Старцев О.В., Корниенко Г.В., Коваль Т.В.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

medvedevim@viam.ru

Данная работа посвящена изучению изменения механических характеристик трубок из полиамида 11 в ходе старения. Полиамидные материалы трех разных составов были подвержены воздействию повышенной температуры и влажности, термическому старению и термоциклам. В результате испытаний на растяжение и динамического механического анализа (ДМА) установлена зависимость между механическими характеристиками полиамида 11 и температурой стеклования в процессе старения.

Введение. Полиамиды представляют собой полукристаллические полимеры, обладающие превосходными физическими свойствами. Сочетание кристаллической и аморфной фаз обуславливает уникальные свойства этих полимеров. Полиамид 11, благодаря своим свойствам [1], имеет широкий спектр применений [2, 3]. Чтобы продвинуться дальше в использовании полиамида 11, необходимо изучить механическое поведение, а также степень изменения его свойств. Изменение пластических свойств в процессе старения полиамида 11 было описано в работах [4, 5]. При этом определяли изменение температуры стеклования и механических свойств полиамида 11.

Целью данной работы является исследование влияния различных типов ускоренного старения на механические свойства материалов на основе ПА-11 трех составов, а также выявление закономерностей между температурой стеклования и механическими характеристиками исследуемого полиамида.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были выбраны материалы трех составов на основе ПА-11. Далее, для удобства, выбранные материалы обозначены как П1, П2, П3. Для исследования старения этих материалов были проведены ускоренные испытания, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Наименование, продолжительность и режимы проведенных ускоренных испытаний

Наименование и продолжительность испытаний	Режим испытаний
Воздействие повышенной температуры (ТС) в течение 500, 1000, 2000 и 3000 ч	Температура 100±2 °С
Воздействие тепла и влаги (КТВ) в течение 456 ч, 1368 и 2736 ч (ГОСТ 9.719, ГОСТ Р 51369)	Температура 55±2 °С Влажность 93±3%
Термоциклирование (ТЦ) продолжительностью 300 и 450 циклов (ГОСТ 9.707, ГОСТ 30630.2.1 метод 205)	Температура -60±2 °С 2 ч Температура 100±2 °С 2 ч

Для оценки прочностных свойств полиамида 11 для исходных образцов, а также образцов, подвергшихся старению, были проведены испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ Р 53652 [6]. Образцы представляли собой трубки с толщиной стенок 1,6 мм, диаметром 12 мм и длиной 150 мм. Образцы растягивали со скоростью смещения 20 мм/мин до разрушения или падения нагрузки на 30%. При этом регистрировали зависимость изменения нагрузки от деформации образца. Испытания проводили при комнатной температуре (18–21 °С).

Динамический механический анализ также проводили для исходных образцов, а также образцов, подвергшихся старению. Образцы были нарезаны на полоски размером 15×5 мм. Испытания проводили в диапазоне температур от -10 до 150 °С. Скорость нагрева и частота составляли 5 °С/мин и 1 Гц соответственно. Температуру стеклования T_g полиамидных материалов определяли по максимуму пика модуля потерь E'' .

Обсуждение результатов. Основные результаты проведенных измерений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние условий и продолжительности старения на показатели свойств полиамидных трубок

Показатель		Полимер	КТВ, час			ТС, час				ТЦ, количество	
Обозначение	исх.		456	1368	2736	500	1000	2000	3000	300	450
σ_t , МПа	34,3	П1	33,2	33,2	36,8	36,8	36,8	38,8	39,3	38,6	38,4
	39,3	П2	39,7	37,3	39,5	41,1	41,1	45,1	43,6	42,6	42,4
	38,4	П3	36,2	36,5	36,2	39,1	37,4	39,6	39,4	39,1	39,4
E, МПа	0,43	П1	0,53	0,57	0,75	0,78	0,95	1,13	1,28	1,14	1,11
	0,68	П2	0,57	0,72	0,85	1,25	1,48	1,52	1,56	1,39	1,35
	0,54	П3	0,52	0,59	0,81	0,83	1,09	1,14	1,19	1,15	1,23
ε , %	387	П1	343	538	355	267	320	228	154	216	226
	249	П2	258	276	319	104	66	109	85	144	134
	275	П3	215	291	248	200	147	103	115	101	130
Tg, °C	14,5	П1	21,0	20	н/д	39,1	48,9	44,8	49,6	46,9	47,0
	19,2	П2	21,4	20,5	н/д	48,2	55	52,6	55,6	49,8	46,6
	4,2	П3	13,9	15,6	н/д	33,7	37,2	43,0	46,6	48,3	46,8

Было замечено, что термическое и термоциклическое воздействие вызывает возрастание показателей σ_t и E с ростом времени старения. Данное явление объясняется охрупчиванием материала, что могло быть вызвано изменением структуры полимера в процессе старения. Продолжительное воздействие выбранных факторов старения вызвало снижение относительного удлинения при разрыве трубок. Показатель ε снизился в 1,8–2,5 раза в П-1, в 1,6–2,9 раза в П-2, в 2,7–2,8 раза в П-3. При термовлажностном воздействии наблюдается снижение охрупчивания полиамида 11 вследствие пластифицирующего действия влаги. Из результатов ДМА (табл. 2) можно заметить постепенный рост температуры стеклования в процессе старения.

С ростом температуры стеклования образцов на кривой растяжения происходит постепенное образование и рост все более выраженного пика, который соответствует образованию шейки (рис. 1).

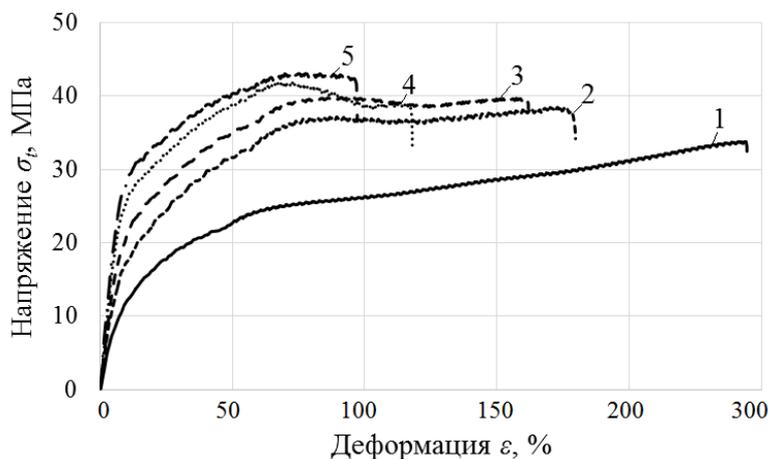


Рис. 1. Деформационные кривые растяжения ПА1 до испытаний (1) и после 500 (2), 1000 (3), 2000 (4) и 3000 (5) часов воздействия температуры 100 °C

Такие формы кривых характерны для полимеров с температурой стеклования выше температуры проведения испытаний. Для образцов полиамида было решено определить значения верхнего (σ_v) и нижнего пределов текучести (σ_n) (рис. 2).

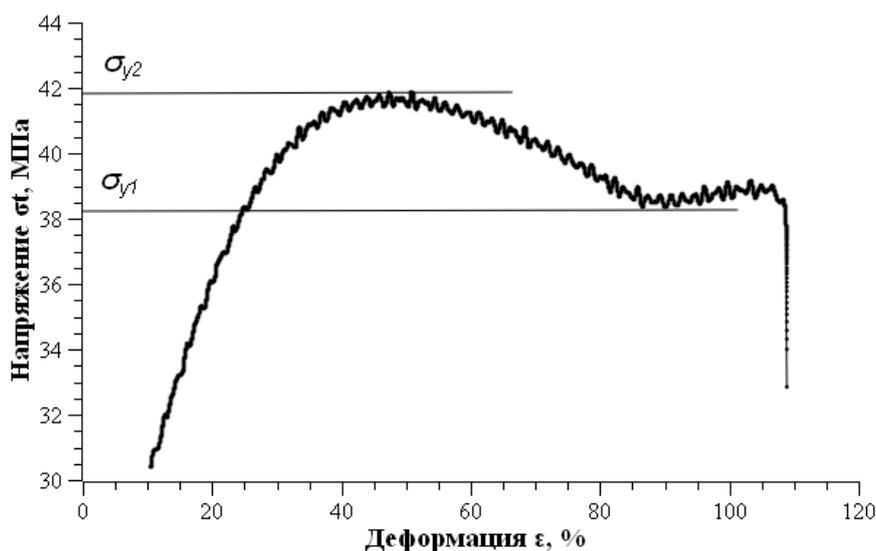


Рис. 2. Верхний и нижний пределы текучести полиамидного образца П1 после 2000 ч воздействия повышенной температуры

На рисунке 3 представлена зависимость верхнего и нижнего пределов текучести от температуры стеклования. Для построения зависимости был проведен графический анализ тех кривых деформации, на которых отчетливо можно было разглядеть падение напряжения после предела текучести и дальнейший рост напряжения, соответствующий процессам текучести и последующему упрочнению.

С ростом температуры стеклования все более заметна разница между двумя пределами текучести.

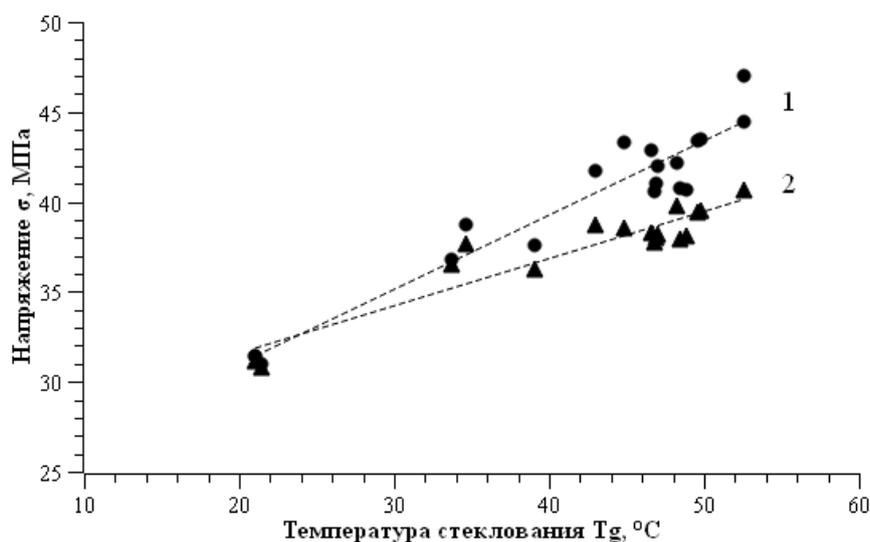


Рис. 3. Зависимость изменения верхнего (1) и нижнего (2) пределов текучести от температуры стеклования для образцов, подвергнутых ускоренному старению

Можно заметить, что при температуре испытаний ($T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$) происходит пересечение средних линий. Таким образом, предполагается, что пик предела текучести должен полностью сгладиться в точке, в которой выполняется условие $T_g = T$. В таком случае, было интересно посмотреть зависимость величины потери напряжения $\Delta\sigma$ от разницы между температурой стеклования и температурой испытаний ΔT (рис. 4).

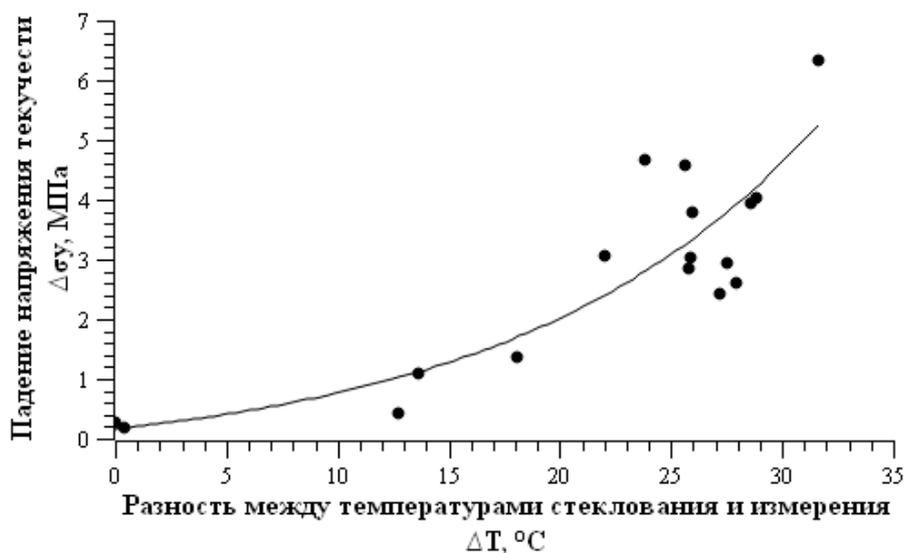


Рис. 4. Зависимость падения напряжения текучести от разницы между температурами стеклования и испытания образцов П1, П2, П3, подвергнутых испытаниям на ускоренное старение

Приведенный график показывает экспоненциальную зависимость $\Delta\sigma$ от ΔT , коэффициент достоверности аппроксимации составил 0,91.

Выводы. Методы механических и термомеханических испытаний позволили оценить вклад каждого вида климатического испытания на свойства полиамидов. С повышением температуры стеклования наблюдается появление области предела текучести при растяжении образцов. Разница между величинами верхнего и нижнего пределов текучести возрастает при росте разности между температурой стеклования и температурой проведения растяжения. Данная закономерность описывает фундаментальную связь между температурой стеклования и видом кривой растяжения, и может быть использована для анализа свойств аморфных и частично кристаллических полимеров в области предела текучести при их старении.

Литература

1. Francisco D.L., De Paiva L.B., Aldeia W. [et al.]. Investigation on mechanical behaviors of polyamide 11 reinforced with halloysite nanotubes // In Characterization of Minerals, Metals, and Materials; Springer: Cham, Switzerland. 2019. P. 693–701. DOI:10.1007/978-3-030-05749-7_69.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.
3. Ding N., Zhang M., Li. H. [et al.]. Evaluating the compatibility of PA11 pipe with oil field media based on tensile tests // Advances in Materials Processing, Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018. P. 1113–1124. DOI: 10.1007/978-981-13-0107-0_106.
4. Maïza S., Lefebvre X., Brusselle-Dupend N. [et al.]. Physicochemical and mechanical degradation of polyamide 11 induced by hydrolysis and thermal aging // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Т. 136. № . 23. С. 47628.
5. de Lima H. F., Vaz M. A., da Costa M. F. [et al.]. Creep behavior of in-service flexible flowline polyamide 11 // Polymer Testing. 2020. Т. 81. С. 106205.
6. ГОСТ Р 53652.1-2009. Трубы из термопластов метод определения свойств при растяжении. Часть 1. Общие требования. М.: Стандартинформ. 2010. 7 с.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Демин К.А.^{1,2}, Агнаев С.С.², Дондуков С.Д.², Хаглеев А.Н.^{1,2}

¹ Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

deminka.mail@gmail.com

В данной статье представлены результаты исследования влияния низкотемпературной плазмы атмосферного давления на физико-механические свойства полимерных материалов. Описаны теоретические основы механизма плазменной модификации полимеров. Были проведены исследования краевого угла смачивания модифицированных пленок. Максимальный угол смачивания составил $\Theta = 21,5^\circ$ для полиэтилена и $\Theta = 33,5^\circ$ для полипропилена, при модификации продолжительностью 10–15 с. Результаты показали, что полиэтилен, благодаря своей более низкой энергии связывания, проявляет большую степень изменения свойств по сравнению с полипропиленом.

Введение. В современном мире полимерные пленки широко используются в различных областях, начиная от упаковки и заканчивая электроникой. В процессе производства и эксплуатации таких пленок возникает необходимость в изменении и улучшении их физических свойств [1]. Одним из наиболее перспективных методов модификации поверхности полимерных пленок является модификация низкотемпературной плазмой атмосферного давления, позволяющая улучшить гидрофильные свойства этих материалов и расширить области их применения [2, 3, 4].

Объекты и методы исследования. В качестве материала для модификации использовались полиэтиленовые и полипропиленовые пленки:

– пленки ПЭ (ГОСТ 10354-82 «Пленка полиэтиленовая» и ГОСТ 16338-85 «Полиэтилен низкого давления») толщиной 100 мкм [5, 6]

– пленки ПП (ГОСТ 26996-86) «Полипропилен и сополимеры пропилена» толщиной 40 мкм [7].

Модификация полимерных материалов осуществлялась в течение 15 с при импульсном напряжении 8 кВ, токе 40 мА и частоте 15 кГц. Реакционный газ под давлением в 100 кПа эжектировался вдоль плоскости электродов под углом в 135° сопла отклонителя. Для модификации поверхности пленок была разработана плазменная установка.

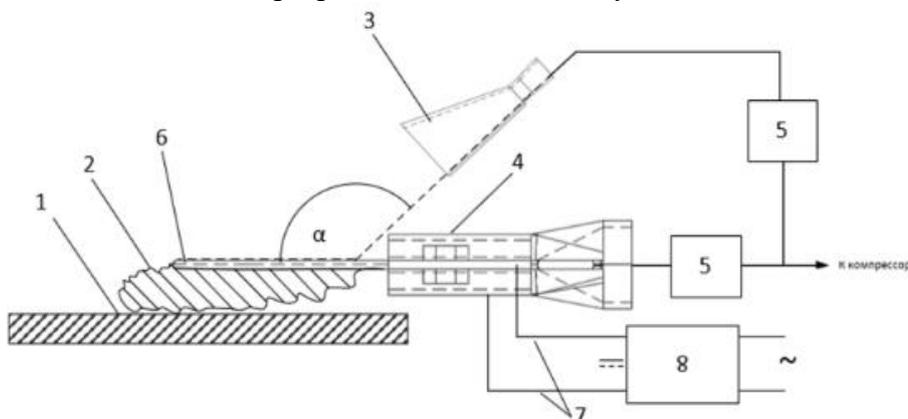


Рис. 1. Установка для модификации поверхности полимерных материалов:

- 1 – полимерный материал; 2 – плазменный пучок; 3 – отклонитель; 4 – корпус; 5 – редуктор;
6 – алюминиевые электроды; 7 – высоковольтные провода; 8 – высоковольтный источник питания;
 α – угол наклона отклоняющего сопла

Установка [8] состоит из пластикового эжектора (4), выполняющего функцию корпуса. Сквозь корпус установки к алюминиевым электродам (6) при помощи высоковольтных проводов (7) подведено напряжение из высоковольтного генератора (8). Для инициирования плазменного разряда в эжектор подается поток воздуха из компрессора, вдоль алюминиевых электродов (6) и создает плазменный поток (2), продвигаемый в направлении модифицируемого материала (1), отклонителем (3). Напряжение инициирования плазменного разряда составляет $U \approx 20\text{--}30$ кВ/см. Регулировка скорости воздушных потоков отклонителя и эжектора осуществлялась при помощи воздушного редуктора (5) для изменения длины вылета и угла падения плазменного пучка на модифицируемый материал.

Обсуждение результатов. В ходе модификации полимера в плазме атмосферного давления происходит ряд физико-химических процессов, которые в значительной степени зависят от состава газовой среды разряда и характеристик самого полимера. Когда ускоренные заряженные частицы плазмы взаимодействуют с полимером, возникает разрыв связей между углеродом и водородом, что инициирует образование активных центров с высокой реакционной активностью. Если плазменный поток не контактирует с поверхностью полимерного материала, то происходит лишь химическое взаимодействие с атомами и радикалами плазмы.

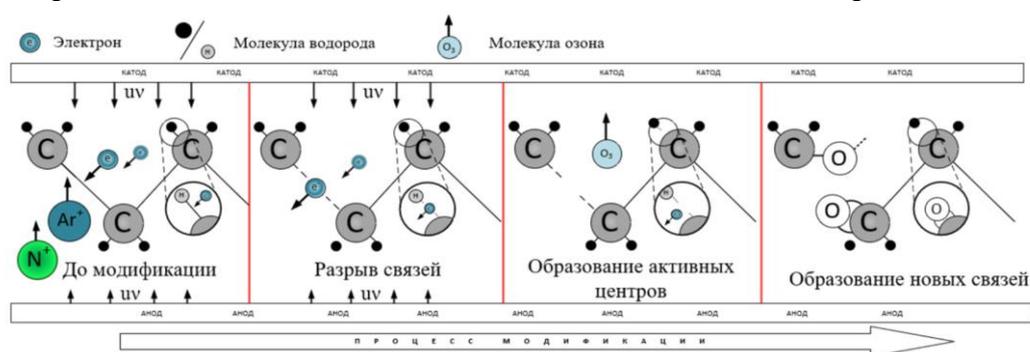


Рис. 2. Процесс модификации молекулярной цепи полиэтилена

На основании приведенного возможного процесса модификации пленок можно предположить, что в небольшом объеме воздуха вблизи электрода протекают ионизация, возбуждение, диссоциация кислород- и азотсодержащих молекул на атомы, затем рекомбинируемых в гидроксильные группы. В условиях большой выборки экспериментальных данных целесообразным способом изучения контактных свойств является исследование краевого угла смачивания модифицированного материала, основанного на измерении угла жидкости относительно плоскости поверхности материала.

Таблица. Краевые углы смачивания пленок ПЭ и ПП

№ образца	Материал	Время модификации, с	Краевой угол смачивания, °
1	ПЭ	0	97–99
2		5	33–35
3		10	22–24
4		15	21,5–23
5		30	21,1–22
6	ПП	0	74–77
7		5	48–50
8		10	35–37
9		15	31–33
10		30	29–32

Проведенный анализ исследований выявил, что увеличение времени воздействия плазменного разряда на поверхность ведет к уменьшению краевого угла смачивания, что в свою очередь способствует увеличению работы адгезии. Из таблицы видно, что оба материала демонстрируют улучшение адгезионных свойств под воздействием плазменной модификации. Однако, различия в реакции на плазменные поля обусловлены химической структурой и фи-

зическими характеристиками полимеров. Полиэтилен, как более «мягкий» материал, в большей степени поддается модификации, что приводит к улучшению адгезионных свойств и увеличению полярности поверхности. В то время как полипропилен, благодаря своей более стабильной структуре, требует большей мощности плазменного разряда для достижения аналогичных результатов. Оптимальным временем модификации является интервал 10–15 секунд при угле $\alpha=135^\circ$, с полученными значениями краевых углов $\Theta = 21,5^\circ$ для полиэтилена и $\Theta = 33,5^\circ$ для полипропилена. Дальнейшая модификация продолжительностью не дает достоверного отклонения относительно 10-секундного воздействия, так как изменяет краевой угол в диапазоне $\Theta = 1,5-2^\circ$.

Заключение. На основании анализа результатов было установлено, что модификация полимерных пленок в плазме атмосферного давления обеспечивает улучшение адгезионных свойств полимерных материалов. Разработанный метод модификации избавляет от необходимости использования дорогостоящих химических реактивов. Увеличение адгезионного взаимодействия объясняется разрывом химических связей макромолекулы полимерной пленки с образованием новых функциональных групп при взаимодействии с другими реакционноспособными атомами, способствующие повышению адгезии поверхности полимерной пленки к различным субстратам.

Литература

1. Повстугар, В. И. Строение и свойства поверхности полимерных материалов / В. И. Повстугар, В. И. Кодолов, С. С. Михайлова. – Издательство Химия, 1988. – 192 с.
2. Плазмохимическая модификация поверхности полимерных материалов. – URL: https://www.isuct.ru/conf/plasma/LECTIONS/Gilman_lecture.html (дата обращения: 20.12.2022). – Текст : электронный.
3. Модификация адгезионных свойств полимерных пленок обработкой коронным разрядом / В. В. Ананьев, Т. Н. Перетокин, Г. Е. Заиков, С. Ю. Софьина // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 5. – С. 116–119.
4. Юленец, Ю. П. Влияние условий модифицирования в плазме высокочастотного разряда на обратимость свойств поверхности пленок полиэтилена / Ю. П. Юленец, А. В. Марков, С. Ю. Грачев // Электронная обработка материалов. – 2020. – Т. 56. – № 3–4. – С. 61–65.
5. ГОСТ 10354-82 Пленка полиэтиленовая. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5) – docs.cntd.ru. – ИПК Издательство стандартов, 1983. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006604> (дата обращения: 20.12.2023). – Текст : электронный.
6. ГОСТ 16338-85 Полиэтилен низкого давления. Технические условия (с Изменением N 1) – docs.cntd.ru. – Стандартинформ, 1987. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020680> (дата обращения: 20.12.2023). – Текст : электронный.
7. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия (с Изменениями N 1, 2) – docs.cntd.ru. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020703> (дата обращения: 14.09.2024). – Текст : электронный.
8. Хаглеев, А. Н. Установка для модификации поверхности полимерных пленок в низкотемпературной плазме скользящего разряда атмосферного давления / А. Н. Хаглеев, К. А. Демин, М. А. Мокеев. – Улан-Удэ, 2022.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ВОЛОКНА ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ

Дондуков С.Д.², Агнаев С.С.¹, Демин К.А.^{1,2}, Хаглеев А.Н.^{1,2}

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
г. Улан-Удэ

² Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

dondukov.s@yandex.ru

*В статье рассматривается влияние плазменной модификации атмосферного давления на структуру волокна технической конопли. Было определено влияние параметров модификации на капиллярную впитываемость и микроструктуру образцов волокна конопли посевной (*Cannabis Sativa L.*), сорта Гляна.*

Введение. Волокна технической конопли является натуральным, биоразлагаемый материалом с относительно высокой прочностью, что позволяет применять его для создания экологически чистых и устойчивых материалов [1, 2]. Конопля относится к лубяным культурам [3], имеющим в своей структуре различные примеси (пектиновые соединения, гемицеллюлозу и лигнин) [4, 5], обуславливающие низкую адсорбционную способность и капиллярную впитываемость волокна. Примеси склеивают элементарные волокна, образуя длинные и комплексные пучки, что отрицательно сказывается на качестве волокна, снижая его мягкость, пластичность и способность к расщеплению.

Модификация позволяет отделить волокно конопли от естественных примесей, что дает повышение мягкости, пластичности и способности к расщеплению [4], что обеспечивает возможность для создания композитов с улучшенными характеристиками [6]. Так, например, модифицированные волокна используют как фибру для армирования бетонов, что увеличивает его прочностные характеристики на изгиб и трещиностойкость [7, 8].

Известен метод [9, 10] модификации конопляных волокон, заключающийся в обработке волокна пламенным разрядом в плазменно-растворной системе в растворе гидроксида натрия и последующей сушке. Однако такой метод длителен, трудоемок, а использование гидроксида натрия требует дополнительных мер безопасности ввиду высокой химической опасности при попадании на кожу и слизистые покровы.

Модификация волокон технической конопли в атмосферной плазме позволит снизить трудоемкость и вредность процессов очистки от натуральных загрязнений [11] и повышения адсорбции лубяных волокон, не влияя при этом на их прочность. Описанные эффекты обеспечат более глубокое проникновение жидкости, заполнение пор и мелких неровностей волокна [12].

Объекты и методы исследования. Модификацию производили на установке (рис. 1) в плазменном потоке атмосферного давления. В качестве реакционного газа применили воздух, средняя потребляемая мощность установки составила 240 Вт.

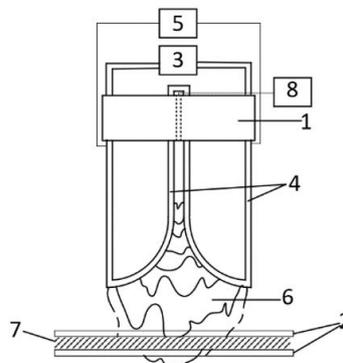


Рис. 1. Установка для модификации волокна конопли: 1 – корпус эжектора, 2 – сетка, 3 – система жидкостного охлаждения электродов, 4 – медные трубчатые электроды, 5 – высоковольтный источник питания, 6 – плазменный поток, 7 – волокно конопли, 8 – система напуска реакционного газа

Установка для активации поверхности полимерных пленок в плазменном потоке атмосферного давления состоит из корпуса эжектора из диэлектрического материала 1, электродов 2 подключённых к системе охлаждения 3. Эжектор имеет сопло с зазором 5 мм для потока реакционного газа из системы напуска 8. На корпусе зеркально закреплены электроды, изготовленные из медных трубок, с межэлектродным зазором 2 мм, подключенные к высоковольтному источнику питания 5. Электроразрядной зоной является область плазменного потока 6 атмосферного давления, проходящего через сетки 2 закрепленных между ними образцов технической конопли 7.

В работе исследованы волокна конопли посевной (*Cannabis Sativa L.*), сорта Гляна, выращенной на опытном поле Иволгинского района РБ ФГБОУ ВО Бурятской ГСХА. Семенной материал заказан в ООО «Мордовские пенькозаводы». Волокно механически отделили от костры, полученное волокно разрезали на фибру длиной 15 – 20 мм.

Смачиваемость образцов волокон технической конопли оценивали по показателю капиллярной впитываемости (ГОСТ 29104.11-91).

Исследования поверхности волокна технической конопли осуществляли на электрон сканирующем микроскопе NEOSCOPE II JCM-6000 (JEOL Ltd.), увеличение $\times 340$, ускоряющее напряжение 10 кВ.

После модификации волокна, при различном времени модификации провели испытания по определению капиллярной впитываемости, данные представлены в таблице.

Таблица. Данные смачиваемости образцов волокон технической конопли

Время модификации, с	Высота подъёма воды, мм	Рост капиллярной впитываемости, %
Исходное волокно	5,4–7,9	-
4	20,2–22,3	219
12	30,3–34,5	387

Увеличение капиллярной впитываемости волокна, под воздействием плазменного потока атмосферного давления, связано с изменением структуры волокна, расщеплением и удалением естественных таких примесей, как пектиновые соединения, гемицеллюлоза и лигнин (рис. 2).

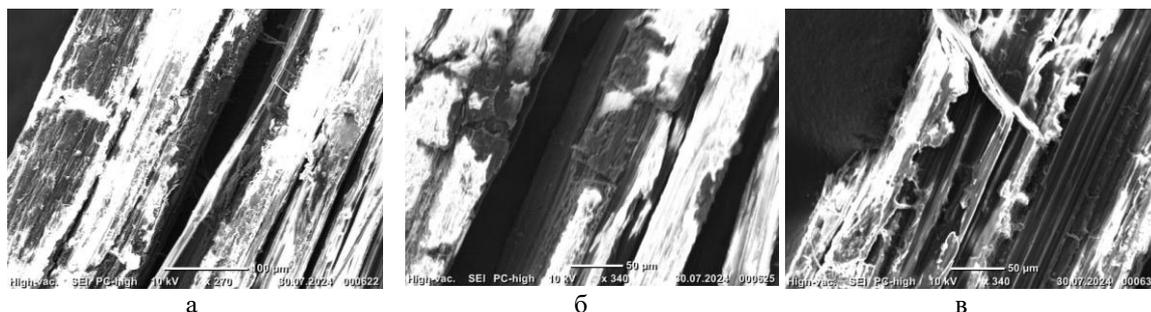


Рис. 2. Микроструктура конопляного волокна: а – исходное волокно; б – волокно модифицированное – 4, с.; в – волокно модифицированное – 12 с.

Исходный образец волокна конопли имеет гладкую поверхность, волокна склеены лигнином, который уменьшает полезную площадь сцепления волокна (рис. 2). Из рисунка 2, б видно, что после плазменной модификации на поверхности образуются дефекты и микронеровности, тем самым увеличивается площадь сцепления волокна, улучшающая капиллярную впитываемость и адсорбционные свойства. Так же можно заметить, что с увеличением времени модификации уменьшается количество примесей и растет степень расщепленности волокна. Однако аналогично идет процесс термической деструкции волокна (рис. 2, в). Плазменная модификация отказывает на волокно термическое воздействие заряженными частицами и УФ-излучением, что при длительной обработке повышается вероятность разрушения волокна, что негативно сказывается на его свойствах таких как износостойкость и долговечность.

Заключение. На основании проделанной работы можно прийти к выводу, что модификация плазмой атмосферного давления волокна конопли положительно сказывается на капиллярной впитываемости и адсорбционной способности за счет изменения структуры материала. Полученные эффекты расширяют возможности применения конопляного волокна в композитных материалах на основе эпоксидных смол, фибробетона для их армирования.

Материал подготовлен в рамках проекта Межрегионального научно-образовательного центра «Байкал» «Создание производственного комплекса по переработке быстровозобновляемых источников целлюлозы» и государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, научная тема FWSF-2024-0010.

Литература

1. Wretfors C., Cho S.-W., Hedenqvist M., Marttila S., Nimmermark S., Johansson E. Use of Industrial Hemp Fibers to Reinforce Wheat Gluten Plastics // *Journal of Polymers and the Environment*. 2009. 17(4). P. 259–266.
2. Sun Sh., Yan Yo., Zhou Ch., Pillay S., Ning H. Mechanical performance of epoxy matrix composites reinforced by physically and chemically treated hemp fiber // *Polymer Composites*. 2024. P. 1–12. DOI: 10.1002/pc.28824.
3. Медведев П.Ф. Новые культуры СССР (волокнистые), М.; Ленинград: Сельхозгиз, Ленингр. отд-ние 1940; 320 с.
4. Корчагина А. А., Гладышева Е. К., Будаева В. В., Скиба Е. А. Химический состав волокна и костры лубяных культур и продуктов их щелочной делигнификации // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. № 4 (47). С. 621–630. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630.
5. Khan S.H., Rahman M.Z., Haque M.R., Hoque M.E. Characterization and comparative evaluation of structural, chemical, thermal, mechanical, and morphological properties of plant fibers // *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. Singapore: Springer; 2023, P. 1–45. DOI: 10.1007/978-981-99-2473-8_1.
6. Chen T., Liu W., Qiu R., Wen X. Mechanical properties and interface characterization of modified-hemp-fiber reinforced unsaturated polyester composites // *Polymeric Materials Science and Engineering*. 2013. 29(9). P. 94-97.
7. Le Troedec M., Sedan D., Peyratout C., [et al]. Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. 39(3). P. 514–522.
8. Ovchinnikova S., Kalinichenko M., Markina N., Schneider E. Energy modernization of housing stock // *E3S Web of Conferences*. 2020. № 157. 06028.
9. Делигнификация лубяных волокон под действием плазменно-растворной обработки / Ю. В. Титова, В. Г. Стокозенко, М. В. Конычева, А. И. Максимов // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2009. Т. 52, № 7. С. 110–113.
10. Использование плазменно-растворной обработки в процессах модификации лубяных волокон / М. В. Конычева, Ю. В. Титова, В. Г. Стокозенко [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2010. № 3. С. 17–20.
11. Азанова А.А., Абуталипова Л.Н., Тихонова Н.В. Особенности плазменной обработки льняного волокна // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2020. С. 119–122.
12. Skundric P. et al. Wetting properties of hemp fibres modified by plasma treatment // *Journal of Natural Fibers*. – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 25–33.

РЕСУРСЫ СЕВЕРА: ХОЛОД КАК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Иванов Т.Д., Аммосов Г.С., Аммосова Л.С.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

ivanovtuluyhan@gmail.com

В статье теоретически рассматривается возможность получения энергии с помощью тепловой машины, работающей на разнице температур подледной воды и холодного зимнего воздуха в условиях Якутии. Показано, что потенциал извлекаемого объема энергии очень высок и способен обеспечивать электроэнергией целые улусы в зимние месяцы. Также отмечено, что при правильном выборе размера водоема, в который устанавливается, работа тепловой машины не окажет негативного воздействия на экологию водоема.

Введение. Текущая система традиционной энергетики основана на сжигании энергоносителей, таких как уголь, нефть, природный газ и т. д., что приводит к выбросу парниковых газов и других вредных веществ. Также, большим недостатком традиционной энергетики является необходимость транспортировки больших объемов энергоносителей к месту использования энергии. Это часто становится сложной задачей в местах с ограниченной транспортной инфраструктурой.

Источники возобновляемой энергии не выделяют вредные выбросы и добываются прямо на нужном месте. Наиболее распространенными формами являются солнечная и ветровая энергетика. В северных регионах солнечная энергетика работает только летом, в зимнее время энергоотдача очень мала, и даже отсутствует длительное время. Ветровая энергетика характерна тем, что не может обеспечить постоянный поток энергии, по этой причине, параллельно с ним обязательно должна работать традиционная энергетика.

Но в то же время, в северных регионах есть много водоемов, подо льдом которых в зимнее время сохраняется положительная температура. А воздух всю зиму имеет отрицательную температуру. Эта температурная разница может стать основой для создания энергетического устройства со стабильной отдачей.

Теоретическое обоснование потенциала холода в качестве источника энергии. Предлагаемая тепловая машина работает по стандартной схеме: холодный газ сжимается, нагревается, затем расширяясь, совершает полезную работу, отработавший газ охлаждается и проходит цикл заново аналогичной схеме. Для этого она имеет компрессор, расширитель и теплообменник для нагрева. Если в качестве рабочего газа будет использоваться воздух, то теплообменник для охлаждения не потребуется – отработавший воздух просто выбрасывается в атмосферу.

Рассмотрим эти процессы на PV-диаграмме (рис. 1). Процессы сжатия (1–2) и расширения (3–4) происходят быстро, поэтому они являются адиабатическими. Охлаждение (4–1) происходит в атмосфере (показано пунктиром) при постоянном давлении, то есть изобарно. Нагрев (2–3) осуществляется в теплообменнике до температуры подледной воды. Если объем теплообменника значительно превышает объемы компрессора и расширителя, то за цикл давление в теплообменнике меняется незначительно, что позволяет считать процесс нагрева изобарным. Таким образом, можно утверждать, что машина работает по циклу Брайтона [1]. Цикл Брайтона был подробно изучен, и мы можем воспользоваться готовыми формулами для анализа работы предлагаемой машины [1, 2].

Для численного анализа возможностей тепловой машины наглядно оценивать её мощность, для чего необходимо определить количество циклов в секунду или количество оборотов поршневой машины. Предположим, что разрабатываемая тепловая машина выполняет 1000 оборотов в минуту. На текущем этапе развития машиностроения это является несложной задачей.

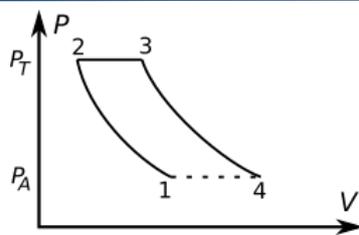


Рис. 1. PV-диаграмма тепловой машины

Для оценок работы машины удобно использовать его рабочий объем. Массу проходящего через машину воздуха можно выразить через объем компрессора. Тогда для мощности получим формулу:

$$W = n V \frac{\mu P_A c_p}{R T_A} \left(T_T \left[1 - \left(\frac{P_A}{P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - T_A \left[\left(\frac{P_T}{P_A} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right), \quad (1)$$

где n – количество циклов в секунду, V – объем компрессора, μ – молярная масса воздуха, R – универсальная газовая постоянная, c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении, k – показатель адиабаты воздуха, P_A – атмосферное давление, P_T – давление в теплообменнике, T_A – температура воздуха, T_T – температура подледной воды.

Температуры воздуха и теплообменника, также давление атмосферы заданы окружающими условиями. Но можно изменять давление в теплообменнике. Оптимальное давление, при котором получим максимальную работу, вычисляется по формуле [1]:

$$P_T = P_A \left(\frac{T_T}{T_A} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad (2)$$

Поскольку машина извлекает теплоту из подледной воды, в процессе ее работы вода охлаждается, а в конце превращается в лед, что приводит к увеличению толщины ледового покрытия водоема, где она установлена. Поглощенная от воды теплота соответствует теплоте процесса 2–3 на PV-диаграмме. Если связать эту теплоту с мощностью машины, то для темпа образования объема льда (ежесекундно образующегося объема льда) мы получим следующую формулу:

$$U = n V \frac{\mu P_A c_p}{\rho \lambda R T_A} \left(T_T - T_A \left[\frac{P_T}{P_A} \right]^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (3)$$

где ρ – плотность льда, λ – удельная теплота плавления льда.

Теплообменник. Расчеты значений оптимального давления в теплообменнике, выполненные по формуле (2) с учетом температуры подледной воды, равной +4°C, и при различных температурах холодного воздуха, приведены в таблице 1. Как видно, давление сверх атмосферного не превышает 5 м водяного столба, что дает возможность использовать простой теплообменник, функционирующий по принципу барботажа, имеющий высокую эффективность теплообмена. На рис. 2 показан эскиз такого теплообменника. Нужно найти в водоеме место с глубиной 5 м, можно углубить дно, и установить вертикально трубу. В трубу снизу подаем холодный воздух пузырьками, а сверху отбираем нагретый.

Таблица 1. Давление в теплообменнике при различных температурах воздуха

Температура воздуха, °С	Давление в теплообменнике, кПа	Избыточное давление в теплообменнике, сверх атмосферного	
		кПа	давление водяного столба, м
-10	110	9	1,0
-20	118	17	1,8
-30	127	26	2,7
-40	137	36	3,6
-50	148	47	4,7

Оценки производительности тепловой машины. Были проведены оценки мощности тепловой машины при её работе в центральной Якутии. Среднемесячные температуры воздуха взяты из архива метеорологических данных [5]. Машина функционирует в период, когда температура воздуха отрицательная – это месяцы с октября по апрель. Но октябрь и апрель исключены из рассмотрения по причине слишком малой эффективности машины.

Результаты вычислений по уравнениям (1) и (3) при различных объемах компрессора машины представлены в таблице 2. Рассчитаны по месяцам средняя мощность машины, выработка энергии за месяц и объем дополнительного льда при непрерывной работе. Моделировались объемы компрессора 1 л и 10 000 л. При текущем уровне машиностроения, самые большие поршневые машины имеют объем до 25 тысяч литров [4], поэтому строительство поршневой машины на 10 тысяч литров выполняемая задача.

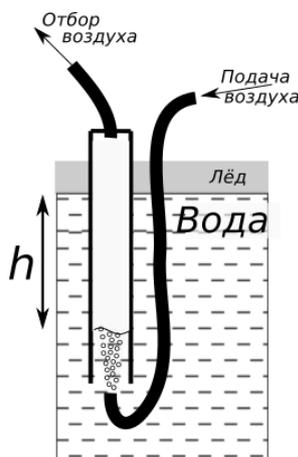


Рис. 2. Теплообменник

Таблица 2. Производительность тепловой машины по месяцам

Месяц	V=1 л			V=10000 л		
	мощность, кВт	энергия за месяц, кВт·ч	лед, м ³	мощность, кВт	энергия за месяц, кВт·ч	лед, м ³
ноябрь	0,026	18	3,5	256	184586	35504
декабрь	0,045	33	4,8	453	326015	48142
январь	0,050	36	5,1	505	363680	51076
февраль	0,039	28	4,4	386	278126	44193
март	0,014	10	2,6	145	104670	26329
за год		129	23		1294746	226847

Обсуждение результатов оценок. Машина с объемом 1 литр выдает мощность несколько десятков ватт, что достаточна для зарядки различных гаджетов и светодиодного освещения в полевых условиях. Такое устройство может быть полезным при выезде на природу зимой, в местах, где отсутствует электроснабжение. При непрерывной работе за всю зиму, в водоеме, где она установлена, дополнительно образуется лед объемом 23 м³. Предположим, что она установлена на небольшом озере диаметром 100 м, площадь около 8000 м². Тогда дополнительная толщина льда составит примерно 3 мм. Учитывая, что нормальная толщина льда водоемов за зиму превышает метр, эти 3 мм будут незаметными.

Машина объемом 10 000 литров выдает мощность в сотни киловатт и за месяц вырабатывает сотни тысяч кВт·ч. Такое количество энергии достаточно для обеспечения электроэнергией целых улусов. Из отчетов о поставках электроэнергии АО «СахаЭнерго» [3] видно, что, например, Оленекский РЭС в декабре, январе и феврале отпускает около 300 тысяч кВт·ч электроэнергии в месяц. Предлагаемая машина способна производить аналогичное количество энергии. Машина объемом 10 000 литров при непрерывной работе за всю зиму образует в водоеме дополнительный лед объемом 226847 м³. Если установить эту машину на реке Оленек, площадь ледового покрова которой составляет около 1000 квадратных километров, дополнительная толщина льда будет менее миллиметра, что не окажет влияния на экологию реки.

Заключение. Теоретическое исследование показало, что холод может рассматриваться как полноправный член возобновляемых источников энергии, и может стать важным элементом энергетического баланса северных регионов, где традиционные источники энергии ограничены.

Можно разработать и изготовить тепловые машины, работающие на разнице температур подледной воды и зимнего холодного воздуха, которые будут доступны в широком диапазоне мощностей. Наиболее компактные могут использоваться как переносные источники электроэнергии в зимних походах. Самые мощные могут обеспечить электроэнергией населенные пункты и даже целые улусы в зимний период.

Побочным эффектом машины, извлекающей тепло из подледной воды, является увеличение толщины льда водоема. Но при правильном выборе размера водоема, негативных последствий на экологию водоема можно избежать.

Литература

1. Андриященко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок / А. И. Андриященко, А.И. Попов. – Москва: Высшая школа, 1980. 240 с.
2. Арнольд Л.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебник для вузов – издание 2-е переработанное / Л. В. Арнольд, Г.А. Михайловский, В.М. Селиверстов. – Москва: Высшая школа.1979. 446 с.
3. Сахаэнерго / Информация об объеме полезного отпуска. Расшифровка полезного отпуска электроэнергии за 2023 год [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sakhaenergo.ru/investors/disclosure/informatsiya-ob-obeme-poleznogo-otpuska/>, свободный – (дата обращения 15.07.2024).
4. Свободная энциклопедия Википедия / Wärtsilä-Sulzer RTA96-C [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Wärtsilä-Sulzer_RTА96-C&stable=1, свободный – (дата обращения 12.05.2024).
5. Справочно-информационный портал Погода и климат / Средние месячные и годовые температуры воздуха в Якутске [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm?ysclid=luvcv5jr7z265102553>, свободный – (дата обращения: 10.02.2024).

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-290-293

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ БИВНЕЙ МАМОНТА РАЗНЫХ СОРТОВ

Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Соловьев Т.М., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В.

ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

tatyana_issakova@mail.ru

Исследованы структурные характеристики разных сортов бивня мамонта (БМ) методами термогравиметрии, рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии. Термогравиметрический анализ БМ показал, что процесс термохимической деструкции практически не зависит от сортности. Методом РФА установлено, что основным компонентом БМ является магний замещенный гидроксипатит. Однако, в образцах БМ III и IV сортов кроме гидроксипатита были обнаружены следы минерала ньюберит. Методом ИК-спектроскопии отмечено, что сорта БМ отличаются друг от друга интенсивностью полос поглощения функциональных групп всех компонентов.

В зависимости от размеров и сохранности бивня мамонта (БМ) различают БМ на сорта согласно документу «Технические условия на ископаемый бивень и его обломки, добываемые на территории Республики Саха (Якутия)» (ТУ 421-001-92), разработанному Национальным мамонтовым фондом Республики Саха (Якутия) и Всемирным музеем мамонта (г. Якутск) [1]. Всего выделено 4 сорта.

I сорт. БМ без повреждений, без трещин, вещество бивня сухое, минимальный диаметр при выходе из альвеолы – 10 см; фрагменты без трещин, диаметр минимальный – 10 см, длина минимальная – 30 см;

II сорт. БМ целые или повреждённые с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с отдельными (не более 3-х) продольными трещинами глубиной до 30% диаметра; диаметр минимальный – 7,5 см; фрагменты с трещинами (не более 3-х), диаметр минимальный – 7,5 см, длина минимальная – 20 см;

III сорт. БМ целые или повреждённые с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с несколькими продольными трещинами глубиной до 50% диаметра и/или с концентрическими трещинами в краевой зоне; диаметр минимальный – 5 см; длина минимальная – 10 см;

IV сорт. фрагменты бивней в виде обломков или щепы (редко – сильно разрушенные бивни) с многочисленными продольными и кольцевыми трещинами и расслоениями; гидроксипатит (костная ткань) и/или коллаген частично дегидратированы (обезвожены); параметры – без ограничений.

Основными компонентами БМ, как и практически любой другой костной ткани, являются коллаген, гидроксипатит (ГАП) и вода. Структурные характеристики образцов БМ определяли методом рентгенофазового анализа (РФА), термогравиметрического анализа (ТГА), ИК-спектроскопии. ТГА выполнен на приборе синхронного термического анализа фирмы NETZSCH – STA 449C Jupiter (Германия). Образцы нагревались в тигле из PtRh со скоростью нагрева 10 °С/мин от комнатной температуры до 1000 °С в инертной среде (аргон). РФА исследование проводили на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) при следующих условиях: $\text{CuK}\alpha$ -излучение – 30 кВ, 10 мА; интервал 4,5–65° (2 θ). Для идентификации минералов использована база данных PDF-2/Release 2011 RDB. ИК-спектроскопическое исследование образцов из БМ было выполнено на ИК- спектрометре «Nicolet Protégé 460» (США). Снятие спектров производилось по стандартной методике на образцах, таблетированных совместно с KBr. ИК-исследования выполнены в области 400–4000 см⁻¹.

На рисунке 1 представлены результаты ТГА БМ различных сортов.

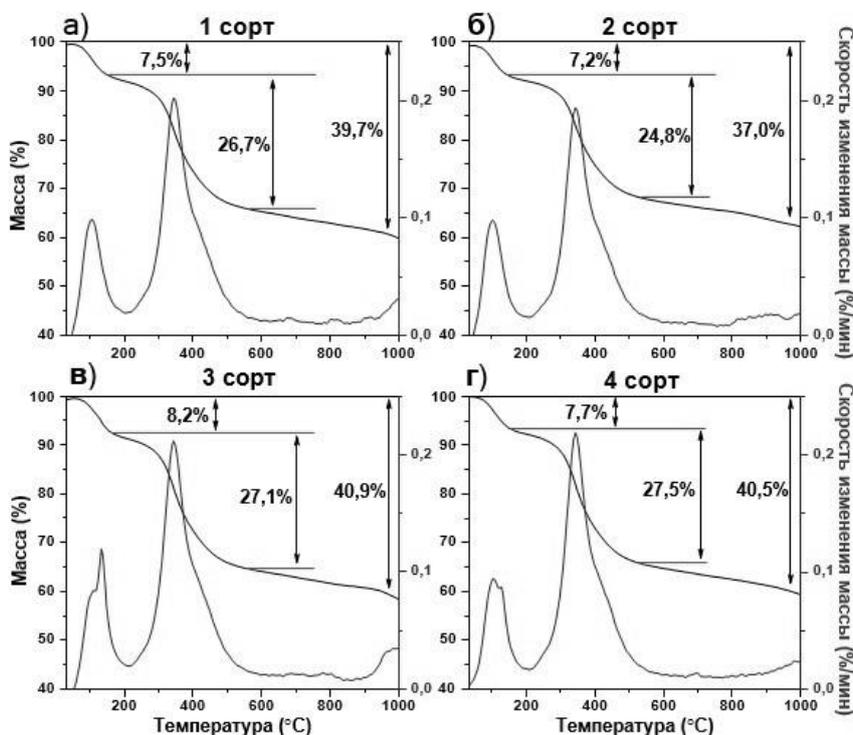


Рис. 1. Результаты термического анализа образцов разных сортов бивня мамонта: а) I сорт; б) II сорт; в) III сорт; г) IV сорт

ТГА БМ разных сортов показал, что процесс их термохимической деструкции практически не зависит от сортности. Об этом свидетельствуют характер полученных ТГ- кривых (рис.1), соответствующие температурные области основных стадий термодеструкции БМ, а также значения массовых потерь. Так выделяются 3 стадии термодеструкции БМ. В интер-

вале 25–200 °С в основном происходит выделение адсорбированной внешней влаги, содержание которой в исследованных образцах составляет ~8%. Стоит отметить, что в данном температурном диапазоне у образцов БМ III и IV сортов характер изменения массы имеет два экстремума в отличие от образцов БМ I и II сортов. Это может свидетельствовать о параллельном протекании двух различных процессов разложения. Так как БМ III и IV сорта, из-за наличия в них явных признаков естественного разложения, относят в группу находок более плохой сохранности, то разумно предположить, что в них часть органической массы находится в более окисленной форме, чем в бивнях I и II сортов. Поэтому наблюдаемые на ДТА-кривых образцов БМ III и IV сортов экстремумы могут быть связаны не только с выделением адсорбированной влаги, но и с термохимической деструкцией менее устойчивой окисленной формы их органической составляющей.

Процесс термического разложения основной органической массы БМ протекает в интервале температур 200–600 °С. Здесь наблюдается потеря массы в среднем на 27%. Из всех исследованных образцов выделяется образец бивня мамонта II сорта. У данного образца в идентичном температурном диапазоне выявлено уменьшение массы на 24,8%. Данная величина выглядит чуть заниженной, однако она находится в пределах естественного содержания органической массы в БМ.

В высокотемпературном интервале происходит дальнейшее выгорание органической части и преобразование структуры минеральной части. Об этом говорят незначительная потеря массы и наблюдаемые эндотермические и экзотермические пики. В ранее проведенных исследованиях было установлено [2], что при высоких температурах происходит преобразование минеральной части из апатитовой структуры в витлокитовую.

По данным РФА установлено, что в зависимости от сортности бивня состав его минеральной составляющей существенно не меняется – основным компонентом является магний замещенный гидроксиапатит (ГАП) ($\text{Ca}_{10-x}\text{Mg}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) [2]. Однако, в образцах БМ III и IV сортов кроме гидроксиапатита были обнаружены следы минерала ньуберит ($\text{Mg}(\text{PO}_3\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Находки данного минерала в БМ в научной литературе известны [3]. Так, было высказано предположение, что данный минерал может образовываться в бивне в условиях кислой среды ($\text{pH} < 6,2$) и при высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния.

Методом ИК-спектроскопии отмечено, что фиксируемые на всех спектрах полосы связаны с разными физическими типами колебаний составных компонентов бивня. Колебаниям характерным для органической фазы (коллагена) соответствуют колебания амидных группировок (A и B, I, II, III) и колебаний C–H связи алифатических групп (CH , CH_2 и CH_3). Пикам, характерным для ГАП, соответствуют колебания ортофосфорных группировок PO_4^{3-} , гидроксид анионов OH^- , карбонат-ионов CO_3^{2-} (в случае карбонатзамещенного ГАП) и воды. Следует отметить, что вода в ГАП описывается двумя формами: H_2O – адсорбированная и H_2O^+ – вода, структурно связанная с апатитом [4]. Также вода в молекулярном виде находится в капиллярах (дентиновых трубочках) самого бивня [5].

В целом, анализ ИК-спектров показал, что сорта отличаются друг от друга интенсивностью полос поглощения функциональных групп всех компонентов. Чем ниже сорт, тем выше интенсивность полос. Это говорит о том, что процессы минерализации идут намного активнее на поверхности, чем в объеме. Также это может подтверждать важную роль бактерий в процессах минерализации биосистем, поскольку изменение физико-химических свойств объекта с участием бактерий начинается с наиболее доступных участков фрагмента кости и зависит от положения этих участков по отношению к поверхности почвы, начиная с момента, когда образец оказался на земле. Эти выводы согласуются с данными, где отмечается каталитическая активность неорганической составляющей поверхности в условиях влажной среды на процесс минерализации цианобактерий [6, 7].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР № 122042000008-5. Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

Литература

1. Распоряжение Главы Республики Саха (Якутия) № 649-РГ от 13 августа 2018 г. «Об утверждении Концепции развития сбора, изучения, использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны на территории Республики Саха (Якутия)» – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/550166534>
2. Соловьев Т. М., Петухова Е. С., Ботвин Г. В., Исакова Т. А., Павлова В. В. Анализ состава и структуры бивня мамонта *Mammuthus primigenius* методами термогравиметрического и рентгенофазового анализа // *Материаловедение*. 2021. № 2. С. 9–12.
3. Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory // *Studies in Conservation*. 2002. V. 47 (3). P. 155–160. DOI: 10.2307/1506869
4. Вотяков С.Л., Киселёва Д.В., Щапова Ю.В., Смирнов Н.Г., Садыкова Н.О. Физико-химические характеристики ископаемых костных остатков млекопитающих и проблема оценки их относительного возраста. Ч.1. Термический и масс-спектрометрический элементный анализ. – Екатеринбург: Изд-во «Гошицкий», 2009. 118 с.
5. Хлопачев Г.А., Гиря Е.Ю. Секреты древних косторезов Восточной Европы и Сибири: приемы обработки бивня мамонта и рога северного оленя в каменном веке (по археологическим и экспериментальным данным). – СПб: Наука, 2010. 143 с.
6. Золотарев В.М. Исследование процесса минерализации биосистем методами ИК спектроскопии диффузного отражения // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 116, № 4. С. 645–660.
7. Benning L.G., Phoenix V.R., Yee N., Konhauser K.O. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, No.4. P. 743–757.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-293-296

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЛЭП, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Киселев А.Ю.¹, Васильев П.Ф.²¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутскrs_art@mail.ru

Надёжность ЛЭП лежит в основе бесперебойной работы потребителей электроэнергии, способствует сохранению энерговооружённости страны. Аварийное отключение ЛЭП может привести не только к перерыву в электроснабжении крупных и ответственных потребителей, но и к нарушению устойчивой работы энергосистемы. Особенно актуально вопросы обесточения потребителей стоят в районах Крайнего Севера, в частности, Якутии, где температура в зимнее время года достигает критических значений. Помимо этого, грозовой сезон на территории Якутии, характеризуется достаточно высокой грозовой активностью, достигающей в отдельных районах показателя 100 грозовых часов в год. Учитывая, что сооружённые во времена СССР воздушные ЛЭП не были запроектированы с фокусом на абсолютную грозоупорность, прямые удары молний и грозовые перенапряжения создают определенную аварийность на ЛЭП Якутии.

Проведённый анализ аварийных отключений ЛЭП напряжением 110 и 220 кВ, расположенных на территории Республики Саха (Якутия) за 2020–2023 гг. показал, что по причине грозовых воздействий произошло 154 отключения, что составляет 26,3% всех отключений ЛЭП данных классов напряжения за указанный период времени. Таким образом, территория Якутии подвержена достаточно активной грозовой деятельности, а ЛЭП остаются подвержены атакам молний.

В статье кратко рассмотрены актуальные проблемы обеспечения молниезащиты ЛЭП, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), а также способы ее повышения.

Вопросам надёжности ЛЭП, а также эффективности их молниезащиты до сих пор уделяется повышенное внимание [1, 2, 3, 4]. Авторами анализируются предпосылки возникновения так называемых «грозовых» отключений [2], рассматриваются затраты на послеаварийные осмотры, разрабатываются новые способы повышения молниезащиты ЛЭП. В таблице представлена статистика аварий на ЛЭП напряжением 110–220 кВ по причине грозовых воздействий в энергокомпаниях Якутии за 2020–2023 гг.

Таблица. Статистика аварий на ЛЭП напряжением 110–220 кВ по причине грозовых воздействий в энергокомпаниях Якутии

Энергокомпании, филиалы	Количество аварий в год				Итого за 2020–2023 гг.	Доля в% от всех аварий
	2020	2021	2022	2023		
Якутское ПМЭС	7	4	9	7	27	57,4
Южно-Якутские ЭС	12	12	18	5	47	43,9
ПАО «Якутскэнерго»	9	9	31	23	72	17,4
Прочие электросетевые объекты	4	1	1	2	8	44,4
Итого электросетевые объекты	32	26	59	37	154	26,3

Недостаточность молниезащиты сопряжена среди прочих с высоким удельным сопротивлением грунтов, в которых организовано заземление опор ЛЭП. Кроме того, в условиях Крайнего Севера эксплуатация заземляющих устройств опор ЛЭП осложнена наличием сил морозного пучения грунтов, действие которых в зимнее время года влечет за собой выталкивание фундаментов опор вверх из земли и, соответственно, приводит к обрывам заземляющих проводников (рисунок 1).

На протяжении долгих лет применялись типовые проекты присоединения заземлителей к металлическим решетчатым опорам (рисунок 2). Данные заземлители фактически не имели достаточного запаса по длине, что в условиях их растяжения при выдавливании фундаментов вверх неминуемо приводило к их обрыву, а соответственно к разземлению опоры ЛЭП (в случае отсутствия или обрыва дублирующих заземляющих проводников опоры).



Рис. 1. Обрыв заземляющего проводника в результате выдавливания железобетонных фундаментов из грунта силами морозного пучения

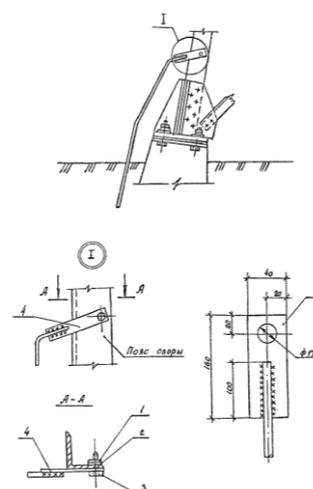


Рис. 2. Чертеж заземлителя металлической решетчатой опоры:
1 – гайка М16; 2 – шайба пружинная Ø17;
3 – болт М16×60; 4 – полоса 6×40

Техническое решение, представленное на рисунке 2 (типовой проект 3602ТМ-Т2, 1974 год), не лишено недостатков. Среди «возрастных» ЛЭП встречаются заземлители опор, изготовленные из армированной рифленой стали, что в принципе не противоречит указаниям [5], согласно которым заземлители выполняются из круглой стали диаметром 12–16 мм, а в отдельных случаях 18–20 мм. Однако учитывая особенности армированной рифленой стали, последняя ограничена пластичностью [6], что в условиях экстремально низких температур может приводить к разрыву стали, даже с учетом допустимой ее вытяжки и предела текучести (рисунок 1).

Учитывая данные обстоятельства, при новом строительстве используют различные формы заземляющих проводников опор ЛЭП, запас по длине которых позволяет исключить их разрывы в случаях, рассмотренных выше (рисунок 3).



Рис. 3. Варианты форм заземлителей металлической решетчатой опоры:
а) в виде витка; б) змеевидный

Учитывая величину падения напряжения на высоком эквивалентном сопротивлении металлических опор ЛЭП при разряде молнии в элементы опор или молниезащитный трос при наличии тросовой защиты чаще всего возникают «обратные» перекрытия гирлянд изоляторов (более 90% всех «грозовых» отключений), приводящие к аварийному отключению ЛЭП [2].

Достаточно эффективным средством по повышению грозоупорности ЛЭП в данных условиях, как показал опыт эксплуатации, является установка линейных разрядников с внешним искровым промежутком [1]. На двухцепных ЛЭП линейные разрядники устанавливаются над фазными проводами одной из цепи (рисунок 4) из того расчета, что при поражении молнией заземленных частей опоры ЛЭП или грозотроса в случае аварийного отключения цепи с недостаточной импульсной прочностью линейной изоляции другая цепь (с линейными разрядниками) останется в работе.



Рис. 4. Установка линейных разрядников на опоре ЛЭП класса напряжения 220 кВ

Опыт эксплуатации молниезащиты ЛЭП напряжением 220 кВ [1] подтверждает эффективность применения линейных разрядников с внешним искровым промежутком для повышения грозоупорности ЛЭП в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов.

В плане повышения экономической эффективности и надежности молниезащиты магистральных электрических сетей необходимо дальнейшее совершенствование технологий молниезащиты на основе применения линейных разрядников в сочетании с традиционными мерами по усилению изоляции, снижению сопротивлений заземляющих устройств опор и применению более совершенных конструкций заземлителей.

Для повышения качества проектирования, обоснованности технических решений по молниезащите целесообразно внедрение современных систем мониторинга грозовых разрядов и мест повреждений ЛЭП, основанных на волновых принципах измерений, позволяющих получить объективную информацию о характеристиках грозовой активности в регионе и поражаемости ЛЭП разрядами молнии.

С учетом многообразия исследований и способов повышения молниезащиты ЛЭП необходим комплексный подход [3] при рассмотрении вопросов грозозащиты, а также для дальнейшего изучения физических процессов воздействия атмосферного электричества на электросетевые объекты.

Литература

1. Гайворонский А.С., Киселев А.Ю., Львов А.П. К вопросу об эффективности средств молниезащиты магистральных электрических сетей ОЭС Востока // Передача и распределение электроэнергии. 2024. – № 1 (82). С. 64–72.
2. Киселев А.Ю., Львов А.П., Васильев П.Ф., Пинчуков П.С. Исследование предпосылок возникновения обратных перекрытий гирлянд изоляторов магистральных ЛЭП и определение места их повреждения // Энергия единой сети. 2023. № 3–4 (70). С. 20–26.
3. Киселев А.Ю. Способы повышения грозоупорности воздушных линий электропередачи Объединённой энергосистемы Востока / А. Ю. Киселев // Энергетик. – 2021. – № 9. – С. 21–26. – Текст : непосредственный.
4. Российская конференция по молниезащите: разговоры о важном. – 2024 [Электронный ресурс]. – URL: <https://streamer.ru/articles/rossiyskaya-konferentsiya-po-molniezashchite-razgovory-o-vazhnom/> (дата обращения 16.08.2024).
5. Типовой проект № 3602-тм. Заземляющие устройства опор 35–750 кВ: Москва, 1974.
6. Ахметов Т.А., Харитонов В.А., Козырева Ю.И., Мазаник А.В., Локтионова Л.В. Способы повышения пластических свойств холоднодеформированной арматуры. Литье и металлургия. 2018;(1):110–112. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-1-110-112>.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-296-299

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ ТЕХНИКИ

Климова А.М.¹, Васильева М.И.², Стручков Н.Ф.²

¹ Институт естественных наук, СВФУ, г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

a.klmva99@mail.ru

В работе проведено исследование структуры и свойств комплекта деталей грузового автотранспорта FAW, эксплуатируемого в Якутии. Исследованы химический состав, структура и свойства пальца и втулки рессоры заводского типа и аналога. Показано, что структуры исследуемых деталей характеризуются наличием феррито-перлитной составляющей. Проведены замеры твердости по методу Бринелля и микротвердости.

Республика Саха Якутия занимает огромную территорию в РФ. Благодаря автотранспортной технике обеспечиваются важные аспекты жизни, при этом их эксплуатация в особых низкотемпературных условиях Якутии в разы увеличивает количество поломок и выхода из

стройка деталей, существенно снижается надежность и работоспособность механизмов. Основную долю транспортных средств занимают грузовые автомобили. Примером наиболее подверженных деталей грузовых автомобилей при холодном пусковом запуске являются подшипники коленчатого вала, в которых нарушается смазочный процесс. Таким образом, выход из строя деталей машин и механизмов в зимний период является чрезвычайной ситуацией, так как устранение поломки может занять продолжительное время. Для предотвращения влияния низкотемпературного фактора предложены разнообразные способы подготовки автомобилей к эксплуатации в условиях Севера [1].

Исходя из вышеупомянутых проблем влияния низких климатических температур на технико-эксплуатационную часть грузовых автомобилей, исследование ходовой части является актуальной задачей, решение которой подтверждается программой развития и освоения Арктической зоны Российской Федерации.

Цель работы – исследование структуры и свойств комплекта деталей – втулки и пальца двух видов: заводского изготовления и аналога детали грузового автомобиля FAW, эксплуатируемого в условиях Якутии.

Материал и методика эксперимента. Объектом исследования являются втулка и палец рессоры грузового автомобиля, эксплуатируемого в условиях Якутии. Для сравнения рассмотрены детали заводского типа и аналога (для замены заводских деталей). После выхода из строя заводские детали подвержены замене: обычно наличие заводских деталей в магазинах запчастей очень мало, приходится покупать контрактные или аналоги деталей. На рис. 1 показаны детали грузового автомобиля: палец и втулка. Несмотря на совпадения геометрических форм, внешне детали отличаются, например, выемками на пальце и расположением углубления для вывода смазочного материала. Палец цилиндрической формы (размер диаметра – 30 мм, длина – 147 мм) имеет осевое отверстие и входит в сопрягаемую втулку (длина – 90 мм, внешний диаметр – 38 мм, внутренний диаметр – 34 мм).



Рис. 1. Общий вид деталей грузового автомобиля: палец и втулка

В работе использованы приборы Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Якутский Научный Центр» Сибирского отделения Российской Академии Наук (ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН). Химический состав определен на спектрометре «WAS Foundry-Master». Проведен визуальный осмотр поверхности с помощью стереоскопического микроскопа «Stemi 2000C». Металлографические исследования проведены на оптическом микроскопе Neophot-32. Замер твердости проведен по методу Бринелля, микротвердость проведен на приборе «ПМТ-3» при нагрузке на индентор 50 г.

Обсуждение результатов. В работе проведено исследование комплекта деталей заводского и покупного типа (аналог) – пальцы и втулки грузового самосвала FAW (First Automotive Works). В результате спектрального анализа химического состава исследованных образцов выявлены соответствия составов согласно марочнику сталей [2] (табл. 1). Так, материал пальца заводского типа соответствует стали Стбсп (конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества), а втулка заводского типа соответствует стали марки Ст0, по свойствам от материала стали пальца отличается не склонностью к отпусковой хрупкости. Также приводятся данные материала комплекта детали аналога пальца и втулки, обозначаемые в таблице – аналог.

Таблица 1. Химический состав исследованных образцов

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	Стбсп
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	СтЗсп

Аналог пальца по химическому составу соответствует стали марки 40Х. В работе [3] обосновано применение стали 40Х прямого восстановления для шаровых пальцев грузового автомобиля. Втулка аналога соответствует углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества Ст3сп. Преимущественным показателем этой стали является стойкость к возникновению коррозионных процессов и возможность сваривания.

Проведено исследование макроструктуры исследуемых деталей (рис. 2). Так как палец и втулка при эксплуатации претерпевают значительные статистические, динамические и циклические нагрузки, детали имеют поверхностное упрочнение. Толщина поверхностного упрочнения пальца заводского типа и аналога составляет около 300 мкм (рис. 2 а, в). Также у заводской втулки имеется поверхностная обработка с внутренней стороны толщиной около 400 мкм (рис. 2, б). Аналог втулки видимой границы упрочнения не имеет, однако имеется неравномерные участки по всей поверхности, отличающиеся при визуальном анализе после шлифования и полирования.

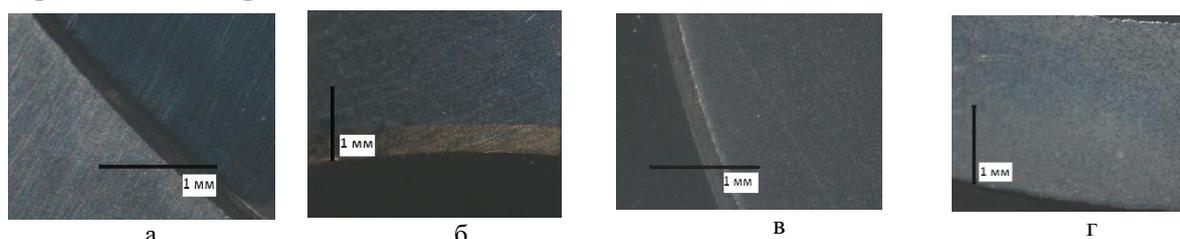


Рис. 2. Макроструктура деталей грузового автомобиля палец и втулка: заводского типа палец (а) и втулка (б); аналог палец (в) и втулка (г)

Микроструктура образцов исследуемых деталей пальца заводского типа и аналога представлены на рис. 3. Структура заводского пальца представляет собой преобладающий феррит и перлит с деформированными зёрнами (рис. 3 а). Это указывает на начало деградационных изменений структуры при увеличении сопряженных нагрузок. На рис. 3, б показана микроструктура заводской втулки (феррит) с переходной зоной на упрочняющий медьсодержащий слой. Структура аналога пальца представляет типичную структуру доэвтектоидной стали – феррито-перлитную без выраженной полосчатости. Структура аналога втулки феррито-перлитная, с преобладающим разнотернистым ферритом. Это указывает на начало рекристаллизационных процессов.

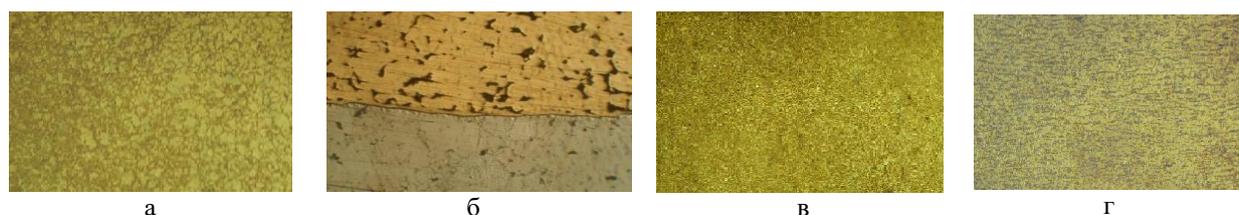


Рис. 3. Микроструктура деталей грузового автомобиля палец и втулка: заводского типа палец (а) и втулка (б); аналог палец (в) и втулка (г)

В таблице 2 представлены значения твердости по методу Бринелля и микротвердости при нагрузке на индентор 50 г.

Таблица 2. Средние значения твердости и микротвердости исследуемых деталей

Образец	Участок замера	НВ	Микротвердость, МПа
Палец (завод)	Упрочненный слой	302	7170
	Центральная зона		4040
Палец (аналог)	Упрочненный слой	301	6450
	Центральная зона		2750
Втулка (завод)	Поперечный шлиф	121	1433
Втулка (аналог)	Поперечный шлиф	186	2063

Как видно из таблицы 2, микротвердость упрочненного слоя значительно выше (до 2,4 раза) центральной зоны на обоих пальцах. У пальца заводского исполнения микротвердость упрочненного слоя выше аналога на 11%. В центральных частях обоих пальцев значения микротвердости значительно уступают упрочненному слою. Микротвердость втулки заводского типа значительно «мягче», стандартное отклонение составляет 6,9, что подтверждает равномерность распределения феррито-перлитной составляющей структуры. Значения микротвердости втулки аналога соответствует значению 2063 МПа, что является выше показателя микротвердости втулки заводского типа на 30%.

Заключение. Проведено исследование структуры и свойств втулки и пальца рессоры грузового автомобиля FAW. Определен химический состав исследуемых образцов. Согласно марочнику сталей выявлены марки сталей по химическому составу. Анализ макроструктуры показал, что пальцы имеют упрочненный слой около 300 мкм от края цилиндра. Строение внутренней стороны втулки заводского типа и аналога отличаются. Микроструктура исследуемых образцов представляет собой преобладающий феррит и перлит с деформированными зернами. В результате замера твердости по методу Бринелля среднее значение твердости пальцев заводского типа и аналога особо не различаются. Отрыв значений твердости втулки отмечен у деталей аналога. Микротвердость заводского пальца имеет значительное преимущество от микротвердости аналога. Значения микротвердости втулки аналога выше показателя микротвердости втулки заводского типа на 30%.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0036).

Литература

1. Ковриков И.Т., Калимуллин Р.Ф., Казаков А.В. Оценка эффективности средства тепловой подготовки автомобильного двигателя к холодному пуску / Автомобильная промышленность. 2018. № 1. С. 28–30.
2. 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.
3. Астащенко В.И., Пуртова Е.В., Швеева Т.В., Пуртов А.В. Разработка технологии и опыт производства шаровых пальцев грузового автомобиля из экономно-легированной стали // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 4. С. 133–140.

НАДЕЖНОСТЬ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ КУЗБАССА

Ковалев М.А.¹, Москвичев В.В.^{1,2}

¹ Красноярский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, г. Красноярск

² Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

kovalevmalk@gmail.com

Приведены результаты исследования показателей надежности карьерных гидравлических экскаваторов ЭКГ-10 в условиях угольных разрезов Кузбасса. Выполнен анализ простоев экскаваторов, определены количественные значения потенциального роста объема вскрышных работ при повышении эксплуатационной надежности, оценена эффективность существующей системы сбора и анализа информации о надежности экскаваторов. Составлен рейтинг основных причин простоев экскаваторов, эксплуатируемых в условиях угольных разрезов Кузбасса.

На эксплуатационную надежность работы экскаваторов (подсистема «машина») воздействуют как подсистема «среда» – внешние факторы и их совокупность (температура окружающей среды, изменения нагрузки, вибрация, крепость горных пород), так и подсистема «человек» – условия эксплуатации (качество проведения буровзрывных работ, качество подготовки забоя, уровень квалификации оператора-машиниста, своевременность проведения технического осмотра и ремонта), вызывающие изменения состояния систем экскаваторов (гидравлической, механической, электрической и пр.) и их компонентов.

Важным условием для повышения эффективности использования экскавационной техники является определение критериев и показателей, дающих объективное представление о техническом состоянии подсистемы «машина» под воздействием подсистем «среда» и «человек». Постановка этой задачи заключается в определении влияния на работоспособность экскаватора факторов, обусловленных работой оператора-машиниста и интенсивностью изменения состояния экскаватора в конкретных горно-геологических и климатических условиях.

Материалы и методы. Анализ эксплуатационных показателей надежности выполнен для карьерных гусеничных экскаваторов (ЭКГ), эксплуатируемых на угольных разрезах Кузбасса. Парк канатных экскаваторов представлен экскаваторами отечественного производства дочерних предприятий ОАО «ОМЗ» (Объединённые машиностроительные заводы), модель – ЭКГ-10. Средний возраст парка канатных экскаваторов 6 лет, при средней наработке 16,2 млн м³. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические параметры ЭКГ за период 2017–2019 гг.

Параметры	ЭКГ
Исходный объем ковша, м ³	10
Средняя наработка, м/часа	23 677
Год ввода в эксплуатацию	2008–2014
Эксплуатационная масса, тн	442
Давление на грунт, кПа	204
Расчетная продолжительность цикла на угол 90°, с	26
Количество эксплуатируемых экскаваторов, ед.	5

В статистику отказов оборудования парка ЭКГ включены следующие основные группы: механическое оборудование, электрическое оборудование, система смазки, а также простои по причинам, оказывающих влияние на восстановление и время нахождения экскаватора в работе. К ним относятся: ожидание ремонта – «ожидание ремонта в сервисе», «отсутствие ремонтной бригады», «отсутствие запасных частей» и внешние причины – «отключение внешнего электроснабжения», «климатические условия», «остановка контролирующими органами».

Результаты исследования. Суммарная наработка экскаваторов ЭКГ-10 за период с 2017 по 2019 годы составила 47 961 тыс м³, при этом было зафиксировано 7 109 отказов, в том числе: по механическому оборудованию 2 995, по электрическому оборудованию – 1 866, по системе смазки – 152, по ожиданию ремонта – 432 и по категории внешние причины – 1 664. Средняя наработка экскаваторов на отказ составила 6,75 тыс м³, а среднее время восстановления 3,46 ч., что, в целом по данной группе экскаваторов обеспечило их готовность к эксплуатации около 66,1%. Структура неплановых простоев по системам ЭКГ приведена в таблице 2.

Таблица 2. Структура неплановых простоев по системам ЭКГ и причинам за период 2017–2019 гг.

№	Категория отказа по группе оборудования	ЭКГ-10
1	Механическое (МО)	54,8%
2	Электрическое (ЭО)	17,5%
3	Система смазки (СС)	0,5%
4	Ожидание ремонта (ОР)	9,3%
5	Внешние причины (ВП)	17,9%

Порядка 54,8% простоев ЭКГ происходит по причине отказа компонентов группы «механическое оборудование». Высокий уровень простоев по группе «ожидание ремонта» обусловлен не проведением ремонтов в ночную смену и отсутствием запасных частей. По группе «внешние причины» наибольшее количество простоев получено в связи с отсутствием электрической энергии внутри участка или от подстанции.

Рейтинг надежности основных групп оборудования ЭКГ и их компонентов представлен ниже:

1. Группа «система смазки» показала самую высокую надежность. Суммарное количество отказов 28 общей продолжительностью 38 часов, МТBF 1 712,89 м/часа, МТTR – 1,35 часа. Функция надежности в переводе на 1 тыс м³ извлеченной из целика горной массы составила 0,999, вероятность безотказной работы составляет 99,9%. Перечень работ по восстановлению системы смазки на обследованных экскаваторах, в основном, сводился к возобновлению подачи смазочной рабочей жидкости в полость насоса, либо, при наличии автоматизированной центральной смазочной системы, возобновлению ее работоспособности (рис. 1, а).

2. Группа «электрическое оборудование». Суммарное количество отказов 969 общей продолжительностью 1 984 часа, МТBF 49,5 м/часа, МТTR – 2,04 часа. Функция надежности в переводе на 1 тыс м³ извлеченной из целика горной массы составила 0,979, вероятность безотказной работы составляет 97,9%. Наибольшее количество отказов по группе зафиксировано в части простоев по наладке электрооборудования и наладке запуска – 643 отказа, время на восстановление работоспособности – 1 083 часа (рис. 1, б).

3. Группа «механическое оборудование» имеет самую высокую аварийность среди систем ЭКГ. Суммарное количество отказов 3 033 общей продолжительностью 9 263 часа, МТBF 15,81 м/часа, МТTR 3.1 часа. Функция надежности в переводе на 1 тыс м³ извлеченной из целика горной массы составила 0,938, вероятность безотказной работы составляет 93,8% (рис. 1, в). Наименее надежными компонентами механической системы являются:

- подгруппа «рабочий орган»: механизм открывания днища ковша, по которому зафиксировано 964 простоя, время на восстановление узла 709 часов;
- подгруппа «механизм подъема»: по упругой муфте подъемной лебедки зафиксировано 444 отказа, время на восстановление работоспособности составило 332 часа.

По результатам анализа надежности основных групп оборудования ЭКГ сформированы следующие выводы:

1. Показатели эксплуатационной надежности канатных экскаваторов разреза «Колыванский» имеют по сравнению с отраслью сравнительно невысокий уровень, что показано в таблице 3. Коэффициенты готовности экскаваторов не превышают среднеотраслевой уровень 85–89%, а вероятность безотказной работы колеблется в диапазоне от 81–94%. Также можно сделать вывод о том, что динамика потерь рабочего времени по причине аварийных простоев увеличивается совместно со сроком службы.

Таблица 3. Коэффициенты готовности и вероятность безотказной работы парка ЭКГ-10 за период 2017–2019 гг.

Гаражный номер экскаватора	Год ввода	Наработка за 2017–2019гг, тыс м ³	Коэффициент готовности, %	Вероятность безотказной работы компоненты на 1 тыс м ³
17	2008	7,9	64	0,88
18	2008	6,6	54	0,81
24	2011	8	71	0,88
25	2012	7,4	73	0,88
29	2014	18,1	86	0,94

Графики функции надежности системы смазки, механической, электрической систем представлены на рисунке 1 (а-в).

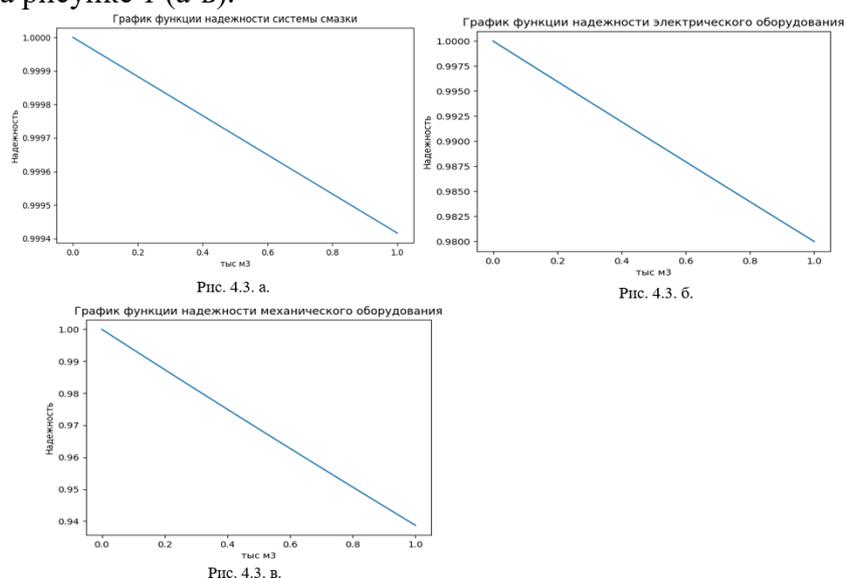


Рис. 1. Графики функции надежности основных систем ЭКГ: а) – система смазки; б) – электрическая система; в) – механическая система

2. По категории «ожидание ремонта» у ЭКГ отмечено суммарное количество отказов 515 общей продолжительностью 6 597 часов. При анализе подгрупп, входящих в данную категорию установлено, что 430 отказов общей продолжительностью 5 458 часов приходится на ожидание ремонта, 85 простоев общей продолжительностью 1 570 часов на отсутствие запасных частей. Результаты анализа надежности ЭКГ, эксплуатируемых в условиях разреза «Кольванский», свидетельствуют о значительном влиянии человеческого фактора на высокий уровень простоев в ожидании ремонта.

3. Средняя стоимость одного часа простоя ЭКГ на его производительность в 2019 году рассчитана исходя из прямых затрат (ФОТ персонала, электроэнергия, амортизация, запасные части) составила для парка ЭКГ-10 – 5 079,23 руб / час. Таким образом, простои по ожиданию ремонта стоили для компании – 7,9 млн руб, простои по отсутствию запасных частей – 4,9 млн руб.

Обсуждение и заключение

1. Высокий уровень простоев в ожидании ремонта ЭКГ обусловлен: «человеческим фактором», а именно: не проведением ремонтов в ночную смену, ожиданием прибытия сервисных организаций, обслуживающих экскаваторы; простоями по причине отсутствия запасных частей. Таким образом, подсистема «человек» влияет на надежность работы и длительность простоев подсистемы «машина».

2. Коэффициенты готовности ЭКГ не превышают среднеотраслевой уровень 85–89%, а вероятность безотказной работы колеблется в диапазоне от 81–94%.

3. Результаты исследования надежности и наработки на отказ основных систем ЭКГ свидетельствуют о высоком уровне неплановых простоев, что приводит к повышению себестоимости работ.

4. Основное влияние на надежность подсистемы «машина» в большей степени оказывает система «человек», чем система «среда». От надежности системы «человек» зависит эффективность использования технологического оборудования. В случае проявления негативных факторов подсистемы «среда» при воздействии на подсистему «машина» от корректности и своевременности действий оператора-машиниста будет зависеть сохранение динамического равновесия подсистемы «машина». Воздействие на «машину» горно-геологических и природных факторов также нивелируется грамотными действиями оператора-машиниста. При анализе отказов экскаваторов выявлялось множество факторов, при которых происходили аварийные остановки экскаваторов, в том числе разрушение металлических конструкций по причине некорректных действий оператора-машиниста.

Литература

1. Шибанов Д.А., Шишляников Д.И., Иванова П.В., Иванов С.Л. Комплексная оценка факторов, определяющих наработку экскаваторов ЭКГ новой продуктовой линейки производства «ИЗ-КАРТЭКС» // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 9 (118). С. 3–9.
2. Асонов С.А., Габов В.В., Иванов С.Л., Трифанов М.Г., Чекмасов Н.В., Шишляников Д.И. Информационно-диагностические средства объективного контроля как инструмент повышения эффективности эксплуатации добычных горных машин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 14. – С. 62–71.
3. ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартинформ, 2016 год. 22 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200136419>
4. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виноцкий К.Е., Мельников Н.Н. Справочник. Открытые горные работы. М.: Горное бюро, 1994. 590 с.
5. Москвичев В.В., Ковалев М.А. Исследование показателей надежности основных групп оборудования карьерных гидравлических экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2021. № 7. С. 96–112.

DOI: 10.24412/c1-37269-2024-1-303-307

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛКП ПОСЛЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ 8 И 13 ЛЕТ

Коваль Т.В., Старцев О.В., Двирная Е.В.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, г. Москва

medvedevim@viam.ru

Исследованы декоративные характеристики ЛКП после длительного климатического старения в открытой атмосфере умеренно теплого климата с мягкой зимой. Проведен анализ рельефа поверхности защитных покрытий, нанесенных на углепластик КМКУ-2м.120. С помощью метода динамического механического анализа определили температуру стеклования фторэпоксидного ВЭ-46 и акрилстирольного АС-1115 покрытий, нанесенных на углепластик КМКУ-2м.120.

Углепластики – наиболее распространенные полимерные композитные материалы (ПКМ), которые применяются в авиастроении [1]. Современные углепластики получили широкое применение не только за высокие физико-механические показатели, но и за высокую химическую стойкость в различных агрессивных средах [2]. Однако углепластики также подвержены необратимым процессам разрушения под действием климатических факторов. Значительное влияние на ПКМ в процессе длительной натурной экспозиции оказывают следующие

щие климатические факторы: влажность воздуха, атмосферные осадки, температура, солнечная радиация и др. Самый простой способ защиты полимерных композиционных материалов является нанесение лакокрасочного покрытия на их поверхность.

В работе для исследований использовали пластины углепластика из клеевого препрега КМКУ-2м.120 [3]. Исследуемые пластины полимерного композиционного материала состояли из 23 слоев с укладкой [0,90], общая толщина пластин 3,3 мм.

На исследуемые пластины углепластика КМКУ-2м.120 было нанесено две разные системы ЛКП, состоящие из фторэпоксидной и акрилстирольной эмалей, нанесенными на поверхность слоя эпоксидной грунтовки ЭП-0104. Толщина ЛКП составляла 95 ± 5 мкм. Натурная экспозиция проходила в условиях приморской атмосферы в Геленджикском центре климатических испытаний – филиале НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Образцы располагали на открытых атмосферных стендах лицевой стороной к югу.

Оценку состояния покрытия после длительного климатического старения на лицевой и оборотной сторонах проводили с применением методов колориметрии, профилометрии и динамического механического анализа.

Было использовано 9 вариантов ЛКП, цвет которых представлен в таблице 1.

Таблица 1. Внешний вид лицевой и обратной сторон фторэпоксидного покрытия ВЭ-46 и акрилстирольного покрытия АС-1115 на поверхности углепластика КМКУ-2м.120 перед началом ДМА измерений

Маркировка образца	Продолжение экспозиции	Цвет нанесенной эмали	Фотоснимки лицевой стороны ЛКП	Фотоснимки оборотной стороны ЛКП
Покрытие ВЭ-46				
Г1	13	светло-серый		
Г2	8	серо-голубой		
Г3	8	изумрудный		
Г4	13	голубой		
Г5	13	темно-зеленый		
Г6	6	красный*		
Покрытие АС-1115				
Г7	13	оранжевый		
Г8	8	желтый		
Г9	8	синий		

*на лицевой стороне образца углепластика красная эмаль (Г6) полностью разрушилась, на оборотной стороне остался слой эпоксидного грунта

Изменение цветового расстояния оценивали с помощью спектрофотометра по ГОСТ Р 52490-2005 (ИСО 7724-3:1984) после 1, 2, 3, 5, 8, 13 лет натурной экспозиции.

Динамический механический анализ, образцов углепластика с защитным покрытием после натурной экспозиции, проводили при частоте 1 Гц со скоростью нагрева $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур от 20°C до 230°C . Измерения проводили по трем параллельным образцам. Температуру стеклования защитного покрытия определяли по положению максимума температурной кривой модуля потерь $E''(T)$.

Рельф поверхности состаренного ЛКП оценивали методом профилометрии с помощью 3D сканирующего микроскопа в соответствии с ГОСТ 2789. Измерения проводили по 10 параллельным профилограммам из соседних участков поверхности.

После воздействия климатических факторов в течение 8–13 лет цветовое расстояние ΔE^* показывает стабильность внешнего вида фторэпоксидного покрытия. Как видно из таблицы 2 и 3 образцы с маркировкой Г1, Г3 и Г5 эмали ВЭ-46 остаются практически неизменным как на лицевой, так и на обратной сторонах.

Таблица 2. Цветовое различие ЛКП на лицевой стороне плит после различной продолжительности натурального экспонирования

Маркировка и цвет плиты		Полное цветовое различие ΔE , усл. ед. после натурной экспозиции в течение (год)						
Шифр	Цвет	1	2	3	4*	5	8	13
Г1	светло-серый	0,49	5,6	5,5	5	5,4	4,9	4,9
Г2	серо-голубой	19	6,6	13	5	8,4	8,9	–
Г3	изумрудный	3,3	2,6	3,4	5	3,5	3,0	–
Г4	голубой	5,4	4,8	5,1	6	5,9	12	20
Г5	темно-зеленый	2,1	1,6	1,6	2	5,9	2,5	1,0
Г6	красный	15	15	Полное разрушение эмали и грунта				
Г7	оранжевый	19	19	20	24	19	18	15
Г8	желтый	13	14	12	12	14	Частичное удаление	
Г9	синий	1,6	2,7	2,9	3	5,2	10	–

* Значения цветового расстояния за 1,2,3,4,5 лет экспозиции приведены в работе [4]

Таблица 3. Цветовое различие ЛКП на обратной стороне плит после различной продолжительности натурального экспонирования

Шифр и цвет плиты		Полное цветовое различие ΔE , усл. ед. после натурной экспозиции в течение (год)			
Шифр	Цвет	4*	5	8	13
Г1	светло-серый	5	5,1	5,0	5,3
Г2	серо-голубой	3	5,3	11	–
Г3	изумрудный	3	2,7	3,4	–
Г4	голубой	2	2,5	6,5	4,6
Г5	темно-зеленый	2	1,8	2,8	1,5
Г6	красный	7	Полное разрушение эмали и частично разрушенный слой грунта		
Г7	оранжевый	12	11	9	21
Г8	желтый	16	16	Частичное удаление эмали	
Г9	синий	3	52,3	11	–

* Значения цветового расстояния за 1,2,3,4,5 лет экспозиции приведены в работе [4]

По полученным данным видно, что под действием атмосферных факторов в процессе проведения длительной натурной экспозиции наиболее уязвимыми к процессам фотохимической активности оказались образцы с маркировкой Г6 (красная эмаль ВЭ-46) и Г8 (желтая эмаль АС-1115). Воздействие солнечной радиации вызвало фотохимическую деструкцию этих покрытий, связанную с сильной фотохимической активностью пигмента, входящего в полимерную матрицу защитного покрытия.

Анализ шероховатости поверхности дополнил сведения о состоянии покрытий после длительного климатического старения. После 13 лет атмосферного воздействия покрытие светло-серого цвета (образец Г1) остается гладким. Его среднее расстояние между наибольшими выступами и впадинами R_z равно 16 мкм. Эмаль красного цвета (образец Г6) после 5 лет экспонирования полностью разрушилась (таблица 1), вследствие чего значения R_z профиля сильно увеличились из-за неровностей оголившимся волокон на поверхности углепластика. Результаты шероховатости поверхности пластин Г1-Г9 представлены в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики рельефа поверхности углепластика КМКУ-2м.120, защищенного покрытиями ВЭ-46 и АС-1115

Шифр плиты	ЛКП	Срок экспозиции	Цвет	Лицевая сторона	Обратная сторона
				Характеристики рельефа, мкм	
				R_z	R_z
Г1	ВЭ-46	13	светло-серый	16,0	18,6
Г2		8	серо-голубой	23,2	4,0
Г3		8	изумрудный	20,0	20,8
Г4		13	голубой	22,2	22,6
Г5		13	темно-зеленый	22,2	22,2
Г6		8	красный	41,2	19,5
Г7	АС-1115	13	оранжевый	21,0	21,6
Г8		8	желтый	33,6	25,9
Г9		8	синий	26,4	16,6

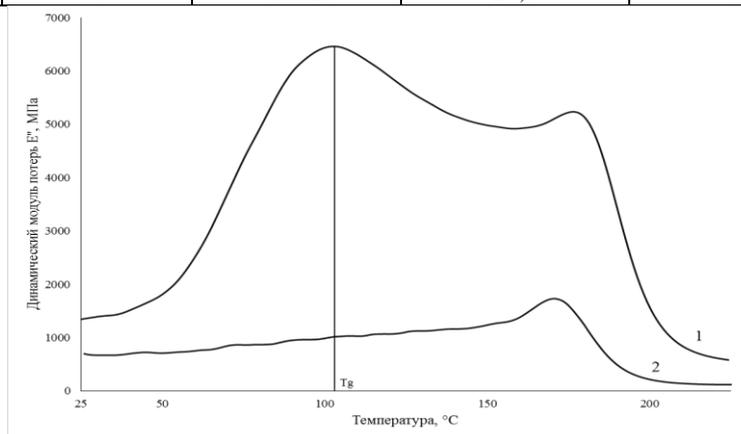


Рис. Температурные зависимости динамического модуля потерь, высушенных образцов из пластины Г7 с покрытием АС-1115 (1) и после удаления ЛКП (2)

Результаты, полученные с помощью динамического механического анализа, показали общие закономерности старения ЛКП на поверхности углепластика. На рисунке показана температурная зависимость динамического модуля потерь $E''(T)$ образцов, вырезанных из пластины Г7 (эмаль АС-115) после 13 лет климатического старения.

Показан релаксационный переход покрытия марки АС-1115 из стеклообразного состояния в высокоэластическое в интервале температур от 50 до 130 °С. Температура стеклования T_g акрилстерольного покрытия, определенная по максимуму пика модуля потерь $E''(T)$, составляет 90 ± 2 °С (кривая 1). Такой пик (кривая 2) отсутствует на аналогичной зависимости в случае удаления покрытия с поверхности углепластика.

Проведенные исследования образцов углепластика с защитными покрытиями после длительного климатического старения позволяют получить новую информацию о старении органических покрытий, защищающих полимерные композиционные материалы. Методы колориметрии, профилометрии и динамического механического анализа обладают высокой чувствительностью к деградационным процессам ПКМ, протекающих в процессе климатического воздействия.

Данная работа финансировалась за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009.

Литература

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. 2023. 520 с.
2. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). С.122–144.

3. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ. 2016. № 8(44). С. 52–59.

4. Старцев В.О., Фролов А.С. Влияние климатического воздействия на цветовые характеристики лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2015. № 3. С. 16–18.

DOI: 10.24412/ci-37269-2024-1-307-310

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДЕКОРАТИВНЫХ СВОЙСТВ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭКСПОНИРОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

Коган А.М., Старцев В.О.

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
г. Москва

alekseikogan@yandex.ru

В исследовании представлены результаты испытаний лакокрасочных покрытий, которые широко применяются для окраски воздушного транспорта, в трех различных климатических зонах земного шара в течение двух лет. Оценены изменения декоративных свойств и степень адгезии покрытий в зависимости от времени экспозиции на открытом воздухе. Представлена математическая модель, которая с большой точностью прогнозирует изменения декоративных свойств образцов в зависимости от времени экспозиции в конкретном регионе.

Авиационная промышленность – это один из наиболее высоких и требовательных секторов, где надежность и долговечность материалов имеют решающее значение [1–2]. В условиях экстремальных нагрузок и сложных климатических условий, которые могут варьироваться от холодных высот до жарких солнечных экваториальных регионов, материалы, используемые в авиации, должны продемонстрировать непревзойденную стойкость [3]. Одним из ключевых аспектов обеспечения долговечности и надежности авиационных конструкций является использование лакокрасочных покрытий, которые играют критическую роль в защите конструктивных элементов от воздействия внешней среды.

Лакокрасочные покрытия также выполняют декоративные функции, а в случае военной техники – защищают от специальных факторов и уменьшают видимость в различных диапазонах длин волн [4–6].

Для авиационной промышленности лакокрасочные покрытия выполняют ряд важнейших функций: защиту от коррозии, механических повреждений, а также декоративное оформление. Однако, для обеспечения их эффективной работы на протяжении всего срока эксплуатации, необходимо проводить климатические испытания для сбора информации о стойкости покрытий в конкретном регионе [7].

Для решения этой проблемы, в рамках российско-иранского гранта РФФИ, были проведены исследования влияния трех климатических зон на декоративные свойства лакокрасочных покрытий.

Для исследования воздействия климатических факторов на свойства ЛКП в условиях сухого субтропического, умеренного и умеренно-теплого климата было изготовлено 252 шт. образцов – по 21 шт. каждого типа и цвета для конкретного климата. В качестве основы был выбран лист алюминиевого деформируемого сплава Д16АЧ размером 3000×1200×1 мм, из которого методом гидроабразивной резки были нарезаны образцы размером 150×75×1 мм с дальнейшим серноокислотным оксидированием и наполнением в хромпике.

В таблице 1 представлены группы образцов после покраски и их маркировка. С периодичностью раз в три месяца проводился съем партии образцов, включающей в себя 8 шт. (2 шт. каждого типа и цвета), с дальнейшим определением параметров цвета и адгезии. Ежедневно на протяжении 24 месяцев фиксировалось изменение цвета 3-х образцов каждого типа и цвета относительно их исходного состояния.

Таблица 1. Маркировка образцов на испытания

Тип эмали	Цвет пигмента	Маркировка образцов / Климат		
		Сухой субтропический, г. Йезд, Иран	Умеренный, г. Москва, РФ	Умеренно-теплый, г. Геленджик, РФ
ВЭ-69	Красный	6 ÷ 26	48 ÷ 68	72 ÷ 92
ВЭ-69	Серый	181 ÷ 201	223 ÷ 243	244 ÷ 264
ЭП-140	Красный	356 ÷ 376	398 ÷ 418	419 ÷ 439
ЭП-140	Серый	531 ÷ 551	573 ÷ 593	594 ÷ 614

Цветовые характеристики покрытий оценивали в соответствии с ГОСТ 52490-2005. С помощью устройства режущего инструмента и липкой ленты определяли адгезию лакокрасочных покрытий к окрашиваемой поверхности по ГОСТ 31149-2014.

Графики изменения цвета лицевой поверхности образцов в умеренном, умеренно-теплом и сухом субтропическом климате в течение 24 месяцев имеют вид, представленный на рисунках 1–3.

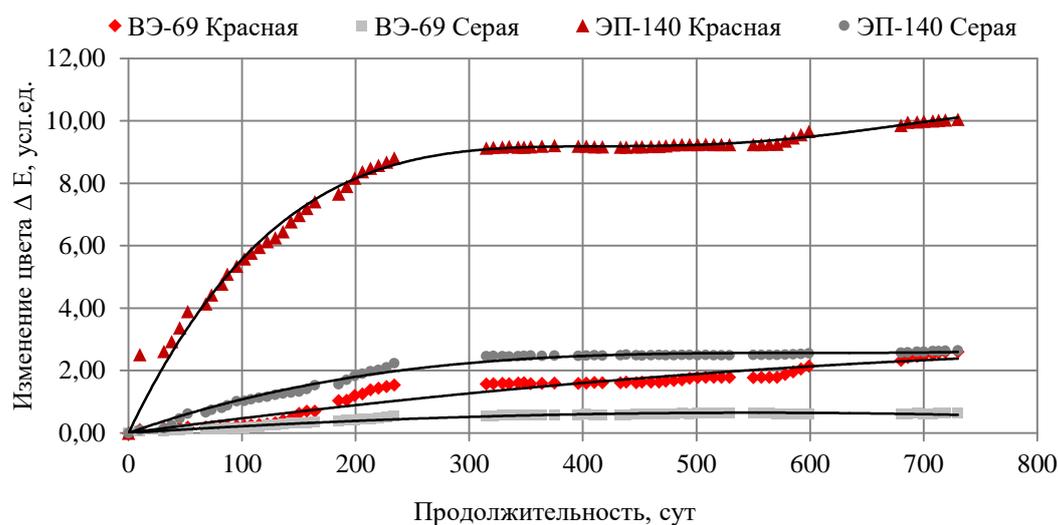


Рис. 1. Изменение цвета лицевой поверхности образцов при натурном экспонировании в умеренном климате Москвы в течение 24 месяцев

Наибольшее цветовое различие в умеренном и умеренно-теплом климате наблюдается у образца с покрытием марки ЭП-140 красного цвета и составляет 10,05 и 11,48 усл. ед. соответственно. Далее по убыванию цветового различия следует образец с покрытием марки ЭП-140 серого цвета, ВЭ-69 красного цвета и ВЭ-69 серого цвета.

Изменение цвета покрытий в Москве менее выражено, чем в Геленджике, из-за различий в климате и уровне солнечного излучения. Зимой снег в Москве защищает поверхности от прямого солнечного излучения, отражая большую часть УФ-лучей. В Геленджике, расположенном ближе к экватору, солнечное излучение более интенсивное и продолжительное, а дни длиннее, что увеличивает время воздействия солнечных лучей.

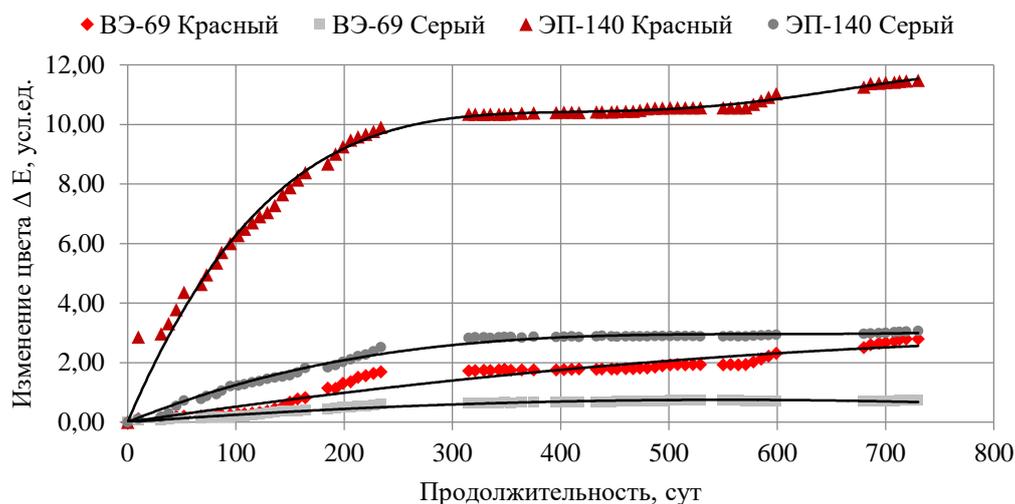


Рис. 2. Изменение цвета лицевой поверхности образцов при натурном экспонировании в умеренно-теплом климате Геленджика в течение 24 месяцев

Большая часть территории Ирана находится в засушливом и ультразасушливом климате. Исследуемая сухая зона без влажных месяцев считается идеальным примером засушливого субтропического климата. Стенды были установлены с наклоном около 17 градусов к югу от Аравии из-за географического положения Йездского университета для поглощения наибольшего солнечного излучения.

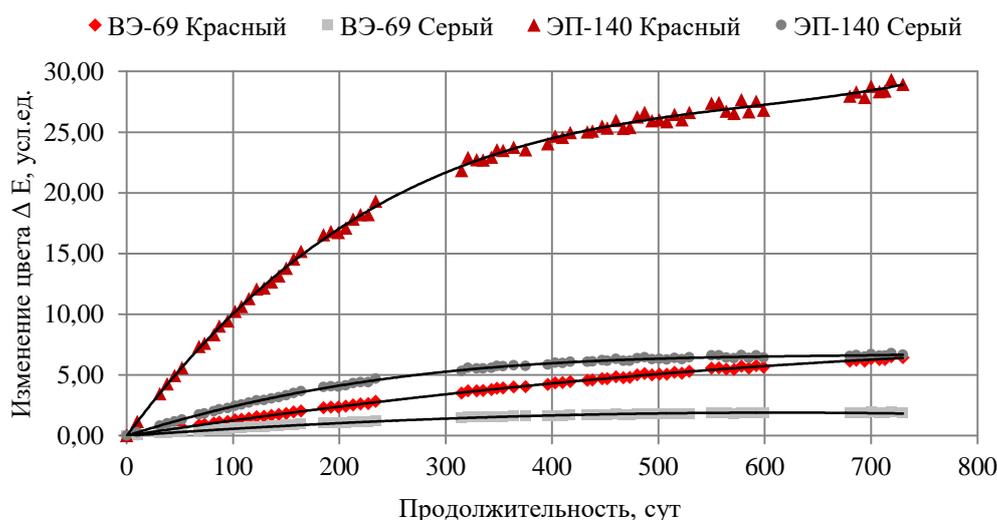


Рис. 3. Изменение цвета лицевой поверхности образцов при натурном экспонировании в сухом субтропическом климате Йезда в течение 24 месяцев

Эрозией поверхности из-за абразивного действия песка, высокий уровень солнечной радиации, частые песчаные бури и редкие осадки вызывают более выраженное изменение цвета покрытий в Йезде, которое на 150 – 200% больше, чем в Геленджике и Москве.

В ходе исследования была разработана математическая модель (1), которая точно описывает изменение цвета образцов при экспонировании в различных климатических зонах. Модель основана на том, что скорость изменения цвета уменьшается со временем и приближается к максимальному предельному значению. Коэффициент детерминации, полученный после обработки данных, составил от 0,95 до 0,98 для всех трех регионов, доказывая, что модель адекватно описывает процессы изменения цвета и может использоваться для прогнозирования долгосрочных эффектов воздействия окружающей среды на декоративные свойства покрытия.

$$\Delta E = E_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}) \quad (1)$$

где E – изменение цвета, t – время экспозиции, E_{max} – максимально возможное изменение цвета, α – параметр, характеризующий срок достижения $0,632\Delta E_{max}$, сут.

Натурные испытания показали, что климатические особенности каждой из исследованных зон оказывают влияние на скорость и характер изменения цветовых характеристик ЛКП. Адгезия лакокрасочных покрытий сохранялась на высоком уровне (0 баллов отслоения) в течение всего периода экспонирования. Это свидетельствует о высокой устойчивости покрытий в данных климатических условиях и их способности сохранять прочное сцепление с поверхностью. Результаты исследований важны для создания новых лакокрасочных материалов, способных устойчиво работать в экстремальных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-53-56009.

Литература

1. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. в 5 т. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
2. Рейбман А.И. Защитные лакокрасочные покрытия. Л.: Химия, 1982. 320 с.
3. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
5. Лакокрасочные покрытия. История авиационного материаловедения: ВИАМ –75 лет поиска, творчества, открытий/под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 326 с.
6. Каблов Е.Н., Семенова Л.В., Еськов А.А., Лебедева Т.А. Комплексные системы лакокрасочных покрытий для защиты металлических полимерных композиционных материалов, а также их контактных соединений от воздействия агрессивных факторов // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 6. С. 32–35.
7. Семенова Л.В., Новикова Т.А., Нефедов Н.И. Климатическая стойкость и старение лакокрасочного покрытия // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S3. С. 31–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S3-31-34.

ПРОЧНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЯКУТСКЕ

Копырин М.М.¹, Старцев О.В.², Лебедев М.П.¹

¹ Федеральный исследовательский центр «ЯНЦ СО РАН», г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, г. Якутск

mkopyrin91@gmail.com

В ходе испытаний на изгиб было оценено влияние времени разрушения, скорости деформирования и предварительных воздействий (экспонирование при отрицательных температурах и циклы «влажонасыщение – замораживание») на прочностные характеристики образцов углепластика. Результаты испытаний показывают, что структура материала может значительно изменяться после циклов «влажонасыщение – замораживание», а также что непрерывное экспонирование при отрицательной температуре практически не влияет на характеристики материала, в то время как режим «влажонасыщение – замораживание» снижает все характеристики материала.

Углепластик является одним из самых прочных и устойчивых материалов [1]. Несмотря на это, влияние агрессивных климатических факторов (таких как экстремальная температура, высокая влажность, УФ-радиация, механические нагрузки, нагруженность и пр.) приводит к старению и разрушению материала.

На территории города Якутска среднегодовой показатель температуры равняется примерно -10°C . В зимний сезон температура опускается еще ниже, вплоть до -64°C [2]. Внутренние напряжения, вызванные таким диапазоном колебания температуры, обусловлены различием показателей коэффициента линейного термического расширения полимерной матрицы и армирующего волокна [3, 4]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые были подвержены воздействию окружающей среды, впитывают влагу. При понижении температуры вода превращается в лёд и увеличивается в объёме. Это может привести к возникновению внутренних напряжений, микрорастрескиванию и снижению прочности материала при межслоевом сдвиге. [5]. Суточные и сезонные колебания температур при натурном термоциклировании ускоряют образование микротрещин, так как увеличивается количество макроповреждений в объёме матрицы или на границе раздела фаз с армирующим волокном [6].

Эти напряжения значительно влияют на механические свойства материалов, изменяя их прочность и срок службы. Поэтому важно проводить эксперименты, тщательно обрабатывать данные и правильно их интерпретировать, чтобы глубоко понять поведение полимерных композиционных материалов в работе. Только так можно создать точные модели и прогнозы для обеспечения надёжности и безопасности техники, особенно в экстремальных климатических условиях.

Климатические факторы в основном влияют на поверхностные слои ПКМ. Воздействие различается в зависимости от стороны, которая подвергается солнечной радиации. [7].

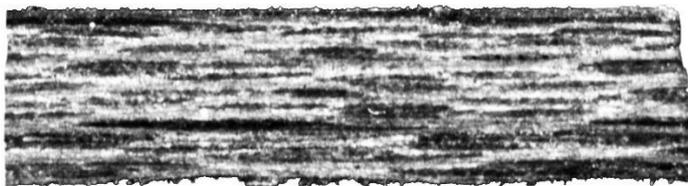


Рис. 1. Вид поперечного разреза пластины при увеличении $\times 16$

Для изучения влияния климатических факторов на долговечность ПКМ были взяты три пластины препрега углепластика, состоящего из 12 слоёв углеткани марки АСМ С200Т с саржевым плетением. В качестве связующего материала использовалась эпоксидная смола марки АСМ 102. Раз-

меры пластин составляли 200х300 мм, толщина – 2,6–2,7 мм.

Основные характеристики монослоя препрега АСМ 102-С200Т представлены в таблице 1. На рисунке 1 изображено поперечное сечение пластины по направлению утка.

Таблица 1. Основные характеристики препрега АСМ 102-С200Т

Наименование показателя	Единицы измерения	Значение
1 Плотность углепластика	г/см ³	1,56 ± 0,10
2 Массовая доля связующего	%	38 ± 3
3 Толщина монослоя	мм	0,20–0,21 ± 0,02
4 Модуль упругости при растяжении в направлении основы при температуре 20°C, не менее	ГПа	65–70
5 Предел прочности при растяжении в направлении основы при температуре 20°C, не менее	МПа	750–850
6 Предел прочности при сдвиге, не менее	МПа	75–80
7 Время гелеобразования связующего в препреге при температуре (110 ± 2)°C	мин	60–120
8 Температура стеклования полимерной матрицы, не менее	°C	150

Углепластик АСМ 102-С200Т – конструкционный материал, который используют в экстремальных климатических условиях, например в Арктическом регионе [8]. Прочность на растяжение составляет 850 МПа, модуль упругости – 70 ГПа. Предел прочности при сдвиге – 80 МПа, температура стеклования – не более 150 °C.

Исследовали образцы из трёх одинаковых пластин углепластика. Первую использовали для определения исходных механических показателей материала. Вторую 30 дней экспонировали в Якутске при внешней температуре от –11 до –44 °C. Третью за тот же период подвергали циклам «влагонасыщение – замораживание»: ночью выдерживали в воде при 60 °C, днём – на открытом атмосферном стенде. За это время третья пластина сорбировала 0,68% воды, которая была локализована в поверхностных слоях.

Для оценки прочностных характеристик будем использовать параметр прочности P_{st} :

$$P_{st} = |\sigma_{max}| / (U_0 - U_i), \quad (1)$$

где $|\sigma_{max}|$ – максимальные напряжения сжатия, которые были достигнуты при нагружении в каждом опыте, U_i – энергия активации процесса разрушения, которая была вычислена для каждого случая нагружения путём приведения времени разрушения к максимальным напряжениям через интеграл от скорости разрушения по времени при непрерывно меняющихся напряжениях.

По три образца каждой пластины испытывали на продольный изгиб с постоянными скоростями перемещения подвижной опоры: 1 мм/с, 0,1 мм/с и 0,01 мм/с.

В таблице 2 приведены полученные результаты: время нагружения до излома образцов t_o , эквивалентное время разрушения τ_{eq} , приведённое к максимальным напряжениям в опытах, и максимальные значения напряжений сжатия $|\sigma_{max}|$, которые в этих опытах достигались. Для сравнения приведены также напряжения окончания процесса разрушения в каждом опыте $|\sigma_0|$ без учёта изменения прогиба образца в этот момент.

Таблица 2. Характеристики прочности образцов, изготовленных из пластин 1, 2 и 3, нагружавшихся продольным изгибом с различными скоростями деформирования

Образец	Скорость деформирования, мм/с	t_o , с	τ_{eq} , с	$ \sigma_{max} $, МПа	$ \sigma_0 $, МПа	P_{st} , МПа моль/кДж
1.1	0,1	855,5	61,10	952,5	735,6	13,17
1.2	1	36,8	2,798	923,6	680,9	11,57
1.3	0,01	3637,6	298,7	918,3	666,0	13,41
2.1	0,1	385,0	30,37	952,1	952,1	12,86
2.2	1	39,3	3,268	940,1	267,7	11,83
2.3	0,01	3891,9	377,9	946,1	942,6	13,94
3.1	0,1	295,4	27,57	783,8	647,6	10,55
3.2	1	27,0	1,769	751,4	751,4	9,282
3.3	0,01	3103,3	232,9	835,7	810,3	12,10

На рисунке 2 отображена зависимость прочности и максимальных напряжений, полученных в ходе каждого эксперимента, от времени разрушения. Абсцисса представлена в логарифмическом масштабе, поскольку долговечность экспоненциально коррелирует с напряжениями.

Сплошные линии на графике соответствуют исходному состоянию материала (пластина 1), штриховые – результатам испытаний после выдержки при отрицательных температурах на полигоне (пластина 2), пунктирные – испытаниям после 30 циклов влагонасыщения и замораживания (пластина 3).

В случае если структура материала остаётся стабильной, то при увеличении времени разрушения (или нагружения) ожидается снижение напряжений излома образца. Для образцов, находящихся в исходном состоянии материала, наблюдается небольшое уменьшение напряжений (прямая 1).

Однако это изменение не существенно, так как параметр прочности возрастает (прямая 2).

Для образцов после выдержки при отрицательных температурах характерно более значительное увеличение параметра прочности (прямая 4), что приводит к небольшому росту напряжений излома (прямая 3). У образцов после циклов «влагонасыщение – замораживание» рост напряжений более заметен (прямые 5 и 6). Тем не менее низкие прочностные характеристики этих образцов не позволяют достичь высоких напряжений за то же время, поэтому разрушение происходит раньше.

Испытания образцов 2.1–2.3 (табл. 2, рис. 2) показали, что их свойства близки к свойствам исходного состояния при всех трёх скоростях деформирования как по параметру прочности, так и по максимальным напряжениям при разрушении. Образцы, которые непрерывно экспонировались на открытой климатической площадке, имеют незначительное преимущество.

Наиболее сильные изменения претерпела структура образцов, которые 30 раз переходили через температуру кристаллизации воды. Их прочностные характеристики в большей степени зависят от времени нагружения, особенно по параметру прочности.

Для образцов всех трёх пластин при всех скоростях деформирования были получены следующие средние значения максимумов жёсткости: пластина 1 – 94,25 ГПа, пластина 2 – 93,48 ГПа и пластина 3 – 90,12 ГПа. Образцы пластины 2 имеют наименьший разброс по этой характеристике, а образцы пластины 3 демонстрируют наименьшее значение R_{max} . Таким образом, непрерывное экспонирование при отрицательной температуре практически не влияет на характеристики материала, в том числе на его жёсткость. В то же время режим «влагонасыщение – замораживание» снижает все характеристики материала.

Использование метода испытаний продольным изгибом с различными видами нагружения позволяет получить разносторонние данные о поведении материала, свойства которого меняются преимущественно в приповерхностных слоях композита.

Непродолжительное воздействие отрицательных температур в условиях экстремально холодного климата Якутска не оказывает заметного влияния на прочностные характеристики материала, определяющие его долговечность. В то же время периодические переходы через температуру кристаллизации воды, несмотря на её незначительное содержание в композите, существенно сокращают срок службы конструкции.

Литература

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. Николаев Е. В., Барботько С. Л., Андреева Н. П., Павлов М. Р., Гращенков Д. В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его

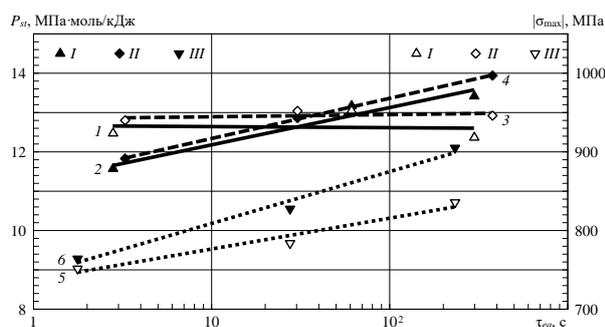


Рис. 2. Зависимости прочностных характеристик материала до и после климатических испытаний от времени разрушения при деформировании образцов продольным изгибом с различными скоростями: I – образцы материала в исходном состоянии, II – образцы после непрерывного пребывания при отрицательных температурах, III – образцы после 30 термоциклов влагонасыщения – замораживания

основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ. 2016. № 6. С. 93–108.

3. Lord H. W., Dutta P. K. On the design of polymeric composite structures for cold regions applications // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1988. V. 7. P. 435–458.

4. Dutta P. K., Hui D. Low-temperature and freeze-thaw durability of thick composites // Composites. Part B. 1996. V. 27. P. 371–379.

5. Lebedev M. P., Startsev O. V., Kychkin A. K. Development of climatic tests of polymer materials for extreme operating conditions // Procedia Structural Integrity. 2019. V. 20. P. 81–86.

6. Старцев О. В., Лебедев М. П., Кычкин А. К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1. С. 41–51.

7. Старцев В. О., Валева Е. О., Гуляев А. И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 64–76.

8. Коган Д. И., Чурсова Л. В., Панина Н. Н., Гребнева Т. А., Голиков Е. И., Шарова И. А., Баторова Ю. А. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 52–54. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-52-54.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-314-317

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МОДУЛЬ СДВИГА В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА ОБРАЗЦОВ ПКМ

Корниенко Г. В., Старцев О. В., Гладких А. В.

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, 105005, Россия

medvedevim@viam.ru

В данной работе представлены результаты изменения массы и модуля сдвига в плоскости листа образцов полимерных композиционных материалов в ходе экспозиции на открытой площадке Геленджикского центра климатических испытаний Всероссийского института авиационных материалов им. Г. В. Акимова – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Был проведен анализ влияния таких метеорологических параметров, как ветер и осадки, на значение массы и модуля сдвига.

Введение. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще используются в различных областях [1]. Использование конструкций, изготовленных на основе армированных полимерных материалов, таких как углепластики (УП), стеклопластики (СП) и базальтопластики (БП), приводит к снижению их массы и повышению прочностных характеристик [2]. В частности, в авиастроении снижение массы за счет замены металлических деталей на детали на основе ПКМ приводит к большей грузоподъемности летательных аппаратов, а также к снижению расхода топлива без потери прочности [3, 4]. Однако в ходе эксплуатации ПКМ наблюдается неизбежное снижение механических свойств [5–7]. Помимо ускоренных климатических испытаний [8–11] неотъемлемой частью паспортизации новых ПКМ являются натурные испытания на климатических площадках, например, в условиях экстремально холодного климата г. Якутск [12, 13] или в условиях умеренно теплого климата г. Геленджика [7, 14]. Испытания на открытых климатических площадках позволяют оценить скорость снижения характеристик ПКМ в реальных условиях. Чаще всего испытания новых материалов представляют из себя длительную экспозицию с промежуточным съемом для оценки механических свойств. Например, в работе [15] приведены результаты испытаний на сжатие УП марки ВКУ-38ЖН для исходных образцов, а также после экспозиции в г. Геленджике через 3 года и 5 лет, при этом прочность при сжатии составила 670, 540 и 520 МПа соответственно.

Основным фактором, осложняющим построение подобных зависимостей деградации механических характеристик от времени экспозиции на открытых площадках, является высокая флуктуация свойств в ПКМ [5]. Ввиду неоднородности данных материалов им свойственно непостоянство механических свойств от образца к образцу. Одним из преимуществ метода кручения [16] для определения модуля сдвига в плоскости листа (G_{12}) является возможность испытывать одни и те же образцы без разрушения, так как метод предполагает использование незначительных нагрузок [17]. Отдельный интерес вызывает ежедневное изучение механических свойств в ходе экспозиции. Такие исследования позволяют более детально изучить процессы, протекающие в ПКМ в ходе экспозиции, а также оценить вклад отдельных метеопараметров на состояние материалов. Как уже говорилось ранее, процесс, вызывающий резкое изменение механических свойств во время экспозиции, – увлажнение, протекающее за счет повышенной влажности или осадков. Средняя относительная влажность на территории Геленджикского центра климатических испытаний Всероссийского института авиационных материалов им. Г. В. Акимова – НИЦ «Курчатовский институт»- ВИАМ (ГЦКИ) составляет 70%, а суммарное количество осадков – 629 мм, данные условия являются удачными для изучения пластифицирующего действия влаги в реальных условиях.

Материалы и методы. В качестве исследуемых ПКМ выбраны СП ВПС-48/7781 и УП КМКУ-3м.150 и ВКУ-39, прошедшие предварительную экспозицию на открытой площадке ГЦКИ длительностью 7 лет. Выбор пластин ПКМ для наших неразрушающих испытаний после длительной экспозиции обусловлен тем, что ПКМ за длительное время климатического воздействия перешли в стабильное состояние [18], и изменение их деформационные показатели должно зависеть от количества сорбированной влаги в поверхностных слоях. СП ВПС-48/7781 на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 [19] – конструкционный материал, пригодный для изготовления средненагруженных элементов конструкций. Клеевой препрег КМКУ-3м.150 – на основе однонаправленной ленты фирмы Porcher [20]. УП ВКУ-39 – на основе того же эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани [19].

После 7-летней предварительной экспозиции плит со стороной 300 мм было изготовлено по 4 образца со сторонами $134 \pm 0,5$ мм, которые были выставлены обратно на открытую площадку под углом 45° . Регулярно образцы снимали и измеряли их массу с погрешностью 0,1 мг и показатель G_{12} . Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 33843-2016 [16], для этого образец располагали по диагонали углами на нижней опоре, после чего прикладывали нагрузку с помощью перпендикулярно расположенной верхней опоры на углы другой диагонали. В результате получали диаграмму зависимости нагружения от деформации, на начальном участке которой определяли показатель G_{12} .

Результаты и обсуждение

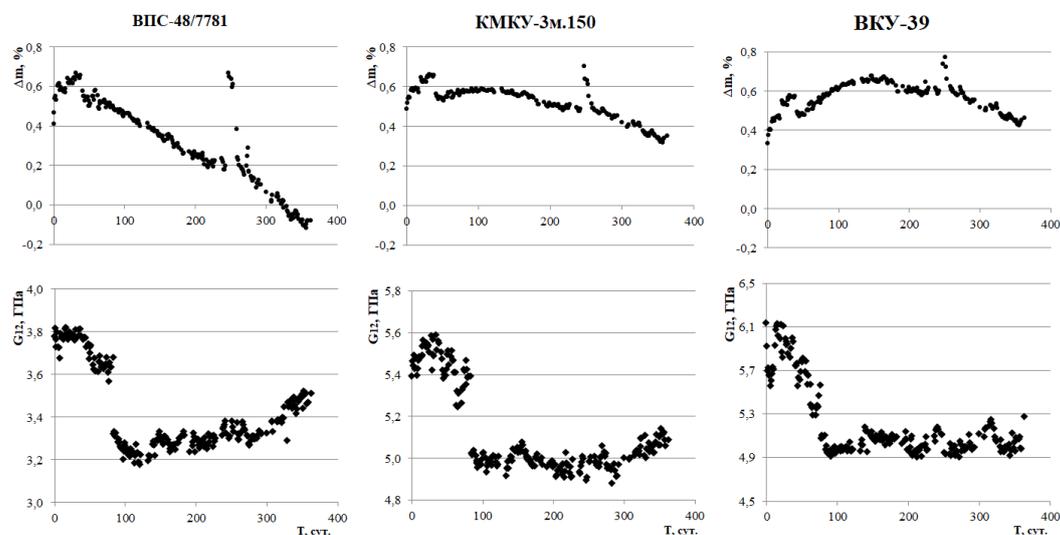


Рис. 1. Изменение влагосодержания и модуля сдвига для образцов ВПС-48/7781, КМКУ-3м.150, ВКУ-39 в ходе экспозиции на открытой площадке ГЦКИ

Результаты, полученные в ходе регулярного измерения массы и G_{12} в течение почти одного года 29.08.2024 – 26.08.2024, представлены на диаграммах (рис. 1). На графиках изменения массы на участке, который соответствует осенне-зимнему периоду дождей (~ 50–150 сут.) наблюдается следующая закономерность: рост массы ВКУ-39, менее заметный рост для образцов КМКУ-3м.150 и постепенная потеря массы для образцов ВПС-48/7781. Данное явление связано с разным состоянием материалов. Таким образом, уменьшение массы ВПС-48 в первую очередь связано с потерей частиц поврежденных внешних слоев. В то же время наблюдается постепенное снижение показателя G_{12} , что связано с пластифицирующим действием влаги. Дальнейший период характеризуется постепенной потерей массы, причем масса образцов УП КМКУ-3м и СП ВПС-48/7781 опустилась ниже исходного значения, что подтверждает продолжение деструкции образца. Значение G_{12} в это время постепенно увеличивалось для всех материалов, однако, наибольший рост демонстрируют образцы ВПС-48/7781.

На графиках изменения массы наблюдаются резкие скачки, несвязанные с увлажнением, например, в точках 20, 247, 272, 323 и 363 суток. Примечательно, что во время данных скачков массы не наблюдается падения модуля сдвига. Более того, в некоторых точках наблюдается рост показателя G_{12} . Анализ метеоданных показал, что в данные дни наблюдались сильные ветры (>15 м/с) со стороны Геленджикской бухты, а скачки масс соответствовали налипанию солей и прочих загрязнений. При этом, в случае скачка массы на 20 день экспозиции после сильного ветра, значение массы далее продолжительное время держалось на высоких значениях, а после первых осадков (41 день) можно заметить падение масс образцов, сопровождаемое падением G_{12} , что связано с вымыванием и удалением пыли и солей с поверхности пластин. По этой причине в зимнее время, в период сильных ветров, которые сопровождались обильными дождями, не наблюдалось столь резких скачков массы.

Особый интерес вызывает анализ полученных данных на предмет количества скачков массы вверх, которым соответствует падение показателя G_{12} за счет увлажнения образцов. При анализе количества точек, в которых наблюдается рост одного показателя, сопровождаемый снижением другого, было установлено, что для ВПС-48/7781, КМКУ-3м.150, ВКУ-39 доля таких точек к общему числу измерений составила всего 67, 55 и 55% соответственно. Однако при отбрасывании точек, в которых масса или модуль изменяются на значение, меньше среднего, доля таких точек возрастает до 71% для УП и до 96% для СП.

Данная работа финансировалась за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00009.

Литература

1. Bai J. (ed.) Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. – Woodhead Publishing, 2022.
2. Технологии получения полимерных композиционных материалов на основе термопластичной матрицы (обзор)/ А.Е. Сорокин [и др.] //Труды ВИАМ. 2021. № . 3 (97). С. 78–86.
3. Колобков А. С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) //Труды ВИАМ. 2020. № . 6–7 (89). С. 38–44.
4. Advanced composite in aerospace applications: opportunities, challenges, and future perspective / M.R.M. Asyraf M. [et al.] //Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications. 2022. С. 471–498.
5. A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions / G. Feng [et al.] // Cement and Concrete Composites. 2022. Т. 134. Р. 104758.
6. Long Term Monitoring of Mechanical Properties of FRP Repair Materials / R.A. Atadero [et al.]. 2013. 138 p.
7. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксивинилэфирного связующего / А.А. Евдокимов [и др.] //Труды ВИАМ. 2021. № . 3 (97). С. 128–136.

8. Mechanical behavior and design of FRP structural members at high and low service temperatures / P. Feng [et al.] // *Journal of Composites for Construction*. – 2016. – Т. 20. № . 5. P. 04016021.
9. Davies P., Le Gac P. Y., Le Gall M. Influence of seawater aging on the mechanical behaviour of acrylic matrix composites // *Applied composite materials*. 2017. Т. 24. № . 1. – P. 97–111.
10. Goruganthu S. et al. Characterization and modeling of the effect of environmental degradation on interlaminar shear strength of carbon/epoxy composites // *Polymers and Polymer Composites*. 2008. Т. 16. № . 3. P. 165–179.
11. Gibhardt D. et al. Hygrothermal aging history of amine-epoxy resins: effects on thermo-mechanical properties // *Frontiers in materials*. 2022. Т. 9. P. 826076.
12. Оценка начальной стадии климатического старения базальто-и стеклопластиков в условиях экстремально холодного климата / И.Г. Лукачевская и др. // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021. Т. 26. № . 2. С. 159-169.
13. Старцев О. В., Лебедев М. П., Кычкин А. К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // *Известия Алтайского государственного университета*. 2020. № . 1 (111). С. 41–51.
14. Каблов Е. Н., Старцев В. О., Иноземцев А. А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № . 2 (47). С. 56–68.
15. Влияние климатического старения на свойства высокотемпературных углепластиков / И.Н. Гуляев и др. // *Труды ВИАМ*. 2021. № . 2 (96). С. 39-51.
16. ГОСТ 33843-2016. Композиты полимерные. Метод определения модуля сдвига в плоскости методом кручения. М.: Стандартинформ. 2016. 11 с.
17. Старцев О.В., Корниенко Г.В., Гладких А.В., Горбовец М.А. Неразрушающие измерения модуля сдвига в плоскости листа при старении полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. № 3, 2024, С.21–30. DOI: 10.31044/1813-7008-2024-0-3-21-30.
18. Study of thermohumid aging of aircraft fiberglass plastic / Startsev O.V. [et al.] // *Polymer Science. Series D*. 2010. V. 3. P. 58–61.
19. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы / Е.В. Николаев и др. // *Труды ВИАМ*. 2016. № . 6 (42). С. 91–106.
20. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов // *Труды ВИАМ*. 2016. № . 8 (44). С. 50–57.

ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С НАПОЛНИТЕЛЕМ КАРБИДОМ КРЕМНИЯ ЭКСПОНИРОВАННЫХ В ТЕЧЕНИЕ 12 МЕСЯЦЕВ В УСЛОВИЯХ ОЧЕНЬ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Кычкин А.А.^{1,2}, Кычкин А.К.³

¹ ФИЦ «Якутский научный центр» СО РАН, г. Якутск

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

³ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

icen.kychkin@mail.ru

Для исследования влияния климатических факторов на прочность стеклопластиков на основе полимерной матрицы модифицированного карбидом кремния (КК) были изготовлены стержни диаметром 5,5 мм на базе ООО «Бийский Завод Стеклопластиков» (ООО «БЗС») и установлены на открытом полигоне в условиях очень холодного климата в г. Якутске. Представлены физико-механические характеристики стеклопластиковых стержней до и после климатического воздействия в течении 12 месяцев.

Результаты исследований влияния модификации эпоксидного связующего, описанные в работе [1], свидетельствует, что особый интерес представляют образцы модифицированные добавкой КК до 1 масс.%, поэтому для исследования трансляции свойств были изготовлены стеклопластиковые стержни диаметром 5,5 мм с содержанием КК полимерной матрице 0,75 масс.% на линии формования периодического профиля по выпускаемому ТУ 2296-001-08911770-2016 соответствующие требованиям ГОСТ Р 54923-2012.

Композитные стержни были экспонированы в течении 12 месяцев на открытом полигоне ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН в г. Якутске в очень холодном климате под воздействием естественных климатических факторов.

Для определения влияния модификаций полимерной матрицы на физико-механические характеристики стеклопластикового стержня, соответствующие испытания проводились в ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН методом испытания на осевое растяжение по ГОСТ 32492-2015.

В рамках своей работы [2] была определена минимальная длина испытуемого образца равная 820 мм при диаметре 5,5 мм. Из-за ограничений испытательной машины в длине захвата, концы стержня составили 150 ± 2 мм, длина рабочего участка составляла 320 ± 2 мм, общая длина 625 ± 2 мм. ГОСТ допускает использование более коротких испытательных муфт, чтобы разрыв образца происходил в пределах длины рабочего участка без проскальзывания и разрушения в них. Экстензометр устанавливался по середине рабочего участка с длиной базы измерения 50 ± 2 мм [2].



а)



б)

Рис. 1. Образцы для механических испытаний, модифицированные с КК (а) разрушение образца на испытательной машине (б)

Испытания проводились на разрывной машине «Zwick/Roel Z600», тип: ВРС – F0600TN.R09, серийный номер: 160088-2008 (ГОСТ 12004-81). Скорость перемещения траверса, согласно ГОСТ, составило 5 мм/мин. На рисунке 2 представлены результаты определения предела прочности (σ) и модуля упругости (E) композитных стержней до и после воздействия климатического воздействия в течении 12 месяца.

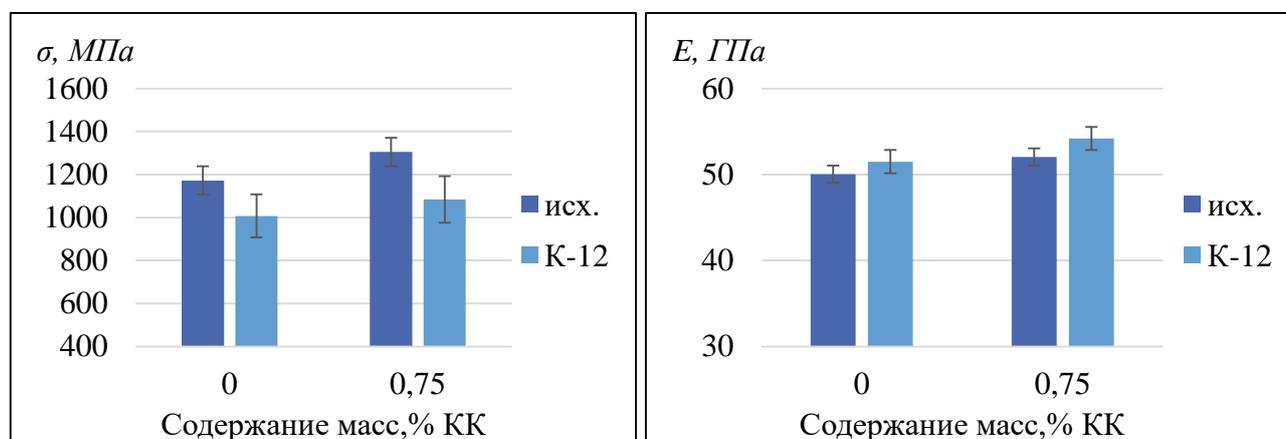


Рис. 2. Гистограмма σ и E при растяжении стержня от содержания КК, масс, %

Заключение. Изучение влияния климатического факторов на стеклопластики играет существенную роль в долгосрочной эксплуатации изделий из композитных материалов. Исследования показали, что климатическое воздействие оказывает существенное влияние на прочность материала. После 12 месяцев наблюдается снижение механических свойств, определенных методом растяжения. Полученные данные подчеркивают важность учета климатических факторов при проектировании и эксплуатации изделий из стеклопластика. Дальнейшие исследования позволят разработать более устойчивые к внешним воздействиям материалы в условиях очень холодного климата.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FWRS-2022-0001). Исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН.

Литература

1. Кычкин А.А. Исследование влияния ультрадисперсных порошков карбида кремния на упруго-прочностные свойства эпоксидного связующего / Кычкин А.А., Лебедев М.П., Ананьева Е.С., Кычкин А.К., Туисов А.Г. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1 (49). С. 92–97. DOI:10.17084/20764359_2021_49_92.
2. Исследование влияния модификации карбидом кремния полимерной матрицы на свойства стеклопластиковых стержней / А. А. Кычкин, А. Г. Туисов, Е. М. Максимова [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 2(42). С. 40–45. DOI 10.25699/SSSB.2022.42.2.006. – EDN QMGBLH.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ДЕСТРУКЦИИ СТЕКЛО- И БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Кычкин А.К., Лукачевская И.Г., Лебедев М.П., Дьяконов А.А., Стручков Н.Ф., Кычкин А.А.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

mirkin1611@gmail.com

Проведены исследования поверхностной деструкции стекло-базальтопластиков от длительности климатических испытаний. Увеличение зоны шероховатой площади определяемая на фрактограммах и количественно определяемая значениями средней шероховатости показывает, что при $Ra > 0,2\%$ от толщины испытываемых материалов происходит уменьшение упруго-прочностных свойств. Деструктивные процессы в зависимости от продолжительности климатического воздействия затронули менее $0,2\%$ от толщины образцов после 2 лет, а после 4 лет – $0,4\%$.

При разработке различных конструкций всегда требуется информация о долговечности использованных материалов в условиях воздействия внешней среды, агрессивность которой определяется комплексным воздействием температуры, влажности, солнечного облучения, химически активных частиц и др. [1, 2, 3]. От степени и характера появляемых дефектов после воздействия внешних факторов природного и техногенного характера снижаются эксплуатационные характеристики материалов, идет потеря прочности и устойчивости. После длительных периодов воздействия на поверхности полимерных композиционных материалов (ПКМ) могут возникнуть более серьезные повреждения в виде пор, оголений армирующего материала и микрорастрескиваний, нарушающих сплошность материала. Поскольку полимерная матрица связывает и передает нагрузку на армирующие волокна, повреждение данного критического компонента может отрицательно сказаться на общих механических свойствах ПКМ и ограничить срок его службы. Растрескивание часто является результатом реакций разрыва цепи, инициируемых воздействием ультрафиолета, при которых фрагменты, образующиеся в результате разрыва цепи, занимают больший объем, чем исходные полимеры, вызывая напряжения, которые приводят к образованию трещин. Если продукты разложения являются летучими или газообразными, также может произойти образование пор и углублений. Такие точечные дефекты и дислокации определяют не только физическую природу пластической деформации материалов. Их скопления могут послужить источником образования несплошностей, которые при определенных условиях способны трансформироваться в растущие трещины, приводящие к разрушению материала. Целью данной работы является исследование поверхностной деструкции полимерных композиционных материалов от длительности климатических испытаний.

Материалы исследований. В качестве объектов исследования рассматривались образцы на основе эпоксидных связующих толщиной 5 мм, базальтопластик (БП) из 15 слоев базальтовой ткани БТ-11/1 П с плетением «саржа» и стеклопластик (СП) из 13 слоев стеклоткани Ортекс 560 с полотняным плетением. Исходное связующее, основу которого составляет эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отверждаемая изо-метилтетрагидрофталевым ангидридом (изоМТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-три-N/N/диметиламинометил фенол (Агидол 53) готовили по рецептуре согласно РТП-СП2-20994511-1999Т.

Результаты исследования. Исследование поверхностной деструкции и изменения микроструктуры проводилось на растровом электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 2 кВ в среде вакуума. Микроструктура лицевой поверхностей образцов из БП со стороны солнечного воздействия приведены на рисунке 1.

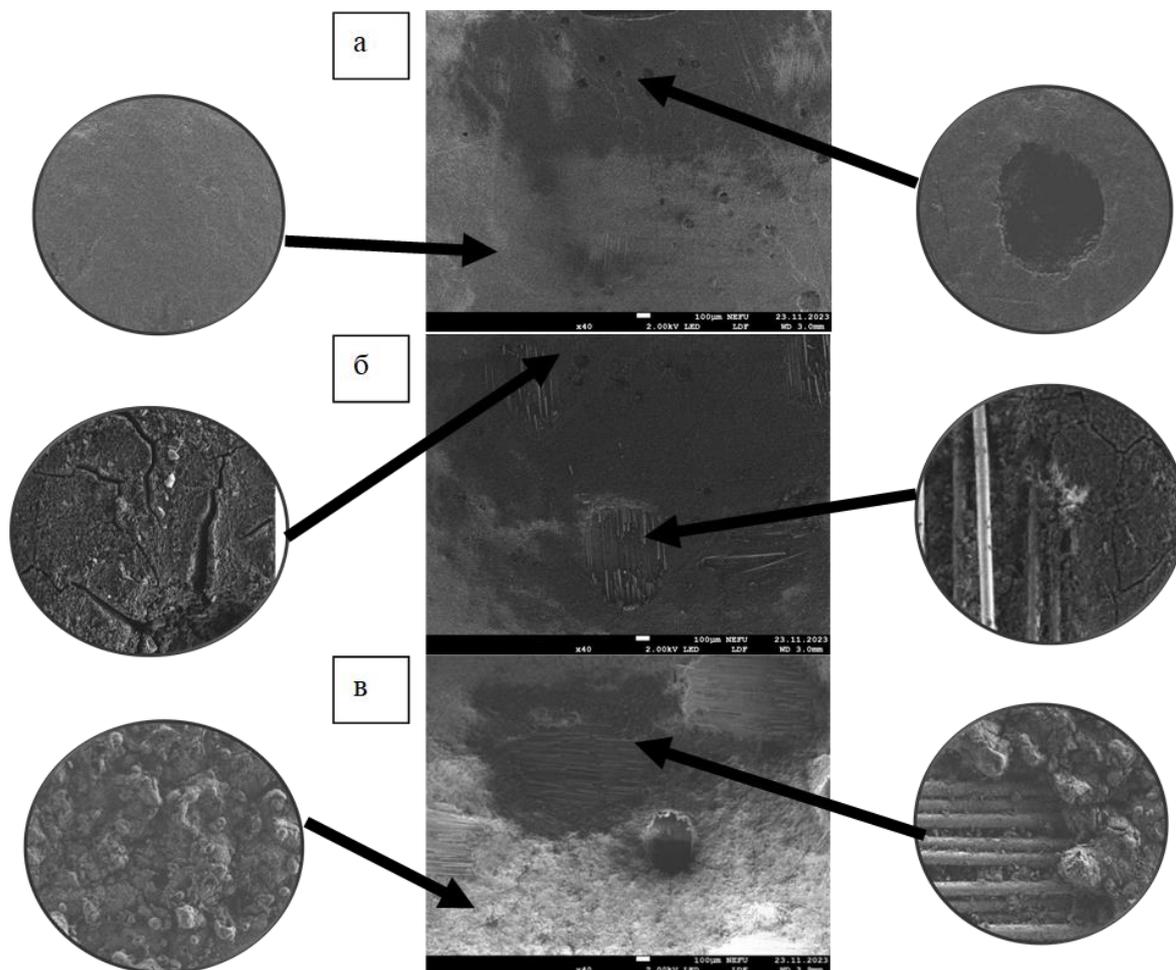


Рис. 1. Микроструктура поверхности базальтопластиков: а) контрольный; б) после 2 лет экспозиции; в) после 4 лет экспозиции

Общая структура контрольных образцов (рис. 1, а) характеризуется наличием технологических пор, предположительно образовавшихся из-за застрявших пузырьков воздуха. При увеличении структуры контрольного образца БП видно, что связующий полимер покрывает поверхность равномерно. С течением времени экспозиции образцы из БП, обращенных к солнцу, претерпевают сильную деструкцию. Общая структура образцов БП после экспонирования в течение 2 лет (рис. 1, б) характеризуется образованием трещин на полимерной матрице, толщина трещин варьируется от 1 до 8 мкм. При увеличении видно, что активный рост трещин образуется вокруг пор. Также наблюдается места оголенных базальтовых волокон размерами от 200 до 500 мкм, предположительно за счет деструкции полимера, по причине образования трещин. Общая структура образцов БП после экспонирования в течение 4 лет (рис. 1, в) характеризуется увеличением оголенных участков БВ, размеры которых составляют от 600 до 1000 мкм. Также деструктирует связующее преобразуясь в образования сферического типа, которыми усеяна вся поверхность.

На рисунке 2 приведена микроструктура лицевой стороны образцов СП со стороны солнечного воздействия.

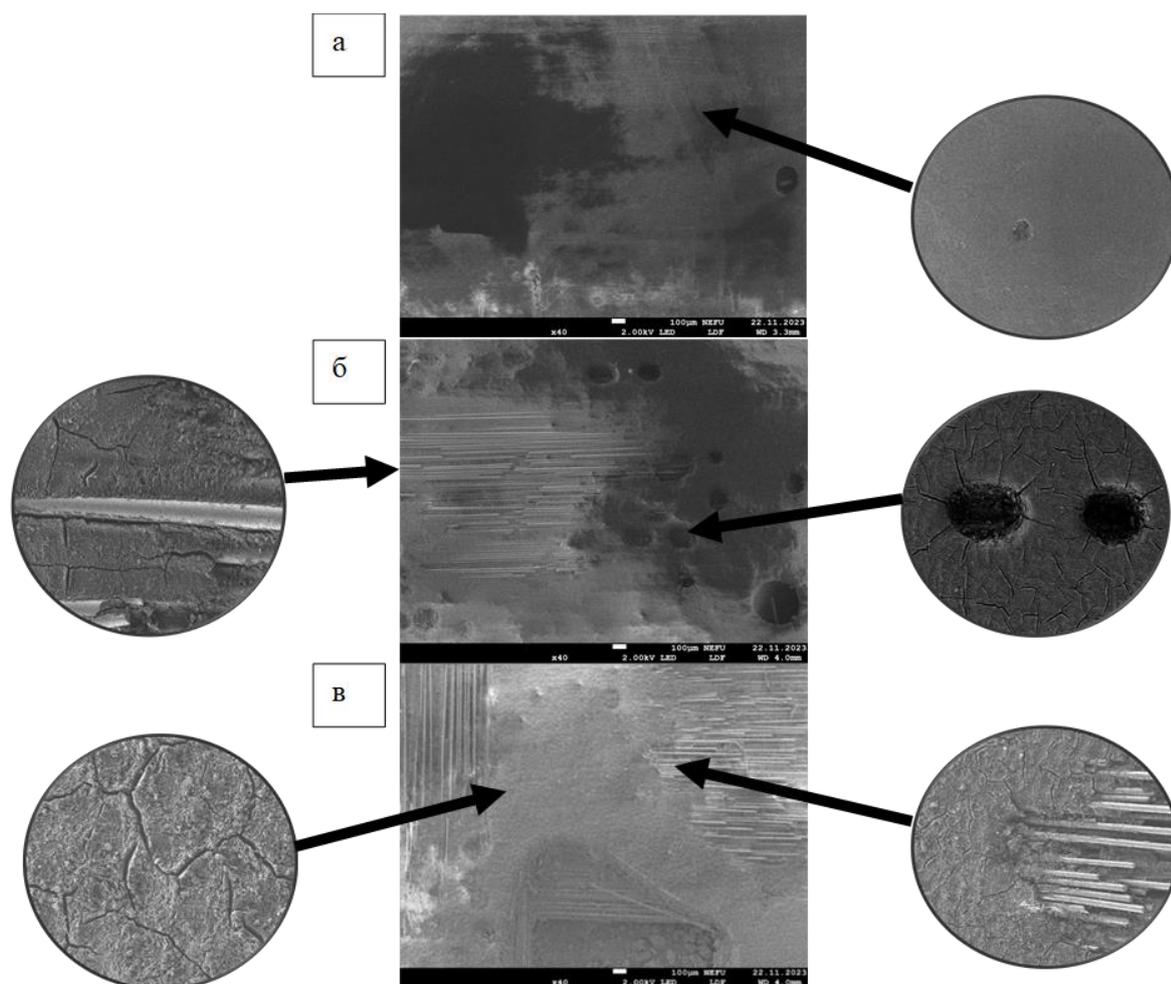


Рис. 2. Микроструктура поверхности стеклопластиков: а) контрольный; б) после 2 лет экспозиции; в) после 4 лет экспозиции

На общей структуре контрольных образцов (рис. 2, а) наблюдается технологическая пора, предположительно образовавшаяся из-за застрявших пузырьков воздуха. При увеличении структуры контрольного образца БП видно, что связующий полимер покрывает поверхность равномерно. Общая структура образцов СП после экспонирования в течение 2 лет (рис. 2, б) характеризуется образованием трещин на полимерной матрице, толщина трещин варьируется от 1 до 3 мкм. При увеличении видно, что активный рост трещин образуется вокруг пор. Общая структура образцов СП после экспонирования в течение 4 лет (рис. 2, в) характеризуется наличием больших оголенных участков стекловолокон, размеры которых начинаются от 1000 мкм. Также на всей поверхности связующего наблюдается образование трещин.

В результате фрактографических исследований выявлено проявление деструктивных процессов в поверхностных слоях композитов, обращенных к солнечной стороне, отслоение полимерной матрицы от армирующего материала в зависимости от сроков экспонирования. При этом у СП данный эффект наблюдается уже со второго года экспонирования, у БП отслоение наблюдается с 4 года. С 4 года у СП отслоение увеличивается и появляются дополнительно трещины в полимерной матрице.

Для количественной оценки поверхностной деструкции экспонированных СП и БП были проведены профилометрические исследования. Лицевые поверхности СП и БП в исходном состоянии имеют относительно ровные профили. Единичные углубления не более 25 мкм связаны с расположением волокон в материале и его заполнением полимерной матрицей. В зависимости от продолжительности климатических испытаний увеличивается шероховатость

профиля с более частыми углублениями не более 30 мкм. После 4 лет испытаний у СП наблюдаются значительные углубления до ~120 мкм, у БП – до ~40 мкм. Морфология поверхности БП до и после климатических испытаний претерпевает изменения в 3 раза меньше, чем у СП.

В таблице 1 представлены значения средней шероховатости и коэффициента сохраняемости предела прочности при растяжении.

Таблица 1. Средние значения показателей рельефа поверхности и коэффициента сохраняемости предела прочности при растяжении базальтопластика и стеклопластика до и после экспонирования

Марка ПКМ	Состояние*	Средняя шероховатость (R_a)	Значение коэффициента сохраняемости предела прочности при растяжении (k_R)
БП	И	0,70 / 9,98	1
	К-2	1,18 / 9,70	1,04
	К-4	9,02 / 18,73	0,89
СП	И	1,03 / 5,50	1
	К-2	4,08 / 5,64	1,11
	К-4	9,89 / 14,03	0,89

*И – исходное состояние, К-2 – после 2 лет экспонирования, К-4 – после 4 лет экспонирования;

**Числитель – солнечная сторона, знаменатель – теневая сторона экспонированных образцов ПКМ.

Средняя шероховатость лицевой стороны у БП и СП увеличилась до ~9 раз, а в теневой стороне у БП ~2 раза, у СП ~3 раза. Изменения средней шероховатости лицевой и оборотной сторон от длительности воздействия климатических факторов предполагает также об изменении теплофизических свойств материалов.

Заключение. В результате фрактографического анализа поверхности полимерных композитов после экспозиции в течение 2 и 4 лет в натуральных климатических условиях г. Якутска выявлено следующее: обнаружено проявление деструктивных процессов в поверхностных слоях композитов, обращенных к солнечной стороне, отслоение полимерной матрицы от армирующего материала в зависимости от сроков экспонирования, при этом у СП данный эффект наблюдается уже со второго года экспонирования, у БП отслоение наблюдается с 4 года. Увеличение зоны шероховатой площади определяемая на фрактограммах и количественно определяемая значениями средней шероховатости показывает, что при $R_a > 0,2\%$ от толщины испытываемых материалов происходит уменьшение упруго-прочностных свойств. Деструктивные процессы в зависимости от продолжительности климатического воздействия затронули менее 0,2% от толщины образцов после 2 лет, а после 4 лет – 0,4%.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0036 № 1023031300030-0-2.5.1)

Литература

1. Long-term durability of polymeric matrix composites. Ed. by K.V. Pochiraju, G.P. Tandon, G.A. Schoeppner. 2012. Springer. 677 p.
2. Service Life Prediction of Polymers and Plastics Exposed to Outdoor Weathering / Eds: C.C. White, K.M. White, L.E. Pickett. William Andrew Publ. 2017. 342 p.
3. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате// Дисс. на соиск. ученой степ. доктора техн. наук. Москва, 2018. 308 с.

АКТИВАЦИЯ УГЛЕРОДНОГО НАНОМАТЕРИАЛА МЕТОДОМ БЫСТРОГО ДЖОУЛЕВА НАГРЕВА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ

Лоскин Н.Н.¹, Прокопьев А.Р.¹, Попов Д.Н.¹, Васильев П.Ф.²

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», г. Якутск

² ИФТПС СО РАН, г. Якутск

loskinnn@s-vfu.ru

В данной работе рассматривается метод активации углеродного наноматериала. В качестве материала был выбран аэрогель из оксида графена. Методом активации является быстрый джоулев нагрев в собранной лабораторной установке теплового удара. Активированные материалы были исследованы методами комбинационного рассеяния света, сканирующей электронной микроскопии с элементным анализом и Брунауэра-Эммета-Теллера для оценки удельной площади поверхности. Результаты исследований показали, что тепловой удар способствует проявлению пиков D и G, характерных для графеносодержащих материалов в спектре комбинационного рассеяния света и увеличению удельной площади поверхности материала, за счет формирования микропористой структуры, что было подтверждено методом сканирующего электронного микроскопа. Также было обнаружено, что после процесса активации значительно снижается концентрация кислородных групп. Предлагаемый метод активации быстрым джоулевым нагревом имеет перспективу в области изготовления электродов для суперконденсаторов.

Введение. В настоящее время, многими исследователями широко изучаются свойства и сферы применения углеродных наноматериалов (УНМ). УНМ включают в себя различные аллотропные модификации углерода, такие как графен, оксид графена, углеродные нанотрубки и нановолокна. Каждый из этих аллотропов имеет свои уникальные характеристики, электропроводности и теплопроводности, а также механической прочности, что обусловлено их структурными особенностями. Графен представляет собой двумерную структуру, состоящую из гексагональной решетки атомов углерода [1]. Графен и его производные обладают большим потенциалом для применения в различных областях, включая электронику, энергетику, композитные материалы и т. д. Аэрогель сделанный из оксида графена (ОГ) имеет перспективу применения в качестве электродов в суперконденсаторах, за счет высокой удельной площадью поверхности. Для этого в начале получают ОГ модифицированным методом Хаммера в виде суспензии. Далее суспензию ОГ подвергают лиофилизации для получения аэрогеля [2].

Для увеличения удельной площади поверхности УНМ, существуют различные способы активации, такие как физические и химические [3]. В последнее время активно изучаются методы активации с использованием быстрого джоулевого нагрева (БДН). Согласно данным, представленным в работе [4], увеличение удельной поверхности способствует улучшению электрохимических характеристик обработанного материала. Однако исследования активации углеродных материалов с помощью БДН остаются недостаточно изученными. Таким образом, цель данной работы заключается в активации углеродного материала и исследовании полученных пористых углеродных материалов методом БДН.

Объекты и методы исследования. Активация ОГ была проведена на собранной установке теплового удара. Установка представляет собой лабораторный макет с конденсаторной батареей емкостью 180 мФ с блоком управления для регулирования количества конденсаторов и с вакуумной камерой. Аэрогели ОГ были зафиксированы двумя электродами. БДН был проведен в диапазоне напряжений 100 – 220 В и емкости 36 мФ в потоке азота.

Полученные образцы были исследованы методами рамановской спектроскопии (КРС) (NT-MDT NTegra Spectra, Россия), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL 7800F, Япония), рентгеновским энергодисперсионным анализатором (РЭДС) (Oxford

Instruments, Великобритания). Удельная площадь поверхности была определена методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) (Quantachrome NOVAtouch LX, США).

Результаты и обсуждения. Активация ОГ при напряжениях ниже 200 В показало, что в спектрах КРС наблюдались незначительные изменения от исходного материала. Спектры КРС исходного и активированного ОГ при значении напряжения 200 В представлены на рисунке 1. В спектре после БДН отчетливо проявляются пики D и G, локализованные в областях частот 1330 см^{-1} и 1558 см^{-1} , соответственно. Также, в спектрах КРС наблюдается увеличение интенсивности 2D-пика, локализованный в области 2700 см^{-1} . Данный пик относится к восстановленным графеновым структурам.

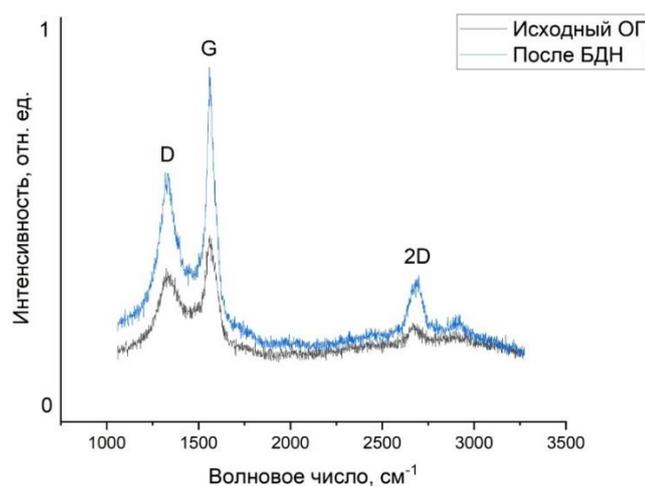


Рис. 1. Спектры КРС исходного ОГ и после процесса БДН

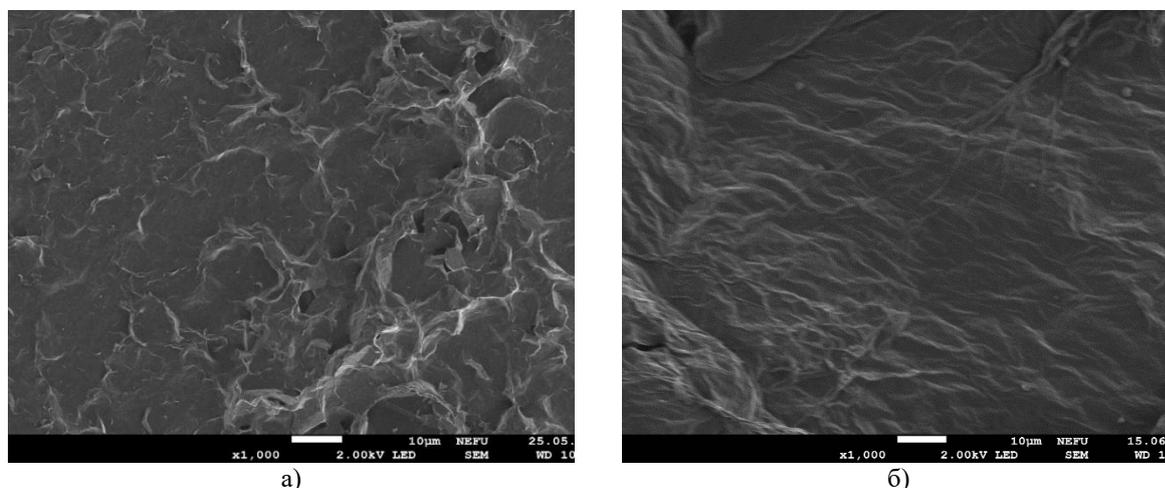


Рис. 2. Поверхность ОГ при напряжении 200 В: а) Исходный, б) После активации

На рисунке 2 показаны фотографические изображения поверхности аэрогелей ОГ, полученные на СЭМ. Как видно из рисунка, после БДН при 200 В формируется микропористая структура у аэрогеля ОГ.

Также из рисунка 3 следует, что процесс БДН способствует уменьшению кислородных групп. Соотношение атомов углерода к кислороду составляет 9:1.

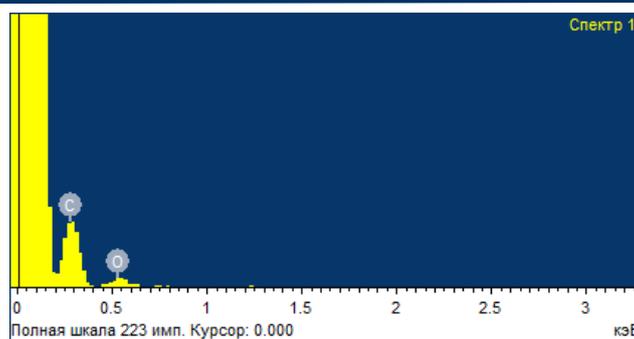


Рис. 3. Энергодисперсионный анализ активированного аэрогеля ОГ

Удельная площадь поверхности была определена методом БЭТ. У исходного аэрогеля ОГ удельная площадь составляет $178,1 \text{ м}^2/\text{г}$. После активации удельная площадь увеличилась до $363 \text{ м}^2/\text{г}$. Следовательно, БДН способствовал увеличению в 2 раза. При дальнейшем увеличении напряжения теплового удара наблюдается ухудшение результатов (Табл. 1).

Таблица 1. Результаты измерения удельной площади поверхности ОГ

Образцы	$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$
Аэрогель ОГ исх	178,1
Аэрогель ОГ 100 В	278,2
Аэрогель ОГ 140 В	313,3
Аэрогель ОГ 200 В	363,0
Аэрогель ОГ 220 В	260,5

Заключение. В работе представлен метод активации аэрогелей из оксида графена быстрым джоулевым нагревом. В спектрах КРС проявляются характерные для графеносодержащих материалов основные пики D и G, а также наблюдается увеличение интенсивности пика 2D. Из исследований СЭМ-изображений следует, что образуются микропористые структуры после быстрого джоулевого нагрева. Кроме того, тепловой удар при значении напряжения 200 В значительно уменьшает содержание кислородных групп. Соотношение атомов углерода к кислороду составило 9:1. Из данных БЭТ следует, что удельная площадь активированного материала, увеличивается более чем в два раза по сравнению с исходным при разряде 200 В. В то же время, дальнейшее повышение напряжения процесса активации способствует деградации удельной площади поверхности материала. Проведенный метод активации в дальнейшем имеет перспективу в области создания графеновых электродов для суперконденсаторов.

Исследование выполнено при Федеральной программе Министерства науки и образования РФ в рамках проекта FSRG-2022-0011.

Литература

1. Xie P. et al. Advanced carbon nanomaterials for state-of-the-art flexible supercapacitors //Energy Storage Materials. 2021. Vol. 36. P. 56–76.
2. Korkmaz S., Kariper İ. A. Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications //Journal of Energy Storage. 2020. Vol. 27. P. 101038.
3. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review / Z. Heidarinejad [et al.] //Environmental Chemistry Letters. 2020. Vol. 18. P. 393–415.
4. Rapid joule-heating activation boosted capacitive performance of carbon fibers / Y. Zhao [et al.] //Composites Communications. 2022. Vol. 34. P. 101263.

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ФИБРОАРМИРОВАНИЕМ

Марков А.Е.¹, Кычкин А.К.², Копырин М.М.¹

¹ ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

aital.markov@gmail.com

В данной статье исследуется полимерный композиционный материал из эпоксидной смолы с фиброармированием. Добавление армирующих наполнителей в полимерную матрицу является одним из самых распространенных методов улучшения показателей прочности. По результату проведенного испытания на растяжение наблюдается повышение значения предела прочности ~30%. В заключении приводятся выводы о перспективах использования фиброармированных полимерных материалов в различных отраслях промышленности.

Полимерный композиционный материал (ПКМ) – это материал, состоящий из двух или более компонентов и носящий в себе свойства всех составляющих для получения характеристик с заданными свойствами. ПКМ чаще всего состоит из армированного материала и полимерной матрицы. Наиболее распространенными армирующими материалами являются стекло-, угле- и базальтовые волокна [1]. Волокнистые наполнители существуют в виде нитей или пучков (ровинг). В зависимости от размера и количества, армирующий материал может улучшить или ухудшить физико-механические свойства ПКМ. Дисперсные волокна обычно используют для получения конструкционных литевых и экструзионных термопластичных ПКМ [2].

В работе [3], механические свойства измерялись для образцов со случайно ориентированными нитями толщиной 2,5 и 6 мм со следующими размерами пучков (длина-ширина):

Таблица 1. Размеры пучков волокон на испытанных образцах

Длина	6	12	12	25	50	25	50
Ширина	3	3	6	6	6	12	12

Однонаправленная лента толщиной 0,14 мм из углерода/полиэфир-эфиркетон (ПЭЭК) с объемной долей волокна 60% была разрезана на пряди желаемой длины с помощью автоматического отрезного станка. Пределы прочности при растяжении, сжатии и сдвиге были одинаковы по величине. Это можно объяснить тем, что механизмы нагружения и механика разрушения одинаковы для каждого из условий нагружения. Был сделан вывод, что размеры пучков волокон зависят от применения конечного изделия.

Автор в работе [4], в качестве матрицы использовал четыре типа эпоксидных смол. В качестве армирующих материалов применялись кевла-целлюлоза и стекловолокно. Результаты испытания на разрыв у образцов наполненные кевла-целлюлозой от 17 до 32 МПа, а модуль упругости от 1,5 до 2 ГПа у образцов с кевла-целлюлозой и от 60 до 78 МПа предела прочности на разрыв, а модуль упругости 2 до 2,5 ГПа у образцов со стекловолокном в зависимости от типа смолы.

Использование произвольно ориентированных коротких армирующих наполнителей, обладающих отличными характеристиками формуемости и жесткости, сравнимыми с квази-изотропными ламинатами, дает возможность для изготовления деталей сложной геометрической формы в автомобильной и аэрокосмической промышленности [5]. Также на прочностные характеристики влияет объемная доля наполнителя в полимерной матрице. Тем самым исследование в разработке ПКМ армирующими рубленными волокнами являются актуальной задачей, направленной на повышение упруго-прочностных свойств ПКМ.

Для данной работы исходя из литературного анализа был взят минимальный размер фибры для дальнейшего сравнения прочностных свойств ПКМ. Данная фибра была выбрана в результате анализа научной литературы и соответствует оптимальной длине фибры.

Объектом исследования данной работы является ПКМ на основе эпоксидной смолы марки DY-128 (аналог эпоксидной смолы ЭД-20) и базальтовая фибра 0,1 масс% марки ТУ 23.14.11-002-78832457-2023 с длиной 6 мм. Концентрация в количестве 0,1 масс.% была выбрана для сравнения влияния армирующего наполнителя на физико-механические свойства с образцами без наполнения. На рисунке 1 приведена микрофотография с 1000-м увеличением базальтовой фибры длиной 6 мм.

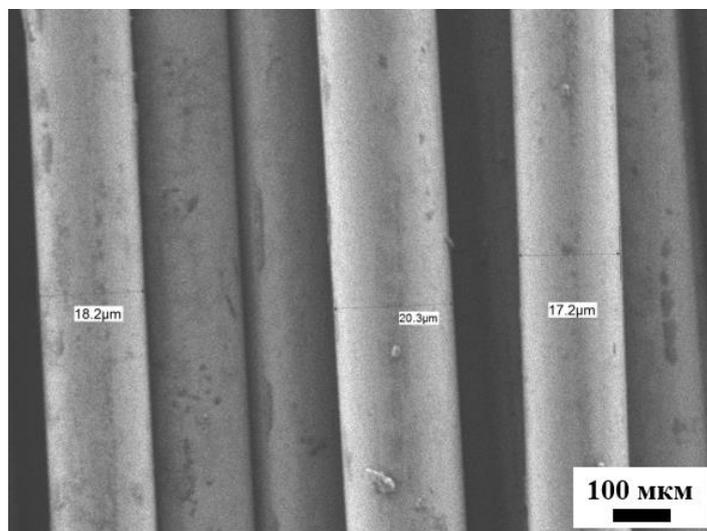


Рис. 1. Микрофотография базальтовой фибры

На данной микрофотографии видно, что толщина одной первичной нити базальтовой фибры составляет от 17,2 до 20,3 мкм.

Определение прочности при разрыве образцов проводили на испытательной машине Autograph AGS-JSTD (Shimadzu, Япония) при комнатной температуре в соответствии со стандартом ГОСТ 25.601-80, со скоростью 2 мм/мин. Исследование структурных свойств армирующего наполнителя осуществлялось при помощи растрового электронного микроскопа JSM-7800F (JEOL, Япония).

Было проведено испытание на растяжение пластиков на основе эпоксидной смолы и эпоксидной смолы с добавлением базальтовой фибры 0,1 масс.%.

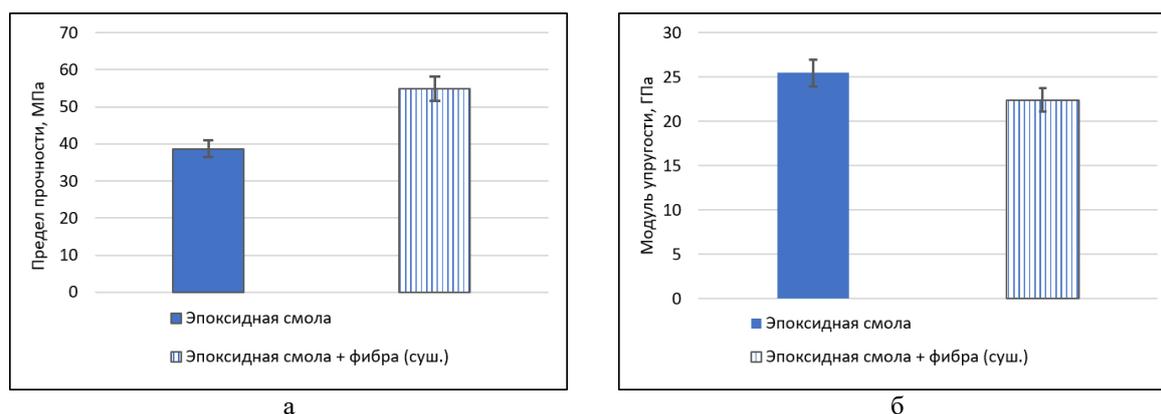


Рис. 2. Испытание на растяжение пластиков на основе эпоксидной смолы DY-128 с добавлением базальтовой фибры: а) предел прочности; б) модуль упругости

Предел прочности полимерных пластиков при растяжении составила 38,72 МПа, что соответствует литературным данным [6]. С добавлением базальтовой фибры, увеличение предела прочности составило ~30%. Результаты данных модуля упругости полностью коррелирует с пределом прочности, уменьшение модуля упругости составило ~12%.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FWRS-2022-0001).

Литература

1. Ибатуллина А.Р. Обзор производителей и сравнение свойств сверхпрочных высоко-модульных волокон. Вестник Казанского технологического университета, 2014. Т. 17. № 19. С. 136–139.
2. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов. Технические науки, 2017. № 10. С. 459-465.
3. Selezneva M., Lessard L. Characterization of mechanical properties of randomly oriented strand thermoplastic composites // Journal of Composite Materials, 2015. DOI: 10.1177/0021998315613129.
4. Matei S., Stoicanescu M., Crisan A. Composites with Short Fibers Reinforced Epoxy Resin Matrix // Procedia Technology, 2016. Vol. 22. P. 174–181. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.01.041.
5. Visweswarajah S. B., Selezneva M., Lessard L., Hubert P. Mechanical characterisation and modelling of randomly oriented strand architecture and their hybrids // A general review. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2018. P. 1–33. 073168441875436–. DOI: 10.1177/0731684418754360.
6. Мейирбеков М. Н., Исмаилов М. Б. Влияние каучука на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор). Комплексное Использование Минерального Сырья, 2020. № 1 (312). С. 11–21.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-329-332

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ БАСЕЙНА РЕКИ ИНДИГИРКА

Никулин К.В.¹, Ноговицын Д.Д.¹, Сергеева Л.П.¹

¹ Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

nikuln9090@mail.ru

Статья посвящена исследованию гидроэнергетического потенциала бассейна реки Индигирка. Внедрение объектов гидроэнергетики на территории северо-восточной части Якутии является одним из возможных решений для уменьшения расхода традиционных видов топлив и переход на использование альтернативных энергоносителей. Приведены результаты расчетов потенциальной мощности и энергии водотоков бассейна реки Индигирка.

Введение. Территории арктических и северных районов Якутии, включая бассейн р. Индигирка (в древности – Собачья), являются зоной децентрализованной энергетики, что обусловлено крайне суровыми природно-климатическими условиями, труднодоступностью, низкой плотностью населения, отсутствием крупных промышленных потребителей. В этих условиях одним из основных факторов рисков является энергетическая безопасность, обусловленная старением оборудования на объектах энергетики и значительным увеличением затрат на завоз топлива, что требует необходимости проведения анализа и оценки степени изношенности оборудования и поиска альтернативных источников энергии, что является особенно актуальным [1].

Реки Якутии обладают значительными запасами гидроэнергии, которые могут сыграть важную роль в комплексном использовании водных ресурсов. Поэтому важно, чтобы при планировании развития гидроэнергетики учитывалась полнота и качество учета гидроэнергетических ресурсов. В этой связи следует отметить на недостаточную изученность гидроэнергетического потенциала северо-востока Якутии. В последнее время все большее внимание уделяется использованию малых гидроэлектростанций (МГЭС) для энергоснабжения небольших труднодоступных населенных пунктов, поэтому более полный учет потенциальных гидроэнергетических ресурсов и разработки методов их расчета являются весьма актуальной задачей. Малые ГЭС могут стать потенциальным решением как энергетических проблем, так и экологических.

Целью является оценка энергетического потенциала бассейна р. Индигирка.

Природные условия и объект исследования. Климат в бассейне Индигирки резко континентальный. Основное воздействие на климат бассейна оказывают климаты арктической и материковой части Восточной Сибири. В бассейне Индигирки наблюдаются экстремальные температуры: среднегодовая температура января составляет -40°C , а средняя высота снежного покрова – 0,35 м. В июле средняя температура колеблется в пределах $8\text{--}12^{\circ}\text{C}$, а годовое количество осадков составляет 150–250 мм, причем большая часть выпадает в зимнее время. Влажность воздуха составляет около 70% [2].

Река Индигирка, образованная слиянием истоков Туора-Юрях и Тарын-Юрях, имеет длину около 1726 км, а общая протяженность вместе с Туора-Юряхом составляет 1977 км [3]. Наибольшая длина с севера на юг составляет около 1105 км, а с запада на восток – более 500 км. В бассейне Индигирки более 125605 водотоков, свыше 80000 озер, а общая площадь водной поверхности составляет 11300 км². Густота русловой сети варьируется от 1,2 в верхнем течении до 0,2–0,3 км/км² в нижнем течении.

Бассейн Индигирки практически полностью расположен в пределах Якутии. Индигирка проходит через четыре района, расположенные вдоль реки: Оймяконский, Момский, Абыйский и Аллаиховский. Река условно делится на две зоны: верхняя горная – 640 км и нижняя равнинная – 1086 км [4].

Одним из основных природных факторов, влияющих на формирование стока является распространение многолетней мерзлоты. Практически вся территория бассейна расположена в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты. Питание реки Индигирка смешанное с преобладанием снегового. Годовой сток составляет 58 км³, большая его часть приходится на летний период (52%), весной – 32%, осенью – 15%, доля зимнего стока имеет минимальное значение, местами река перемерзает. В верховьях бассейна Индигирка наблюдается наибольший модуль стока – 7–8 л/сек·км². На водомерном посту Воронцово модуль общего стока составляет 5,1 л/с·км², а доля подземного стока 0,44 л/сек·км² (около 9%). В условиях многолетней мерзлоты питание рек подземными водами незначительна [2].

Материалы и методы исследования. Базовыми материалами послужили кадастровые материалы, приведенные в «Гидрологических ежегодниках», «Основных гидрологических характеристиках», «Ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши», «Многолетних данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши», «Ресурсах поверхностных вод».

В исследовании использован математический подход к расчету потенциальной энергетической мощности водотоков, а также аналитический и обобщающий процесс для формирования выводов. Исходным материалом для расчетов являются данные 20 станций мониторинга поверхностных водных объектов. Методика гидрологических расчетов соответствует требованиям СП 33-101-2003 и других нормативных документов [5].

Результаты и обсуждение. Электроэнергетика играет важную роль в бассейне реки Индигирки, являясь второй по объему производства отраслью. Исследуемая территория входит в состав Северного энергорайона Якутии и имеет общую установленную мощность 57540 МВт. На сегодняшний день энергоснабжение населенных пунктов на рассматриваемой территории осуществляется в основном за счет дизельных (ДЭС) и солнечных электростанций (СЭС). Задача этих электростанций – удовлетворить потребности в электроэнергии промышленности и населенных пунктов. Промышленность района в основном ориентирована на добычу полезных ископаемых, в частности золота, серебра, олова и сурьмы. Однако добыча сопутствующих металлов, таких как вольфрам, цинк, медь и платина, в настоящее время экономически нецелесообразна. Кроме того, на территории района имеются разведанные запасы бурого и каменного угля в составе Зырянского угольного бассейна. Это, естественно, ставит вопрос об энергообеспечении района, соответственно увеличивается объем импорта топлива. Высокая стоимость жидкого топлива и сложная логистика влияют на стоимость электроэнергии. Также следует отметить, что высокий износ оборудования, линий электропередач и трансформаторных подстанций приводит к частым авариям [6].

В сложившихся социально-экономических и природных условиях, использование возобновляемых источников энергии может сыграть существенную роль в смягчении ресурсного и экологического стресса в исследуемом районе. На данном этапе развития гидроэнергетики, малые гидроэлектростанции становятся все более популярными благодаря своей экологической безопасности и экономической эффективности.

С экономической точки зрения гидроэнергетический потенциал зависит от ряда факторов, включая степени изученности рек, достижения в энергетическом секторе, типа ГЭС и выбора гидротурбин, а также экологической обстановки в районе проживания и образа жизни.

Предварительная качественная и количественная оценка потенциальных энергетических запасов и изучение природно-климатических и топографических условий территории является основой для разработки гидроэнергетической схемы [7].

Работа водного потока на любом участке реки определяется действием силы тяжести. Потенциальная мощность определяется по формуле:

$$P = 9,81 * Q * H, \quad (1)$$

где P – потенциальная мощность реки, кВт;

9,81 – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

Q – среднеегодовое количество воды в заданном створе, m^3/c ;

H – падение реки, м.

Потенциальная энергия потока «Э» определяется по:

$$\mathcal{E} = 8760 * P, \text{ кВт} / \text{год}, \quad (2)$$

где 8760 – число часов в году.

Таблица 1. Показатели потенциальной мощности и энергии водотоков бассейна реки Индигирка

№ п/п	Река – створ	Длина водотока, км	Перепад высот, м	Средний многолетний расход воды, m^3/c	Потенциальная мощность реки, кВт	Удельная мощность реки, кВт/км	Потенциальная энергия потока Э, 10^6 кВт*ч/г
1.	р. Индигирка (от устья 1527 км)	1790	213,89	243	509877	1939	4467
2.	р. Индигирка (от устья 1412 км)	1790	309,99	429	1304590	3451	11428
3.	р. Индигирка (от устья 350 км)	1790	788,59	1600	12377709	8596	108429
4.	р. Артык-Юрях (от устья 3,5 км)	60	551,54	1,70	9198	163	81,0
5.	р. Ала-Чубука (от устья 1,5 км)	18	1234,9	0,40	4846	294	42,3
6.	р. Амбар-Юрюетэ (от устья 1,0 км)	11	1309,68	0,18	2313	231	20,3
7.	р. Буор-Юрях (от устья 0,7 км)	68	332,83	1,22	3983	59,2	35,0
8.	р. Иргичээн (от устья 69,0 км)	211	49,68	19,6	9552	67,3	84,0
9.	р. Мома (от устья 377 км)	406	120,49	9,85	11643	402	102
10.	р. Нера (от устья 65,0 км)	196	218,75	120	257513	1966	2256
11.	р. Сунтар (от устья 21,0 км)	184	1053,53	44,4	458880	2815	4020

12.	р. Сахарынья (от устья 0,2 км)	25	489,89	0,24	1153	47	10,1
13.	р. Ючугей-Юрях (от устья 2,5 км)	114	474,71	2,53	11782	106	103
14.	р. Эльги (от устья 42,0 км)	394	958,17	112	1052761	2991	9222
15.	р. Ольчан (от устья 44,0 км)	114	726,76	11,0	78425	1120	687
16.	р. Хатыннах (от устья 1,5 км)	20	983,98	0,77	7433	402	65,1
17.	руч. Беличий (от устья 0,2 км)	7,0	465,25	0,056	256	37,6	2,2
18.	руч. Веер (от устья 0,2 км)	5,45	263,83	0,038	98	18,7	0,9
19.	руч. Триасовый (от устья 0,3 км)	8,3	567,8	0,075	418	52,3	4,0
20.	руч. Чаптахай (от устья 1,5 км)	8,4	1135	0,24	2672	387	3,4

В таблице 1 отражены результаты потенциальной мощности и энергии водотоков бассейна реки Индигирка. Результаты свидетельствуют о том, что энергетический потенциал рассматриваемых водотоков весьма высок для развития гидроэнергетики.

Вывод. Гидроэнергетический потенциал бассейна реки Индигирка представляет собой значительный ресурс для будущего развития энергетики в Арктической зоне. Тем не менее, успешная реализация гидроэнергетических проектов в этом регионе потребует комплексного подхода, включая тщательную оценку экологических последствий и учет уникальных климатических условий. Сбалансированное устойчивое использование гидроресурсов может привести к значительным экономическим выгодам и способствовать устойчивому развитию региона.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных энергетических систем в труднодоступных изолированных территориях Севера и Арктики».

Литература

1. Слепцов А.Н. Региональные аспекты развития российской Арктики на примере Республики Саха (Якутия) // Арктика и Север. 2015. № 19. С. 115–133.
2. Шашков С.Н., Савенкова М.С. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Индигирка. Книга 1 «Общая характеристика бассейна реки Индигирка». – М.: Экологическая и водохозяйственная фирма ООО «ВЕД», 2011;
3. Коротаев В. Н. ИНДИГИРКА // Большая российская энциклопедия. Том 11. Москва, 2008 г. 224 с.
4. Павлов А.С. Индигирка от истока до устья. Серия Великие реки Якутии. Якутск. Медиа-холдинг Якутия, 2013 г. – 264 с.
5. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик. Издание официальное. М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
6. Панкратьев П.С., Шакиров В.А. Многокритериальный выбор створа гидроэлектростанции на реке Индигирке в республике Саха (Якутия) // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3 (15). С. 71–80.
7. Вершинина И.П. Оценка энергетического потенциала малых рек бассейна Томи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 3. С. 111–118.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОХОЖДЕНИЯ ПАВОДКОВЫХ ВОЛН ДЛЯ МНОГОВОДНОГО И МАЛОВОДНОГО ГОДА НА ПРИМЕРЕ РЕКИ АДЫЧА

Никулин К.В.¹, Ноговицын Д.Д.¹, Сергеева Л.П.¹

¹Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

nikulin9090@mail.ru

Анализ прохождения паводковых волн важна для смягчения последствий возможных наводнений. Также анализ позволяет оперативно отслеживать ситуацию и определить уровень опасности и принять меры по снижению риска. Внедрение объектов гидроэнергетики на территории бассейна реки Адычи является одним из возможных решений для борьбы с наводнениями.

Введение. Северо-восточный регион страны, в частности бассейн реки Адычи (относится к бассейну реки Яны), отличается исключительным разнообразием природных условий, обуславливающих различные типы водного режима рек.

В последние годы в бассейне Адычи участились экстремальные гидрологические явления, в том числе наводнения, которые наносят ущерб населенным пунктам, инфраструктуре и сельскохозяйственным угодьям. Кроме того, бывают периоды минимального стока, что создает проблемы для работы водозаборов, судоходства на реке и поддержания качества воды. В теплое время года сильные дожди вызывают резкий подъем уровня воды в реке Адыча.

Целью данной работы является сравнительный анализ прохождения паводковых волн по реке Адыча для многоводного и маловодного года.

Объект исследования. Река Адыча – самый крупный приток реки Яны, длина – 715 км. Площадь водосбора, полностью расположенного в зоне многолетней мерзлоты, составляет 89800 км². Исток Адычи находится на южных склонах хребта Боронг, на высоте 1815 метров над уровнем моря. В бассейне Адычи насчитывается более 19000 водотоков, в том числе 78 притоков длиной более 10 км, которые впадают непосредственно в Адычу. Наиболее крупные притоки реки: Дёлакаг, Чаркы, Туостях – правые; Дербек, Нельгесе, Борулах – левые. Общее количество озер в бассейне Адычи около 4600 [1].

Питание реки смешанное. Среднегодовой расход воды Адычи от Усть-Чаркы до Юрдюк-Кумаха колеблется между 300 до 500 м³/с (объем стока от 9,468 до 15,781 км³/год и модуль стока от 4,8 до 5,4 м³/с*км²). Среднегодовой расход в 2,5 раза превышает расходы Яны выше впадения реки Адычи по течению. В период открытого русла на реке наблюдается 10–14 паводков с максимальной высотой 1,5–2 м. В весенние и летние месяцы проходит до 90% годового стока реки. В зимние месяцы сток реки прекращается на срок от одного до четырех с половиной месяцев. Начало ледостава в первой декаде октября, очищение ото льда происходит не позднее 31 мая. На исследуемой территории характерны огромные наледи. Адыча отличается наибольшей толщиной льда среди всех рек бассейна [2].

Мониторинг и изучение водного режима рек бассейна Яны неразрывно связаны с освоением территорий северо-восточного региона Сибири. Бассейны рек Яны и Индигирки были освоены одними из первых. Сюда прибыли мангазейские казаки под предводительством тобольского казака Ивана Реброва и енисейские служилые люди под руководством Ильи Перфильева. Итогом семилетнего пребывания Реброва на Яне стал сбор ясака для казны, а также создание зимовья в устье Яны.

В 1927 г. была организована Якутская экспедиция под руководством известного советского гидрографа П.К. Хмызникова. Результатом экспедиции явился труд в виде «Атлас р. Яны», опубликованный в 1937 году в Ленинграде АН СССР. Исследования Хмызникова по гидрологии и гидрографии бассейна р. Яны обеспечили регулярное судоходство в Янском бассейне [3].

Систематическое изучение гидрологического режима бассейна Адычи началось с создания гидрологического поста на реке в с. Юрдюк-Кумах. Гидрологический пост Юрдюк-

Кумах, расположенный в 26 км от устья реки, служит опорной точкой для изучения гидрологического режима Адычи. Сеть водомерных постов и станций наблюдения в бассейне интенсивно развивалась в 1940–1950-е годы. Якутское управление по гидрометеорологии осуществляет гидрологический мониторинг водных объектов на всей территории Якутии.

Таблица 1. Список действующих гидрологических постов на территории бассейна реки Адычи

№ п/п	Наименование поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м (БС)	Период действия	
					открыт	закрыт
1	р. Адыча – ГМС Усть-Чаркы	334.00	52800.00	259.19	08.05.1943	Действует
2	р. Адыча – г.п. Юрдюк-Кумах	26.00	89600.00	108.26	09.08.1938	Действует
3	р. Боруулаах – с. Томтор	92.00	7570.00	175.30	25.09.1955	Действует
4	р. Турагас – 1.2 км от устья	1.20	98.00	187.22	20.09.1966	Действует

В настоящее время идет сокращение наблюдательных пунктов, на территории бассейна Адычи осталось всего 4 действующих гидрологических пункта наблюдений (табл. 1), что крайне мало для исследуемого района. В связи с постоянными изменениями в хозяйственной деятельности, сокращением сети наблюдений и ожидаемыми возможными климатическими изменениями в районе исследований возникает необходимость дополнительных исследований и разработки новых методов прогнозирования речного стока, а также переоценки и уточнения существующих исследований.

Материалы и методы исследования. Данные включают в себя среднемесячные и среднегодовые расходы воды на расчетном створе за период наблюдений (более 20 лет), а также данные о среднесуточных расходах воды в многоводные и маловодные годы.

В исследовании использована сравнительно-географическая методика оценки гидро-морфологических характеристик рек, математический подход к расчету среднесноголетнего стока исследуемых водотоков, а также аналитический и обобщающий процесс для формирования выводов. Методика гидрологических расчетов соответствует требованиям СП 33-101-2003 и других нормативных документов [4].

Результаты и обсуждение. Чрезвычайные ситуации гидрологического характера, связанные с затоплением низкочайных участков в результате подъема уровня воды, относятся к числу наиболее распространенных стихийных бедствий во всем мире. Самый первый документально подтвержденный случай наводнения на исследуемой территории произошел на реке Яна в Верхоянске в 1918 году. На протяжении последних десятилетий катастрофические наводнения наблюдались неоднократно, в том числе в 1996, 2004, 2008, 2012, 2018 и 2022 годах [5]. Не смотря на относительно низкую плотность населения на изучаемой территории, в результате наводнений был нанесен значительный ущерб.

Согласно гидрологическому районированию, бассейн Яны относится к IV району, для этого района границы сезонов определены следующим образом: весенне-летний (май-август), осенний (сентябрь-октябрь) и зимний (ноябрь-апрель) [6]. Расчет внутригодового распределения стока в данной работе выполнен методом «реального года» с выделением основных сезонов (рис. 1), лимитирующих периодов и лимитирующих сезонов [7]. В качестве исходных данных для расчетов используются среднемесячные расходы воды в створе с. Юрдюк-Кумах.

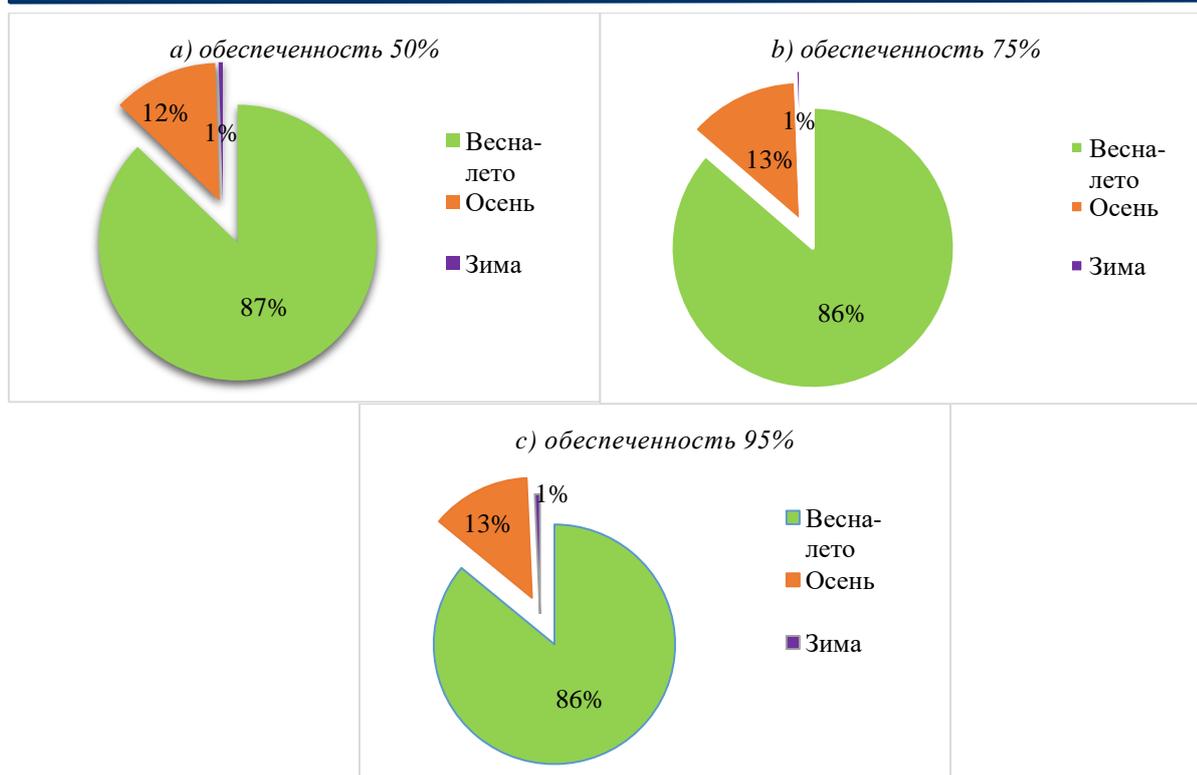


Рис. 1. Процентное распределение стока по сезонам:
а) обеспеченность – 50%, б) обеспеченность – 75% и в) обеспеченность – 95%)

Внутригодовое распределение речного стока в бассейне Адычи, как и во всех реках северного полушария, характеризуется значительной неравномерностью. Наибольший объем годового стока наблюдается в период с мая по август, и менее 1% приходится на весь длительный зимний период (с ноября по апрель). Адыча в период с 1967 по 2017 гг. в нижнем течении не перемерзала только в 1988 г.

Для сравнительного анализа прохождения паводковых волн (доля стока за весенне-летний период составляет около 90%), построен график соответственных уровней (расходов) (рис. 2), метод был предложен Г.П. Калинин [7]. Расстояние между рассматриваемыми пунктами составляет 308 км, а уклон реки 0,49 м/км.

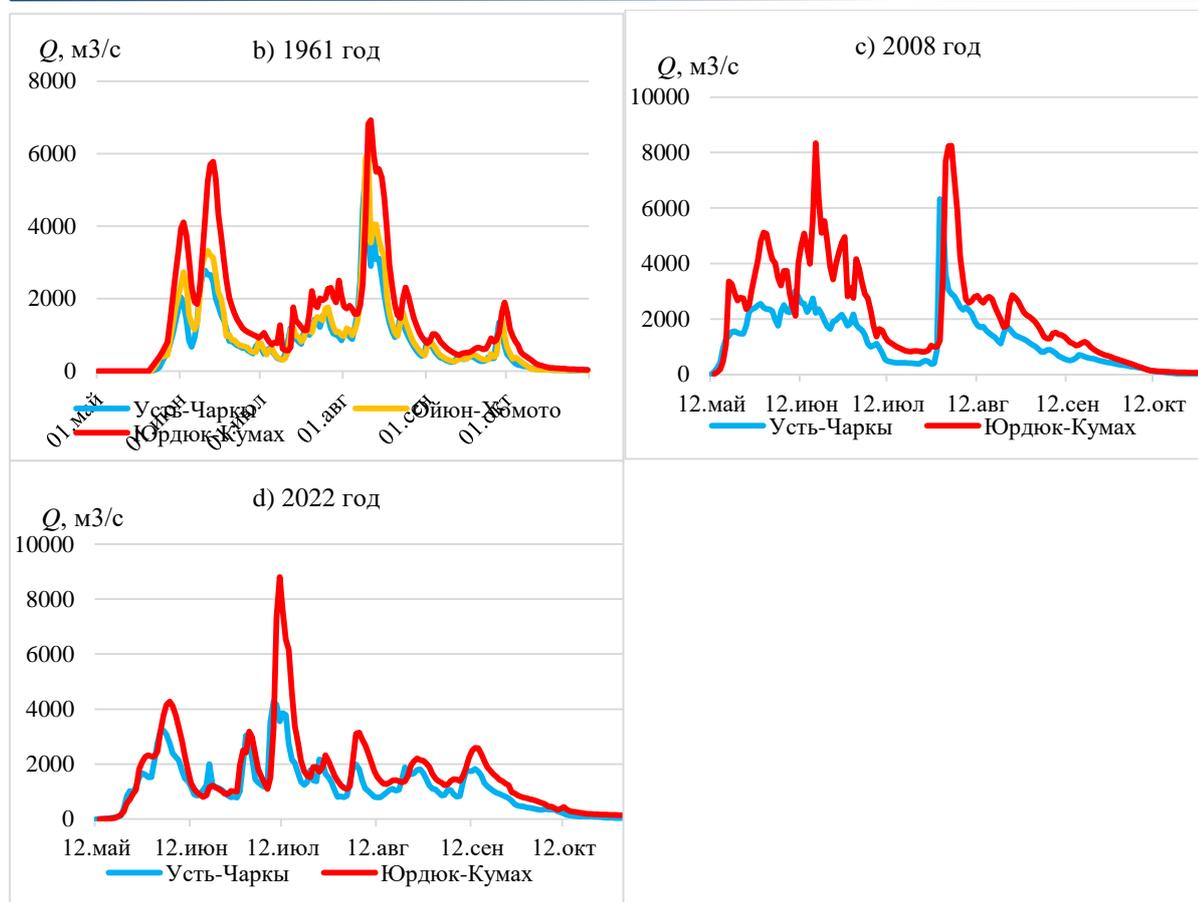


Рис. 2. Прохождение паводковой волны:

а) 1956 – маловодный год, б) 1961 – многоводный год, в) 2008 – многоводный год (наводнение) и д) 2022 – многоводный год (прорыв плотины у с. Бетенкес)

Для сравнения были выбраны маловодный (1956 г.) и многоводный (1961 г.) годы, поскольку водность водотоков меняется из года в год в зависимости от режима осадков. В маловодном периоде отчетливо наблюдаются пик половодья в середине июня и в начале августа подъем воды в результате паводков. В многоводные годы пик волны паводков выше, чем во время половодья (рис. 2). Во время прохождения паводковой волны скорость варьируется от 1,8 до 3,6 м/с. В с. Бетенкес было четыре крупных наводнения: в 1991, 1996, 2008 и 2022 годах. Село Бетенкес находится на левом берегу реки Адыча в 130 км от устья. Из-за обильных дождей в 2022 году произошло резкое повышение уровня воды, и 11 июля вблизи села Бетенкес прорвало дамбу и полностью затопило село.

Вывод. Сравнение прохождения паводковых волн, позволило проанализировать исследуемые участки на предмет синхронности и синфазности. В результате установлено, что на реке Адыча в период прохождения паводковых волн скорость варьируется от 1,8 до 3,6 м/с. Проект строительства Яно-Адычанской ГЭС в начале 1980-х годов мог бы стать реальным решением проблемы наводнений в бассейне реки Яна. В итоге проект был прекращен из-за сложных экономических условий, сложившихся в стране к концу 1990-х годов.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWRS-2024-0031 «Комплексные исследования приоритетов развития энергетики Республики Саха (Якутия) с учетом влияния на окружающую среду и разработка способов, методов повышения энергетической эффективности и надежности локальных энергетических систем в труднодоступных изолированных территориях Севера и Арктики».

Литература

1. Мурзин Ю. А. Природа долины реки Адычи // Наука и техника в Якутии. – 2020. – № 2 (39). – С. 95–97;
2. Адыча // Большая российская энциклопедия. Том 1. Москва, 2005. – 253 с.;
3. Иванова Л.А. Состояние наблюдений и работ на устьевой наблюдательной сети в зоне ответственности Тиксинского филиала ФГБУ ЯУГМС // Труды государственного океанографического института, изд-во Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова (Москва). 2013. – № 214. – С. 127–135;
4. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик. Издание официальное. М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.;
5. Лебедева Л.С. Современные изменения стока в бассейне р. Яна // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 86–106;
6. Константинов А.Ф. Перспективы малого гидроэнергостроительства в бассейне Р. Яны // Вестник СВФУ, 2011, том 8, № 3. – С. 49-53;
7. Ноговицын Д.Д., Никулин К.В., Сергеева Л.П. Исследование скорости руслового добега в условиях естественного и зарегулированного стока р. Вилюй // Успехи современного естествознания. – 2024. – № 7. – С. 70–76.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-337-340

НАНОУГЛЕРОДНЫЕ ДОБАВКИ В БЕТОНЕ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ

Попов Д.Н.¹, Васильева Е.Д.¹, Попов А.С.¹, Лепов В.В.²

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

dmiitryy09@gmail.com

Исследование посвящено применению наноуглеродных добавок, таких как оксид графена и «флеш»-графен, для повышения эффективности зимнего бетонирования в условиях Крайнего Севера. Такие добавки существенно улучшают тепловые и механические свойства бетона, повышая его теплопроводность и прочность. Результаты исследований демонстрируют перспективы использования наноуглеродных добавок в создании энергоэффективных и надежных решений для строительства в суровых климатических условиях.

Введение. Современное строительство требует все более прочных и долговечных материалов, способных выдерживать высокие нагрузки и экстремальные условия эксплуатации. В этом аспекте внимание уделяется развитию модификации бетонных композитов. Одним из самых перспективных направлений является использование наноуглеродных добавок, таких как нанотрубки, графен и углеродные наночастицы, для улучшения свойств бетонов.

Наноуглеродные материалы имеют уникальные физико-химические свойства, включая высокую прочность, термостойкость и электропроводность [1–4], что делает их идеальными для применения в строительной индустрии. Их добавление в бетонные смеси может значительно улучшить прочностные характеристики, сделать материал более устойчивым к растрескиванию и обеспечить дополнительную защиту в условиях Арктического климата.

В данной статье рассматриваются модификаторы на основе оксида графена (ОГ) и «флеш»-графена (ФГ), приводятся результаты исследований, демонстрирующие влияние этих материалов на свойства бетона. Особое внимание уделяется перспективам использования наноуглеродных добавок в различных областях строительства и созданию более устойчивых и долговечных материалов для экстремальных условий холодного Арктического климата.

Материалы и методы. В данной работе были разработаны модификаторы бетона на основе флеш-графена (ФГ) и окисленного графена (ОГ) для повышения прочностных и морозостойких характеристик. ФГ был получен на установке теплового удара из полипропилена и технического углерода, как подробно описано в работе Прокопьева А.Р. и др. [5]. ОГ был синтезирован в УНТЛ «Графеновые нанотехнологии» модифицированным методом Хаммерса. Полученные образцы флеш-графена были охарактеризованы с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) (NTegra Spectra, Зеленоград, Россия) и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (JEOL 7800F, Япония).

Компоненты для приготовления цементной смеси (Таблица 1) смешивались с помощью лабораторного смесителя (ЛС-ЦБ-10, Россия). В процессе уплотнения и дегазации смеси, залитой в формы размером 10x10x10 см, применялся лабораторный вибростол (ВМ-6.4, Россия) согласно стандарту ГОСТ 10180-2012. Взвешивание компонентов осуществлялось на лабораторных весах (AND GF 6100, Япония). Цементная смесь заливалась в формы, содержащие два электрода диаметром 7 мм и герметичный датчик температуры (DS18B20, Китай).

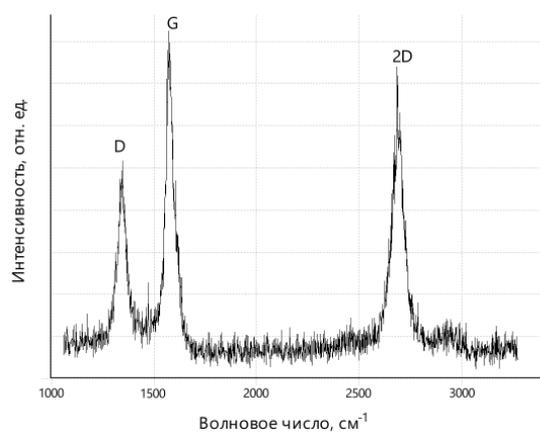
Формы с цементной смесью помещались на улицу при температуре около 0 °С и охлаждались до ~5 °С. Затем на электроды подавался постоянный ток из инверторного сварочного аппарата (Ресанта САИ 190, Латвия), что повышало температуру смеси до ~15 °С. Твердение бетона происходило в камере с постоянной влажностью. Испытания образцов на сжатие проводились на гидравлическом прессе (ИП-1250М-авто, Россия).

Таблица 1. Состав бетонной смеси

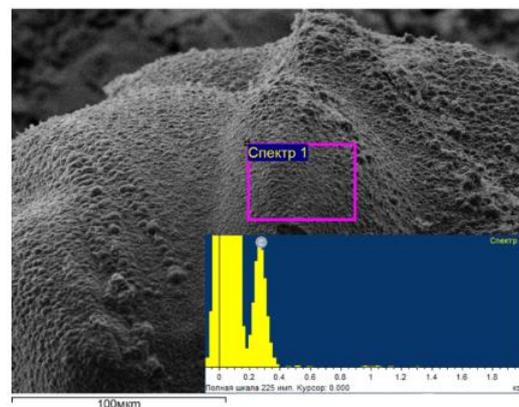
№ п/п	Наименование	Масса, г
1.	Вода	968
2.	Портландцемент	2024
3.	Гравий	4572
4.	Песок	3010
5.	Углеродная добавка	1,6
6.	Полиэтиленгликоль	0,7

Результаты и обсуждения. Флеш-графен был получен из смеси полипропилена и технического углерода в соотношении 1:1 по массе. Эта смесь была помещена в кварцевую трубку и подвергнута воздействию напряжения 300 В с конденсаторной батареи емкостью 0,18 Ф.

На рисунке 1 представлен спектр КРС конечного порошка, образовавшегося после быстрого джоулева нагрева. График показывает, что полученный материал имеет кристаллическую структуру с наличием дефектов. Это можно определить по пикам D, G и 2D, находящимся на частотах 1346 см⁻¹, 1570 см⁻¹ и 2690 см⁻¹ соответственно, что характерно для графито/графеновых структур [5]. Анализ элементного состава выявил наличие углерода в количестве 100%.



а)



б)

Рис. 1. а) Спектр комбинационного рассеяния света полученного ФГ; б) Микроснимок и распределения элементов на поверхности полученного ФГ при увеличении x500

Полученный материал описан как углеродный порошок с графеновыми чешуйками. Для равномерного распределения ФГ и ОГ в бетонной матрице были приготовлены водные суспензии из полученных углеродных материалов с добавлением полиэтиленгликоля (ПЭГ).

На рисунке 2а показано, что цементная смесь с модификаторами охлаждается медленнее. Уменьшение теплопотерь в бетоне при добавлении ОГ и ФГ объясняется их высокой теплопроводностью, которая способствует равномерному распределению тепла и снижению тепловых градиентов. Введение этих материалов в цементную матрицу также улучшает микроструктуру бетона за счет заполнения микропор и трещин [6], что приводит к уменьшению конвекционных теплопотерь. Все эти факторы совместно улучшают теплоизоляционные свойства бетона.

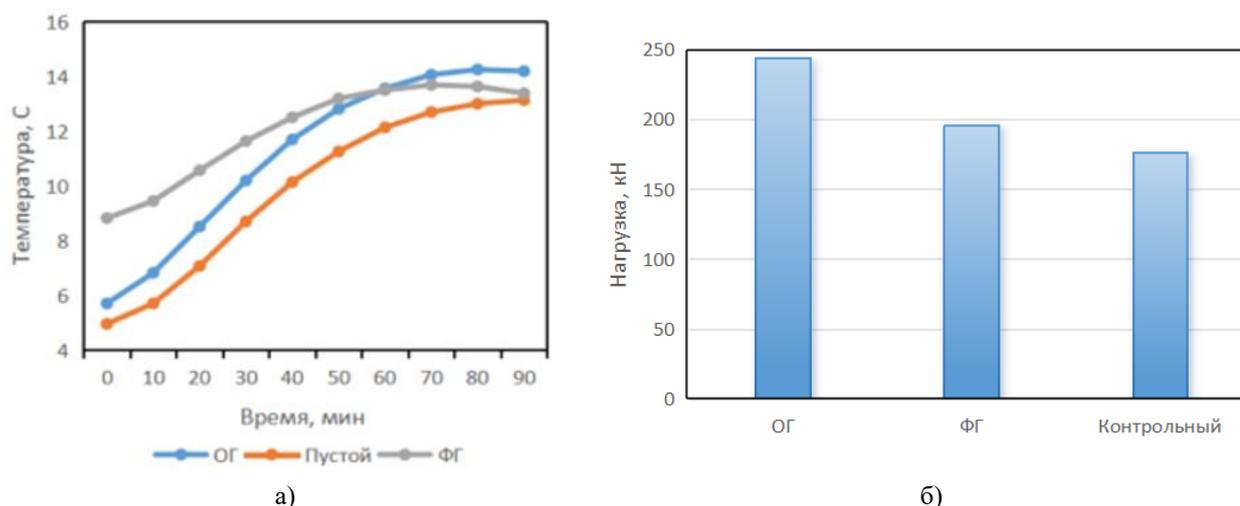


Рис. 2. а) скорость нагрева бетона без (пустой) и с модификаторами ФГ и ОГ б) максимальная нагрузка на сжатие бетонов без (контрольный) и с модификаторами ОГ и ФГ

Добавление модификатора на основе ОГ и ФГ в бетон улучшает его прочность благодаря улучшению межфазных взаимодействий в материале. Прочность на сжатие бетона с модификатором на основе ОГ увеличилась на 40%, а на основе ФГ – на 12% (Рис. 2б). Графеновые наноматериалы улучшают связь между цементной матрицей и наполнителями, что повышает сопротивляемость бетона механическим нагрузкам и снижает вероятность образования трещин. Это не только увеличивает долговечность структуры, но и уменьшает теплопотери, так как ограничение образования трещин снижает пути для утечки тепла.

Заключение. Введение ОГ и ФГ в состав бетонных смесей является перспективным направлением для улучшения теплотехнических и механических характеристик бетона. Благодаря высокой теплопроводности и способности укреплять микроструктуру материала, эти добавки способствуют повышению прочности и долговечности бетонных конструкций, а также существенно снижают теплопотери. Таким образом, графен и его производные могут значительно повысить энергоэффективность и эксплуатационные качества современных бетонных материалов, открывая новые возможности их применения в условиях Арктического и холодного климата.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-21-20122).

Литература

1. Li J. et al. 3D graphene-containing structures for tissue engineering //Materials Today Chemistry. – 2019. – Т. 14. – С. 100199.
2. Zhao H. et al. Graphene-based nanomaterials for drug and/or gene delivery, bioimaging, and tissue engineering //Drug Discovery Today. – 2017. – Т. 22. – № . 9. – С. 1302–1317.
3. Shang L. et al. Graphene and graphene oxide for tissue engineering and regeneration //Theranostic bionanomaterials. – Elsevier, 2019. – С. 165–185.

4. Прокопьев А. Р. и др. Получение турбостратного графена из пластиковых отходов //Вестник Северо-Восточного федерального университета им. МК Аммосова. – 2023. – № . 3 (21). – С. 33–41.

5. Гребенюк Г. С. и др. Интеркалирование графена на карбиде кремния кобальтом //Физика твердого тела. – 2019. – Т. 61. – № . 7. – С. 1374–1384.

6. Krystek M. Mechanical properties of cement mortar with graphene oxide //Architecture, Civil Engineering, Environment. – 2019. – Т. 12. – № . 1. – С. 91–96.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-340-343

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ В СИСТЕМУ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ АРКТИКИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Реев В.Г.^{1,2}, Васильев П.Ф.²

¹ Северо-Восточный федеральный университет, Якутск

² Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск

rvg_1998@mail.ru

В настоящей работе проведен анализ возможности внедрения воздушной тепловой насосной установки (ТНУ) в систему теплоснабжения в изолированных территориях Арктики Республики Саха (Якутия). Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения расхода топлива в отопительных котельных. Проведен климатический анализ, расчет цикла воздушной ТНУ с учетом графика отопительной нагрузки, рассчитан коэффициент преобразования электроэнергии воздушной ТНУ в месяцы функционирования.

В данное время согласно указу Президента Российской Федерации «О стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» поставлены задачи над модернизацией инфраструктуры арктических территорий в целях улучшения качества жизни местного населения.

Республика Саха (Якутия) является регионом с обширными территориями, при этом 13 муниципальных районов входят в состав Арктической зоны Российской Федерации. Площадь данных территорий составляет порядка 1,6 миллионов квадратных километров, при этом следует учесть, что население мало и концентрировано в основном в районных центрах, плотность населения оценивается всего в 0,04 человека на квадратный метр [1]. В связи с этим основной проблемой данных территорий является отсутствие круглогодичной инфраструктуры. ГСМ доставляется сложной транспортной цепью и включается в себя как речную навигацию в летний период, так и транспортировку путем прокладывания автозимников в зимний период. За счет данных факторов конечная стоимость топлива для нужд генерации энергии увеличивается до 2,5 раз, при этом следует учесть и увеличение сроков доставки, достигающих до 2,5 лет для отдельных удаленных районов республики [2, 3].

В целях теплоснабжения в населенных пунктах эксплуатируются порядка 1200 отопительных котельных, в которых функционируют водогрейные котлы с тепловой мощностью 8...40 кВт. Основным топливом служит каменный, бурый уголь, газоконденсатное и нефтяное топливо. Следует учесть, что в некоторых районах оборудование превышает свой ресурс в части износа, таким образом общий износ оборудования на всей территории Арктики республики оценивается в 58,6% [4].

В связи с этим вопрос внедрения ресурсосберегающих технологий и рационального использования топлива в арктических территориях имеет актуальность.

В качестве исходных данных для проведения анализа были получены климатические данные из 7 населенных пунктов арктической части республики (табл. 1) [5].

Таблица 1. Среднемесячные значения температуры воздуха

Нас. пункт	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Тинькс	-31,1	-29,2	-26,4	-18,9	-6,4	3,1	7,6	7,4	1,5	-11	-23,8	-28,2
Усть-Куль	-36,5	-34,8	-26	-14,2	-2,3	7,7	11,2	7,9	0	-14,2	-28,2	-34,6
Черный	-34,2	-32,6	-27,7	-18,7	-5,6	5,8	10,4	7,2	1	-12	-25	-32
Средне-Курья	-36,4	-34,4	-24,4	-12,1	0,7	11,1	14,2	9,8	2,1	-12,1	-26,6	-34,2
Саскунь	-35,8	-34,5	-26,2	-15,2	-4,8	5,8	10,8	7,3	-0,3	-14,5	-27,9	-33,8
Верхоянск	-47	-42,7	-29,8	-12,9	2,8	13	15,2	10,8	2,3	-14,9	-36,7	-43,6
Олекма	-37,4	-32,9	-22,2	-12,2	-1,9	9,3	14,9	10,8	2,1	-11,6	-28,5	-33,3

Для проведения анализа возможности внедрения воздушной ТНУ предложено усреднить значения температуры воздуха в целях упрощения процесса анализа (рис. 2).



Рис. 1. График средней температуры воздуха на территории Арктики Республики Саха (Якутия)

Режим работы воздушного ТНУ в зимний период ограничивается температурой воздуха. В настоящее время известны модели воздушных ТНУ, работающих до $-25...-20$ градусов Цельсия [6, 7]. Исходя из этого следует, что воздушные ТНУ в арктической территории Республики Саха (Якутия) могут функционировать с апреля по октябрь. Далее для проведения более точного анализа были проведены расчеты цикла воздушного ТНУ с учетом графика отопительной нагрузки (рис. 2). При проведении расчетов были использованы программы MathCad и CoolPack.

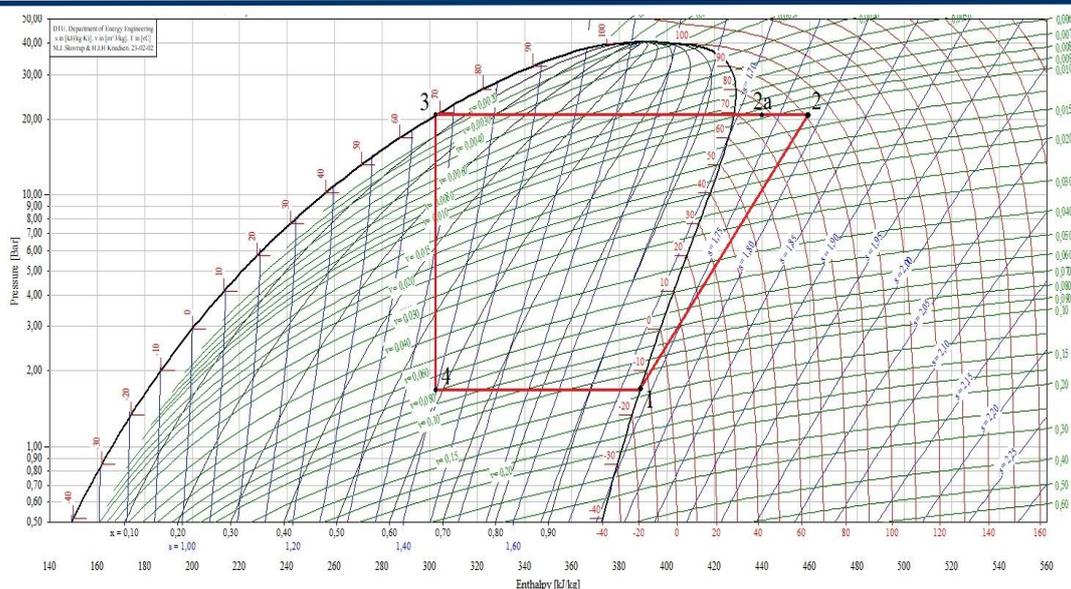


Рис. 2. Диаграмма цикла воздушного ТНУ с учетом графика отопительной нагрузки

Далее исходя из параметров фреона в ключевых точках цикла был рассчитан коэффициент преобразования электроэнергии (КПЭ) ТНУ (рис. 3).

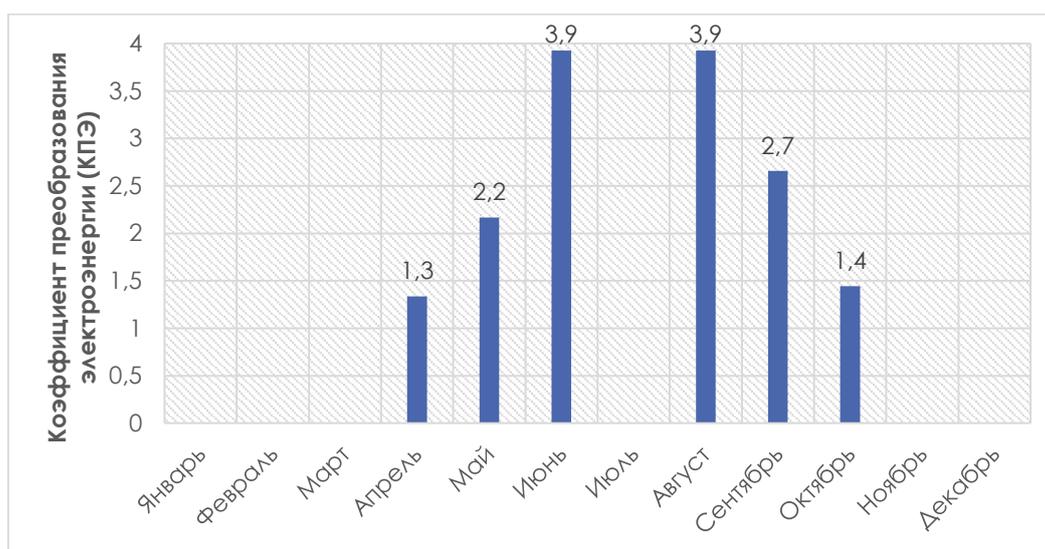


Рис. 3. График коэффициента преобразования электроэнергии ТНУ в месяцы работы

Как видно из графика наибольшее значение КПЭ наблюдается в теплые месяцы, связано с температурой окружающей среды, чем теплее источник низкопотенциальной теплоты, тем эффективнее работа ТНУ, так как затрачивается меньше электрической энергии на работу привода компрессора.

Литература

1. Глотов А. В., Меркульева А. А. Проблемы и перспективы развития изолированных энергосистем Дальнего Востока: на примере энергосистемы Республики Саха (Якутия) // Вестник МФЮА.
2. К арктическим и северным относятся 13 районов республики [Электронный ресурс]. URL: <https://arktika.sakha.gov.ru/news/front/view/id/2601723> (дата обращения 22.05.2023).
3. Реев В. Г., Гунасекара У. Д. С. Анализ перспективы внедрения тепловой насосной установки в систему теплоснабжения в условиях Севера и Арктики Республики Саха (Якутия) // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2023. Том 8, № 4 (34). С. 107–112.

4. Слободчиков Е. Г., Мухоплев С. И. Состояние коммунального комплекса арктической зоны Якутии / Е. Г. Слободчиков // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. С. 1–11.
5. Данные погоды ФГБУ Якутское УГМОС [Электронный ресурс]: URL: <https://ykuhydromet.ru/o-pogode/> (дата обращения 02.05.2024).
6. Коверина А.Ю., Кретова А.Ю. Анализ стоимости тепловых насосных установок и тарифы на электрическую энергию // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 01–20 мая 2017 года. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 4930–4934.
7. Максимов Б.Н. Озонобезопасные хладоны в России // Fluorine Notes. 2002. V. 2 (21).

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-343-350

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОСТНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ПРИМЕРЕ СВАРКИ

Садыков Р.Х., Стаценко В.Н., Гридасов А.В.

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

sadykov_rh@bk.ru, vladsta@mail.ru, gridasov.av@dvfu.ru

Для снижения концентрации вредных аэрозолей (мелкодисперсных частиц) в промышленности в период освоения Арктики и северных территорий предлагается использование жидкостной нейтрализации, при которой организовано пленочное течение жидкости по вертикальным пластинам. При движении газов или загрязненного аэрозолями воздуха между пластинами пленка жидкости интенсивно абсорбирует газообразные и твердые загрязняющие вещества. На экспериментальном стенде проведено исследование интенсивности абсорбции в пленку воды сварочных аэрозолей. В экспериментах изменялись скорость газа, расход жидкости, концентрация вредных веществ в газе. В результате анализа полученных результатов было составлено обобщение полученных результатов в широком диапазоне изменения концентраций газа, расходов жидкости и скорости движения, загрязненного аэрозолями газа; обобщение получено в виде зависимости между числами Шервуда, Рейнольдса и Шмидта. По этим зависимостям возможно рассчитать коэффициенты массоотдачи при различных длинах контакта пленки воды, газа, аэрозолей и габаритные характеристики нейтрализатора вредных выбросов.

Ввиду комплексной разведки и добычи полезных ископаемых в Арктике, открытия северного морского пути, строительства новых объектов инфраструктуры промышленности и жизнедеятельности, основной фокус внимания сместился на экологическую безопасность и сохранения природного северного наследия нашей страны. Основные исследования в области экологии и безопасности жизнедеятельности, которые проводят ведущие институты нашей Родины, связаны с исследованием влияния вредных факторов на здоровье человека и предотвращением загрязнения как почвы, так и воздушного пространства. Более 70–80% загрязняющих веществ, которые проникают в почву через воздушное пространство в виде различных мелких твердых частиц, газов, выделяются за счет работы различной техники, энергетических установок, судов снабжения, строительной и перерабатывающей техники, ремонтных работ, сварки, и выбросов с различных промышленных объектов.

Выбросы образуются при различных видах промышленной или иной техногенной деятельности и поступают в воздух. Далее твердые мелкодисперсные частицы аэрозолей осаживаются на различных поверхностях и почве. Они подразделяются на виды [1, 2]:

– газовая составляющая выбросов (ГСВ) – это токсичные газы, выделяющиеся при промышленной или иной техногенной деятельности, образующие с воздушной средой газовую смесь;

– технические аэрозоли (твердая составляющая выбросов – ТСВ) – твердые токсические вещества, выделяющиеся при промышленной или иной техногенной деятельности и образующие с воздушной средой аэрозольную смесь.

ГСВ способны адсорбироваться на поверхности твердых частиц и внутри их скоплений. При этом локальные концентрации газов, адсорбированных на частицах ТСВ, могут существенно превышать их концентрации непосредственно в ГСВ. Выпускные газы транспортных энергетических установок также содержат кроме твердых частиц несгоревшего топлива аналогичные вредные газообразные продукты сгорания. Из применяемых методов жидкостной нейтрализации наибольшую степень извлечения токсичных газов и аэрозолей имеет химическая абсорбция, а наибольшее распространение, как наиболее простой, дешевый и доступный имеет физическая абсорбция, абсорбентом в которой используется обычная пресная вода [1–6].

Жидкостные пленочные массообменные аппараты широко используются в химической технологии в качестве абсорберов газообразных сред и аэрозолей в жидкость, нисходящее движение которой организуется внутри вертикальных труб или на плоской вертикальной поверхности [7–9]. Такие аппараты возможно использовать и для очистки уходящих газов и аэрозолей, выделяемых, например, при сжигании органического топлива или при проведении различных технологических операций, связанных с выбросами значительного количества токсичных газов и аэрозолей [10–12].

Цель настоящей статьи – исследовать и обобщить в критериальной форме интенсивность снижения концентрации твердых частиц на примере сварки. Сварка – это многогранный процесс получения монолитного соединения путем установления межатомных связей по средством местного нагрева, пластической деформации или совместном их воздействии для ремонта и возведения металлических конструкций. Для реализации этой цели разработаны методики экспериментов и методология их проведения, на основе полученных экспериментальных результатов разработана методика их критериальной обработки и получены численные значения критериальных зависимостей.

В нашей работе для очистки воздуха от газовых выбросов и аэрозолей (мелкодисперсные частицы) предлагается использование жидкостного пленочного нейтрализатора [7–10, 14]. Эта установка представляет собой закрытый корпус с вертикально установленными пластинами, в верхней части которых закреплены пленкообразующие устройства, с их помощью жидкость растекается по обеим сторонам пластин в виде пленки. Загрязненный мелкодисперсными частицами газ поступает в корпус снизу через входной патрубок и движется вверх между пластинами. Благодаря большой площади контакта пленка жидкости как абсорбент интенсивно поглощает газообразные и твердые загрязняющие вещества и, стекая вниз по пластинам, удаляется из корпуса нейтрализатора. Жидкость после очистки и нейтрализации может подаваться на пленкообразующие устройства для повторного использования. Нейтрализаторы такого типа обладают существенным достоинством – низким гидравлическим сопротивлением, малым брызго- и влагоуносом, что является важным фактором для создания портативных устройств очистки газов.

Для изучения рабочих процессов, происходящих в жидкостном пленочном нейтрализаторе, проведены исследования на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлись латунные пластины длиной 1100 и 600 мм [14]. Они жестко закреплены в корпусе с патрубками входа загрязненного и выхода очищенного воздуха. Подача воды на латунную пластину осуществляется через пленкообразующее устройство, пленка воды движется вниз по поверхности рабочей пластины, очищаемый воздух движется вверх, при их контакте происходят процессы абсорбции газов в пленку жидкости. Для измерения скорости воздуха используется трубка Прандтля с U-образным жидкостным манометром, расход жидкости определяется объемным способом и контролируется по жидкостному манометру. Размеры и количество мелкодисперсных частиц определяется переносным счетчиком частиц TSI AeroTrak 9306-V2 (Рисунок 1).

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации загрязнений мелкодисперсными твердыми частицами длины поверхности рабочей пластины. В настоящей работе в качестве аэрозольного загрязнения воздуха использовались аэрозоли сварочных материалов, электродов и сварочных проволок



Рис. 1. Переносной счетчик частиц TSI AeroTrak 9306-V2

Эксперименты, проведенные нами по отбору проб аэрозолей, производились с отечественными электродами типа УОНИ13/55 и МР-3С, а также с импортными электродами J38, J421 (производство КНР), KST-309L, КК-50N, CR-13, E6103/S LF (Республика Корея), ОК46 (Швеция), OMNI-46 (США) [6]. Измерения концентраций аэрозолей проводились в зоне дыхания сварщика при его интенсивной работе. Отборы проб производились с помощью фильтров типа АФА-ХП-20 (фильтр Петрянова), размещенных в аллонжах, для дозированного отбора воздуха через фильтры использовался аспиратор АМ-5.

Анализ этих исследований показывает следующее:

1. Наибольшие выделения аэрозолей происходит у электродов марки ОК46 (800 мг/м^3) и КК-50N (640 мг/м^3).
2. Наименьшие выделения аэрозолей происходит у электродов марки КК-50N (60 мг/м^3) и KST (80 мг/м^3).
3. У остальных электродов концентрация аэрозолей составляет значения в диапазоне $120\text{--}420 \text{ мг/м}^3$.

В результате оптических исследований фильтров, содержащих аэрозоли, было выявлено, что аэрозоли содержат металлические частицы с размерами $100\text{--}350 \text{ мкм}$ (они имеют характерный металлический отблеск) и неметаллические частицы, которые имеют темно-коричневый цвет и, в основном, имеют правильную сферическую форму и размеры $7\text{--}25 \text{ мкм}$.

Анализ этих данных показывает следующее:

1. Металлические частицы могут приобретать чисто сферическую форму, а также форму в виде неправильных эллипсоидов.
2. У электродов марок МР-3С, KST, КК-50N, J421 и OMNI-46 средние размеры металлических частиц составляют $170\text{--}214 \text{ мкм}$, для остальных электродов эти размеры составляли $126\text{--}165 \text{ мкм}$. При этом разброс результатов (среднее квадратичное отклонение) относительно среднего арифметического для этих данных составляет $25\text{--}30\%$.
3. Для всех электродов средние размеры неметаллических частиц составляют $7,5\text{--}14 \text{ мкм}$, при этом среднее квадратичное отклонение для этих данных составляет $30\text{--}40\%$.

Для исследования количества аэрозольных частиц, образующихся при электродуговой сварке электродами основного (марки: ОК76.35, ОК74.70, СН608R и LB52U) и рутилового (марки: Kiswell, CR-13, SF46.60 и J38.12) типа использовался универсальный счетчик частиц TSI AeroTrak 9306-V2. Данный счетчик производит подсчет частиц одновременно в 6 размерных диапазонах. Его основные технические характеристики: скорость отбора пробы $2,83 \text{ л/мин}$, диапазон показаний от 0 до 100 000, размеры регистрируемых частиц $0,3; 0,5; 1; 3; 5; 10 \text{ мкм}$, относительная погрешность счетной концентрации $\pm 20\%$.

Данные по количеству и размерам частиц позволили рассчитать их относительную массу в процентах, при этом регистрируемые размеры принимались за эквивалентный диаметр, форма частицы – сфера.

Результаты измерений относительных значений количества частиц и их массы для электродов основного типа ОК76.35 и ОК74.70 при разных значениях рабочего тока представлены на рисунке 2. Аналогичные результаты получены для остальных электродов основного типа.

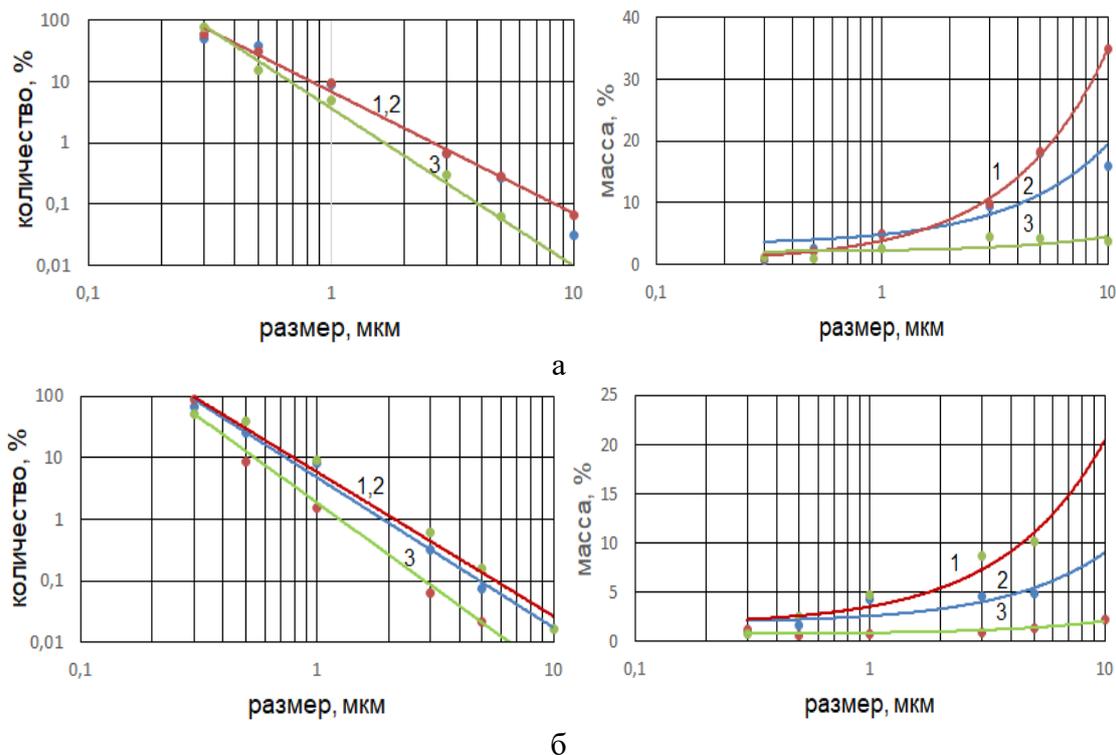


Рис. 2. Количество и масса частиц размером 0,3–10 мкм, электроды ОК76.35 (а) и ОК74.70 (б), $d=3,2$ мм
1 – $I=110$ А; 2 – 100 А; 3 – 85 А

Анализ этих результатов показывает следующее:

1. Наибольшее количество частиц (близкое к 95–98%) имеет минимальный размер – около 0,3 мкм, количество частиц с размером около 10 мкм составляет всего 0,01–0,1%.

2. Наибольшую массу в выбросах имеют аэрозоли с максимальным измеряемым размером – около 10 мкм, на максимальных рабочих токах она составляет 20–35% от общей массы выбросов.

3. С увеличением рабочего тока количество частиц и, соответственно, их масса увеличивается, особенно для частиц максимального размера, частицы минимального размера составляют по массе 2–5%, хотя их количество несопоставимо больше.

4. Зависимость количества частиц от их размера имеет степенной характер, а зависимость массы от размера – линейный характер.

5. Электроды с рутиловым покрытием имеют аэрозольные выбросы по массе меньше на 30–50% по сравнению с электродами с покрытием основного типа.

Основной задачей исследований является определение зависимости изменения концентрации аэрозольных загрязнений по длине рабочей пластины. Эти загрязнения моделируются порошками для газотермического напыления с разными насыпными плотностями: АОб ($\rho=1830$ кг/м³), ПХ1М ($\rho=3320$ кг/м³), ПТЮ5Н ($\rho=3830$ кг/м³), керамика ($\rho=3980$ кг/м³). Порошки перед экспериментом просушивались, просеивались, в результате оптических измерений оценивались размеры гранул, которые не превышали 140–170 мкм со средним квадратичным отклонением 20–25%. Дозированная подача порошков в воздушный поток рабочего канала производилась через входной патрубком компрессора.

Отборы проб на концентрацию аэрозолей производятся с помощью фильтров типа АФА-ХП-20 (фильтр Петрянова), закрепленных в 4 аллонжах, закрепленных в крышке рабочего канала. Отбор воздуха через фильтр обеспечивался электромеханическими аспираторами 822 серии. Расход воздуха через каждый отбор не превышал 10–12% от его расхода в рабочем канале. В качестве адсорбирующей жидкости использовалась отстоянная пресная вода.

Результаты экспериментов и обработка результатов:

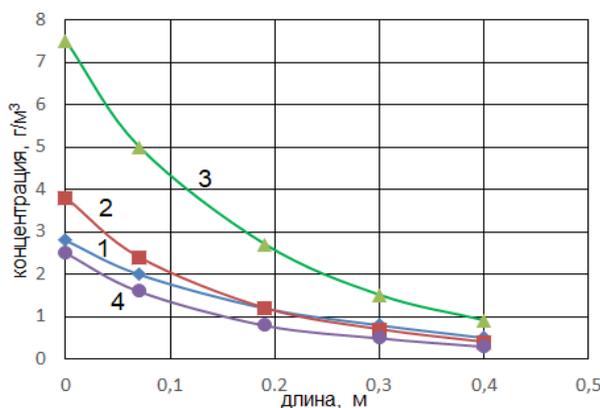


Рис. 3. Изменение концентрации аэрозолей по длине контакта: а – измеренное, б – относительное, при скорости воздуха $V_{\text{воз}}=0,5$ м/с: 1 – АО6; 2 – ПХ1М; 3 – ПТЮ5Н; 4 – керамика

Обобщение результатов исследований абсорбции газов в пленку жидкости произведено в системе безразмерных критериев с учетом размерных параметров пленочного течения жидкости, представленного в [15].

В качестве характеристик процесса абсорбции используются критерии Re_{Γ} (газовый) и $Re_{\text{пл}}$ (пленочный).

$$Re_{\Gamma} = \frac{V_{\text{воз}} d_{\text{экв}}}{\nu_{\Gamma}} \quad (1)$$

$$Re_{\text{пл}} = \frac{\Gamma_v}{\nu_{\text{пл}}} \quad (2)$$

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (3)$$

$$\Gamma_v = \frac{G_v}{\Pi} \quad (4)$$

где: $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр, м; S – площадь сечения рабочего канала, м^2 ; Γ_v – орошение пластины, $\text{м}^2/\text{с}$; G_v – объемный расход пленки, $\text{м}^3/\text{с}$; Π – смоченный периметр, м; ν_{Γ} , $\nu_{\text{пл}}$ – кинематические вязкости воздуха и пленки, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$Sh = A Re_{\Gamma}^m \cdot Re_{\text{пл}}^n \cdot Sc^p \cdot \left(\frac{\delta}{L}\right)^k \quad (5)$$

$$Sh = \beta \cdot \delta / \rho \cdot D \quad (6)$$

$$\beta = g_{\Gamma} / \Delta C \quad (7)$$

$$g_{\Gamma} = G_{\text{аб}} / S_{\text{аб}} \quad (8)$$

$$S_{\text{аб}} = \Pi \cdot \Delta L \quad (9)$$

$$Sc = \nu_{\text{пл}} / D \quad (10)$$

Здесь Sh – число Шервуда; β – коэффициент массоотдачи, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; g_{Γ} – удельный поток абсорбированного газа, $\text{кг}/(\text{м}^2/\text{с})$; $G_{\text{аб}}$ – поток абсорбированного газа, $\text{кг}/\text{с}$; $S_{\text{аб}}$ – площадь абсорбции, м^2 ; Π – смоченный периметр, м; ΔL – участок канала, м; ΔC – концентрационный напор (движущая сила абсорбции), $\text{кг}/\text{кг}$; ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ – толщина пленки, м; L – длина контакта, м; Sc – число Шмидта; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Составляющие критериев Re_Γ и $Re_{пл}$ представлены в уравнениях (1–2). В расчетах критериев Re_Γ , $Re_{пл}$ и Sc использованы экспериментальные и справочные данные.

Поток абсорбированного аэрозоля $G_{абм}$ (кг/с) на каждом участке рабочего канала ΔL находится по измеренным значениям его концентрации в потоке воздуха перед C_{i-1}^Γ и за участком C_i^Γ (кг/м³)

$$G_{абм} = G_{воз}(C_{i-1}^\Gamma - C_i^\Gamma). \quad (11)$$

Здесь $G_{воз}$ – расход воздуха в рабочем канале, м³/с.

Концентрация абсорбированного аэрозоля в пленке воды в конце участка $C_i^{пл}$, (кг/кг) и концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по следующим зависимостям

$$C_i^{пл} = C_{i-1}^{пл} + \frac{G_{абм}}{G_{плм}} \quad (12)$$

$$\Delta C = C_i^\Gamma - C_i^{пл} \quad (13)$$

Здесь $C_{i-1}^{пл}$ – концентрация абсорбированного аэрозоля в пленке перед участком рабочего канала, кг/кг; C_i^Γ , $C_i^{пл}$ – значения концентраций аэрозоля в воздухе и пленке в конце участка, кг/кг; $G_{плм}$ – массовый расход пленки воды, кг/с.

При расчете средних значений коэффициента массоотдачи на участках разной длины контакта концентрационный напор ΔC (кг/кг) рассчитываются по средним значениям концентраций в воздушной смеси аэрозоля и пленки.

При противоточном движении воздуха в смеси с аэрозолем и пленки воды расчет начальной (по ходу воздуха) концентрации абсорбированного аэрозоля в пленке воды (в нижней части рабочей пластины) производился по массовому балансу по зависимости

$$C_{0м}^{пл} = \frac{G_{воз}(C_0^\Gamma - C_L^\Gamma)}{G_{плм}}, \text{ кг/кг} \quad (14)$$

Здесь C_0^Γ , C_L^Γ – концентрация аэрозолей в воздухе в начале и конце рабочего канала, кг/м³. Конечная концентрация абсорбированного аэрозоля в пленке воды $C_{плL}^{пл}=0$.

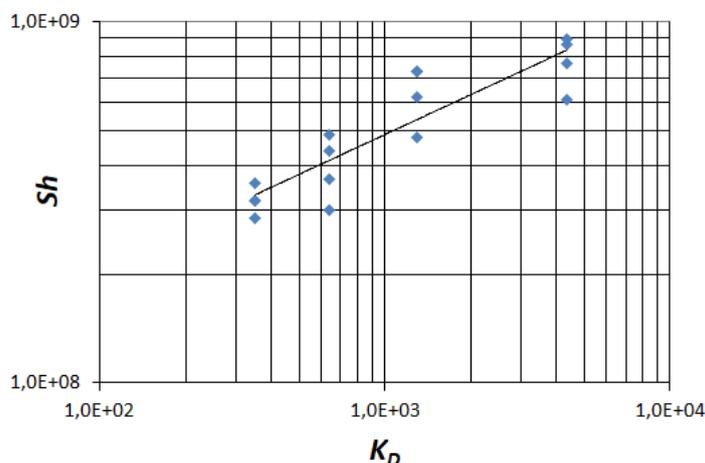


Рис. 4. Обработка экспериментальных данных по локальным значениям абсорбции аэрозолей в безразмерных координатах

Таблица 1

Аэрозоли		Коэффициенты диффузии			
Размер частиц, мкм	МКМ	0,1	1	10	100
$D, \text{ м}^2/\text{с}$	Воздух	$6,1 \times 10^{-10}$	$2,7 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-12}$	-
Критерий Sc	Воздух	$2,5 \times 10^4$	$5,6 \times 10^5$	$6,4 \times 10^6$	-
$D, \text{ м}^2/\text{с}$	Вода	$7,96 \times 10^{-15}$	$3,5 \times 10^{-15}$	$3,13 \times 10^{-16}$	-

Результаты обработки наших данных по локальным значениям абсорбции аэрозолей в пленке пресной воды в широком диапазоне изменения критериев Re_Γ , $Re_{пл}$ представлены на рисунке 4. Критерий K_D , представленный на графиках представляет собой комплекс критериев:

$$K_D = Re_\Gamma^{0,6} \cdot Re_{пл}^{0,15} \cdot Sc^{0,33} \left(\frac{\delta}{L} \right) \quad (15)$$

Критериальное уравнение, описывающее результаты наших экспериментов для локальных значений на каждом участке рабочего канала имеет вид:

$$\text{Sh} = 4 \cdot 10^7 \text{Re}_r^{0,22} \cdot \text{Re}_{\text{пл}}^{0,055} \cdot \text{Sc}^{0,12} \cdot \left(\frac{\delta}{L}\right)^{0,366} \quad (16)$$

Погрешность обобщения наших данных составляет $\pm 15\%$.

Полученные критериальные зависимости позволяют рассчитать значения коэффициентов массоотдачи и поток абсорбции аэрозолей разного размера и разной плотности в пленку жидкости по длине контакта и, соответственно, габаритные характеристики жидкостных пленочных массообменных аппаратов в широком диапазоне изменения концентраций аэрозолей, расходов жидкости и скорости движения загрязненного воздуха или газа.

В результате анализа процесса абсорбции окиси- и двуокиси углерода, в пленочном жидкостном аппарате можно сделать вывод, что при использовании воды в качестве абсорбирующей среды оптимальная скорость движения газов составляет $V_{\text{воз}} = 0,8\text{--}1$ м/с, оптимальное значение орошения составляет $\Gamma v = (3,3\text{--}3,8) \times 10^{-4}$ м²/с, при этом концентрация газов СО и СО₂ снижается на 30–45%, SO₂ – в 1,5–2 раза.

Этот метод может использоваться для очистки технологических выбросов, а также выпускных газов от различных энергетических установок, в которых обычно также содержатся токсичные газообразные компоненты.

Основной задачей следующих исследований является определение изменения концентрации таких токсичных технологических выбросов как NO и NO₂, а также аэрозольных загрязнений от длины контакта при жидкостной пленочной нейтрализации. Результаты этих исследований будут обобщаться в виде критериальных зависимостей [16].

Литература

1. Седнин В. А., Игнатович Р. С. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. № 65(6). С. 524–538.
2. Рамм, В.М. Абсорбция газов / В.М. Рамм. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 655 с.
3. Пименова, Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода / Т.Ф. Пименова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 208 с.
4. Очистка технологических газов / под ред. Т.А.Семеновой. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1977. 488 с.
5. Старкова А.В., Махоткин А.Ф., Балыбердин А.С., Махоткин И.А. Механизм и кинетика хемосорбции углекислого газа водным раствором карбоната натрия. Вестник Казанского технологического университета, 2011, С.76–81.
6. Yu, C.-H. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption / C.-H. Yu, C.-H. Huang, C.-S. Tan // Aerosol Air Qual. Res. 2012. Vol. 12. Iss. 5. P. 745–769.
7. Бабак В.Н. Массообмен в орошаемых плоскопараллельных каналах при прямоочном ламинарном движении жидкости и газа / Теоретические основы химической технологии. 2019. Том 53, № 6, С. 634–646.
8. Babak V.N. Two-phase mass exchange in irrigated tubular packing for the concurrent laminar phase flow // Theor. Found. Chem. Eng. 2015. V. 49. № 5. P. 636.
9. Генералов М.Б., Александров В.П., Алексеев В.В. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств, 2004, 832 с.
10. Бернавская М.В., Стаценко В.Н. Комплексное решение проблемы экологической безопасности автономных гидротехнических сооружений. Дистанционные методы, технические средства и алгоритмы в прикладных задачах исследования природных сред. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск), 2014, № 12, С.3–12.
11. Вострикова М.А. Анализ эффективности работы систем очистки дымовых газов морских судов от примесей при использовании абсорберов и скрубберов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015, № 4, С.66–69.

12. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение: монография. Томск: Изд-во томского политехнического университета, 2011, 213 с.
13. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
14. Стаценко В.Н., Еременко М.А., Бернавская М.В. Метод жидкостной пленочной нейтрализации токсичных газовых выбросов. Вестник инженерной школы ДВФУ, 2020, № 2(43), С.88–95.
15. Накоряков В.Е., Григорьева Н.И. О совместном тепломассопереносе при пленочной абсорбции// Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979, С. 278–284.
16. Стаценко В.Н., Садыков Р.Х., Гридасов А.В. Исследование жидкостной пленочной нейтрализации сварочных газовых выбросов (научно-технический журнал университета им. Вернадского) № 1 (91) С.25–34.

DOI: 10.24412/ci-37269-2024-1-350-353

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ И ДОБАВОК, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Салтыкова А.Л.¹, Вит А.А.¹, Далбаева Е.А.^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

² Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

ny94@list.ru

*Изучено взаимодействие микроорганизмов с различными компонентами полимерных композиционных материалов. Результаты микробиологических исследований показали, что образцы эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 и ускорителя реакции полимеризации УП-606/2 характеризуются стойкостью к биологическим воздействиям со стороны микроорганизмов. Однако, выявлено, что отвердитель изо-МТГФА содержит актинобактерии рода *Streptomyces* (*S. albus*), что может свидетельствовать о возможном его загрязнении на этапах производства или хранения. Биологическое загрязнение отвердителя представляет потенциальную угрозу для процесса полимеризации, что может привести к деградации полимерных композиций. Такие изменения могут негативно сказаться на качестве и производительности конечного продукта. Важно уделять внимание контролю за чистотой компонентов и технологических процессов при получении сырья для обеспечения качественной и стабильной производственной практики и изготовления полимерных композиционных материалов.*

Исследование устойчивости полимерных композиционных материалов (ПКМ) после воздействия абиогенных и биогенных факторов, базируется на многоуровневом анализе качественного состава веществ, входящих в рецептуру изделий до их смешивания в необработанном состоянии. И после экспериментального воздействия на них комплекса агентов, провоцирующих старение, а также биоповреждения под воздействием различных видов микроорганизмов проводится оценка изменений в свойствах материалов [1, с. 162–166]. Эпоксидные смолы, как органические соединения, могут служить источником энергии и питания для различных бактерий, плесеней и дрожжеподобных грибов, способствуя биозаражению и биodeградации. Оценка участия микроорганизмов в этих процессах является актуальной задачей в области разработки ПКМ, устойчивых к биологическим воздействиям, а также в поиске методов для ускорения процессов биodeградации отходов производства или их утилизации после завершения срока эксплуатации [2, с. 1572–1583].

Цель данного исследования заключалась в изучении взаимодействия микроорганизмов с эпоксидной смолой и добавками, применяемыми при изготовлении полимерных композитов.

Задачи исследования:

1. Определить виды микроорганизмов, способных вызывать биозаражение эпоксидной смолы и добавок, применяемых при изготовлении ПКМ;
2. Изучить условия, способствующие развитию микробиологического заражения эпоксидной смолы и добавок, применяемых при изготовлении полимерных композитов, в процессе их хранения и производства ПКМ;
3. Изучить механизм микробиологического заражения эпоксидной смолы и добавок, применяемых при изготовлении ПКМ.
4. Оценить влияние микробиологического заражения на свойства эпоксидной смолы и добавок, используемых для изготовления полимерных композитов.
5. Провести анализ последствий микробиологического заражения для промышленного производства и предложить рекомендации по улучшению качества компонентов, используемых для изготовления полимерных композитов.

Материалами для исследования служили:

- эпоксидно-диановая смола марки ЭД-22 (ГОСТ 10587-84);
- отвердитель Изо-МТГФА (ТУ 2418-399-05842324-2004) производства ОАО «Стерлитамакский нефтехимический завод»;
- ускоритель реакции полимеризации УП-606/2 (ТУ 2494-630-11131395-2006) производства ОАО «ХИМЭКС Лимитед».

Методы исследования. Для выделения микроорганизмов, вызывающих заражение исследуемых образцов, использовали метод посева на жидкие и плотные селективные питательные среды, включая: мясопептонный бульон (МПБ) для культивирования гетеротрофных бактерий; среду Чапека-Докса (СЧД) для роста дрожжей и микроскопических грибов и крахмал-аммиачный агар (КАА) для накопления актинобактерий [3, 394 с.; 4, 464 с.; 5, 175 с.].

Культивирование проводили в стационарных условиях и в условиях постоянной аэрации в качалочной установке УМВТ-12250 при 180–190 об/мин в течение 24 часов – для МПБ; 5 суток – для СЧД; 14 суток – для КАА при температуре плюс 20±1 °С и плюс 37±1 °С [6, 131 с.].

Идентификацию выделенных культур проводили на основе изучения их фенотипических свойств (биохимических, тинкториальных, культуральных, морфологических, микроскопических), используя общепринятые в микробиологии определитель бактерий Берджи [7, 104 с.; 8, 248 с.].

Результаты исследования. Микробиологические исследования показали, что образцы эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 и ускорителя реакции полимеризации УП-606/2 биоустойчивы по отношению к микроорганизмам, в то время, как в отвердителе изо-МТГФА были выявлены актинобактерии рода *Streptomyces* (*S. albus*), что указывает на его заражение на этапах производства или хранения. Биозагрязнение отвердителя может негативно сказаться на процессе полимеризации и, как следствие, привести к разрушению отвердителя. Это может негативно отразиться на качестве и эффективности конечного продукта.

Микробиологические исследования показали, что образцы эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 и ускорителя реакции полимеризации УП-606/2 оказались биоустойчивыми по отношению к микроорганизмам. В то же время, было выявлено, что в отвердителе присутствуют актинобактерии рода *Streptomyces* (*S. albus*), что может свидетельствовать о заражении на стадиях производства или хранения. Биозагрязнение отвердителя имеет потенциал негативного влияния на процесс полимеризации, что, в конечном итоге, может привести к деградации ПКМ, в которых использовался исследуемый изо-МТГФА.

Характеристика выделенной культуры *Streptomyces albus*. Выделенная культура *Streptomyces albus* (*S. albus*) образует хорошо развитые гифы диаметром около 1,5–2,0 микрон, которые представляют каркасный мицелиевый субстрат. Поверхность колоний пылеватая белого цвета. Клетки *S. albus* окрашиваются по Граму положительно. Это связано с наличием в

его клеточной стенке пептидогликана, который удерживает частицы красителя. В качестве основного элемента для осуществления метаболических процессов использует кислород воздуха, поэтому выделенная культура является аэробной. *S. albus* синтезирует фермент каталазы, что позволяет культуре расщеплять перекись водорода (H_2O_2) в кислороде и воде. Этот процесс проявляется в образовании пузырьков при смешивании колонии штамма в капле перекиси водорода, это указывает на то, что кислород был произведен в форме газа. Средняя скорость роста колоний около 5 суток в мезофильных условиях (от плюс 22 до плюс 37 °С. Оптимальная температура роста плюс 30 °С при рН среды от 6,0 до 8 усл.ед. Оптимальная рН среда 6,0 усл.ед. В качестве источника углерода использует глюкозу, в качестве источника азота – пептон, поэтому очень хорошо растёт на МПБ и МПА, с добавлением глюкозы и пептона.

Таксономическую принадлежность выделенной культуры можно представить в следующем виде: домен: *Bacteria*, тип: *Actinobacteria*, класс: *Actinobacteria*, порядок: *Streptomycetales*, подпорядок: *Streptomycineae*; семейство: *Streptomycetaceae*; род: *Streptomyces*, вид: *Streptomyces albus* (краткое название *S. albus*).

Механизм деградации отвердителя ИЗО-МТГФА под влиянием выделенной культуры актинобактерий *S. albus* может быть представлен следующим образом:

1. Продуцирование ферментов, таких как липазы, протеазы, амидазы и другие, которые способны катализировать различные реакции деградации органических соединений.
2. Взаимодействие субстрата (отвердителя ИЗО-МТГФА) и фермента, вырабатываемого культурой *S. albus*.
3. Гидролиз отвердителя ферментами, например липазой, которая может катализировать гидролиз связей между молекулами отвердителя ИЗО-МТГФА, приводя к его разложению на более простые органические фрагменты.
4. Использование культурой *S. albus* образовавшихся после деградации продуктов для дальнейшего метаболизма и синтеза необходимых компонентов в клетке микроорганизма.

Данный механизм основан на способности культуры *S. albus* вырабатывать соответствующие ферменты, способные деградировать отвердитель ИЗО-МТГФА и его компоненты. При этом процесс деградации может быть более сложным и включать различные стадии и реакции, в зависимости от характеристик субстрата и метаболической активности микроорганизма.

Заключение. В результате исследования взаимодействия микроорганизмов с различными компонентами, используемыми при изготовлении полимерных композитов, включая эпоксидную смолу, ускоритель реакции полимеризации и отвердитель, было установлено, что образцы эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 и ускорителя реакции полимеризации УП-606/2 проявляют устойчивость к воздействию микроорганизмов. Однако выявлено, что отвердитель ИЗО-МТГФА содержит актинобактерии рода *Streptomyces* (*S. albus*), что может указывать на его возможное загрязнение, на этапах производства или хранения. Биологическое загрязнение отвердителя представляет потенциальную угрозу для процесса полимеризации, что в свою очередь может привести к деградации полимерных композитов. Это делает прогнозирование срока службы биозараженных материалов затруднительным, учитывая факторы старения, включая климатические и микробиологические аспекты.

Для предотвращения негативных последствий микробиологического заражения в производстве полимерных композитов, следует принять следующие **рекомендации**:

1. Внедрение мер по санитарной гигиене на всех этапах производства компонентов. Это включает регулярную дезинфекцию оборудования, контроль за условиями хранения и транспортировки компонентов, а также обучение персонала по предотвращению микробиологического загрязнения.
2. Использование биоинертных или антимикробных добавок в компонентах полимерных композитов. Добавление таких веществ может помочь предотвратить развитие микроорганизмов и сохранить качество материала.
3. Проведение регулярного мониторинга качества компонентов на предмет микробиологического загрязнения. Это позволит своевременно выявлять проблемы и предпринимать необходимые меры по их устранению.

Продолжение работы в области изучения биозагрязнения компонентов полимерных композитов представляет собой важный шаг для выявления и анализа возможных последствий данного влияния.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0095) и с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Выражаем благодарность научным руководителям к.т.н. Кычкину А.К. и к.б.н. Ерофеевской Л.А. за техническую поддержку и помощь при исследованиях и интерпретации полученных результатов.

Литература

1. Ерофеевская Л.А., Салтыкова А.Л., Кычкин А.К., Кычкин А.А., Далбаева Е.А. Особенности микроскопических грибов, вызывающих биозаражение полимерных композиционных материалов в климатических условиях Якутии / Л. А. Ерофеевская, А. Л. Салтыкова, А. К. Кычкин [и др.] // EURASTRENCOLD-2022 : Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 года / Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2022. С. 162–166.
2. Готтлиб Е.М., Ань Нгуен, Вдовина Т.В., Соколова А.Г. Исследование биоразлагаемости модифицированных растительными маслами эпоксидных покрытий // Вестник МГСУ, 2019. – Т. 14. – Вып. 12. С. 1572–1583.
3. Лабинская А.С. Микробиология с техникой микробиологических исследований. Издание 4-е, переработ. и дополн. М.: Медицина, 1978. 394 с.
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. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 175 с.
6. Лабораторный практикум по общей микробиологии / Градова Н.Б. [и др.]. М.: ДеЛи принт, 2001. 131 с.
7. 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.
8. Гаузе Г.Ф. и др. Определитель актиномицетов: Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia* / Г.Ф. Гаузе – М.: Книга по Требованию, 2014. 248 с.

ИСПЫТАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ БИОПРЕПАРАТОВ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ НА ФИТОТОКСИЧНОСТЬ

Салтыкова А.Л.¹, Вит А.А.¹, Ерофеевская Л.А.²

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

² Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

ny94@list.ru

Проведено испытание промышленных биопрепаратов «Дестройл», «Деворойл», «Ленойл», «Байкал ЭМ» на изменение фитотоксичности нефтезагрязненной почвы. В качестве тест-растений исследованы овес посевной сорт «Скакун», пшеница сорт «Приленская 19», редька масличная, вика полевая. Содержание нефти в почве составило 1% и 5%. Исследование показало, что применение промышленных биопрепаратов является эффективным методом для фиторемедиации нефтезагрязненных почв, при условии правильного подбора дозировок и обеспечения контроля за процессом воздействия на почвенную экосистему. Выявлено, что использование биопрепаратов способствует стимуляции микробиоты почвы, что в свою очередь улучшает её плодородие и способность удерживать влагу. Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод о потенциальной эффективности опробованных биопрепаратов для проведения безопасной биоремедиации и фиторемедиации нефтезагрязненных почв.

Введение. Развитие промышленности и нефтедобычи приводят к серьезным экологическим проблемам, среди которых одной из наиболее значительных является загрязнение почв нефтепродуктами (НП). В связи с этим возрастает актуальность поиска эффективных методов биорекультивации нефтезагрязненных территорий. Одним из перспективных подходов является использование биопрепаратов, способных ускорить процессы нейтрализации и разложения нефтяных загрязнений в почвах.

В данном исследовании **основной целью являлось** изучение и оценка фитотоксичности промышленных биопрепаратов при их применении на нефтезагрязненных почвах.

Задачи исследования:

1. Оценить фитотоксичность промышленных биопрепаратов при использовании на нефтезагрязненных почвах;
2. Провести тестирование биопрепаратов на различных сортах культурных растений (овес, пшеница, редька масличная, вика полевая);
3. Сравнить результаты фитотоксичности биопрепаратов для разных видов культурных растений и различных уровней нефтезагрязнения в почвах;
4. Разработать научно-обоснованные рекомендации по использованию биопрепаратов для успешной биоремедиации нефтезагрязненных территорий с учетом безопасности для окружающей среды (ОС) и человека.

Материалами для исследования служили:

1. Промышленные биопрепараты «Дестройл», «Деворойл», «Ленойл», «Байкал ЭМ 1», предназначенные для биоремедиации нефтезагрязненных земель;
2. Семена высших растений овес посевной сорт «Скакун» (*Avena sativa. Varietas Skakun*), пшеница сорт «Приленская 19», (*Triticum. Varietas Prilenskaia 19*), редька масличная (*Raphanus cleagineus*), вика полевая (*Vicia sativa*).

Для загрязнения почвы использовали нефть Талаканского месторождения в концентрации 1% и 5%.

Для достижения поставленной цели и задач исследования применялись следующие **методы**:

1. Лабораторные испытания, в ходе которых проводилось изучение воздействия промышленных биопрепаратов на различные культурные растения в контролируемых условиях при использовании различных концентраций нефтезагрязнения в почвах;

2. Оценку фитотоксичности проводили в соответствии с утвержденной методикой [1, 7 с.];

3. Для культивирования и выделения почвенных микроорганизмов до и после опытов, использовали метод Коха путем посева почвенных суспензий на питательные среды [2, 394 с.; 3, 464 с.; 4, 175 с.].

4. Культивирование углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ), входящих в состав испытуемых биопрепаратов проводили в условиях постоянного доступа кислорода на термостатируемой установке УМВТ-12250 [5, 131 с.].

5. Для идентификации выделенных УОМ использовали общепринятые в микробиологии определители микроорганизмов [5, 104 с.; 6, 248 с.].

Результаты исследования. В ходе исследований установлено, что промышленные биопрепараты «Дестройл», «Деворойл», «Ленойл», «Байкал ЭМ 1», предназначенные для биологической рекультивации нефтезагрязненных почв проявили различную степень фитотоксичности в зависимости от концентрации и вида растений. Наиболее эффективными биопрепаратами для фиторемедиации оказались «Деворойл» и «Байкал ЭМ 1», которые способствуют интенсификации роста растений, как при 1%, так и при 2% концентрации нефтезагрязнений.

Наибольшую устойчивость к нефтезагрязнению показала пшеница сорт «Приленская 19» и овес посевной сорт «Скакун» в то время, как редька масличная и вика полевая при концентрации нефтезагрязнения 5% испытывают токсичность, в результате чего, уже через 10–14 суток, наблюдается пожелтение и высыхание всходов. При этом степень обработки почвы биопрепаратами не оказала ожидаемого влияния на снижение токсичности при повышенном содержании нефтезагрязнения (5%) на данные виды тест-растений.

Было выявлено, что удвоенная доза биопрепаратов может оказывать негативное воздействие на рост и развитие растений, что связано с токсическими веществами, выделяемыми микроорганизмами, входящими в состав биопрепаратов, в процессе жизнедеятельности.

Установлено, что использование биопрепаратов способствует стимуляции микробиоты почвы. Через 14 суток после обработки почв биопрепаратами общая численность почвенных микроорганизмов при посеве на мясопептонный агар (МПА) увеличилась с 1–9 тысяч до 91 миллиона на 1 грамм почвы в опыте с биопрепаратом «Байкал ЭМ 1»; до 14 миллионов – в опыте с биопрепаратом «Деворойл»; до 3 миллионов – в опыте с биопрепаратом «Дестройл»; до 26 тысяч – в опыте с биопрепаратом «Ленойл». Увеличение численности почвенных микроорганизмов в процессе их обработки испытуемыми биопрепаратами играет важную роль в улучшении биологической активности почв и поддержании биоразнообразия почвенных экосистем.

Результаты исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Наиболее эффективными биопрепаратами, из испытанных в рамках данных исследований, являются «Байкал ЭМ 1» и «Деворойл», которые способствуют быстрому накоплению в почве полезных микроорганизмов и стимулируют рост растений в нефтезагрязненных почвах.

2. Выявлена возможность использования промышленных биопрепаратов для снижения негативного воздействия нефтяных загрязнений на высшие растения, что является важным для решения проблем экологического загрязнения и восстановления природной среды.

3. Результаты исследований подтвердили потенциал промышленных биопрепаратов в области биорекультивации и охраны окружающей среды.

На основе проведенных исследований можно рекомендовать следующие мероприятия для более эффективной биорекультивации нефтезагрязненных почв:

1. При планировании биорекультивации необходимо предварительно тестировать и подбирать биопрепараты в зависимости от типа и степени загрязнения почвы, а также видов растений, которые планируется использовать для фиторемедиации. Это позволит достичь оптимального эффекта восстановления почвенной экосистемы.

2. Провести дополнительные исследования для оценки долгосрочного воздействия биопрепаратов на почвенные микроорганизмы и растительный мир. Это позволит убедиться в безопасности и стабильности использования данных биопрепаратов для ОС.

3. Осуществлять мониторинг за процессом рекультивации и ростом растений на загрязненных участках. Это поможет оценить эффективность применяемых методов и внести коррективы при необходимости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011200369-1) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Литература

1. ГОСТ 33777-2016 Вещества поверхностно-активные. Метод определения фитотоксичности на семенах высших растений. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.
2. Лабинская А.С. Микробиология с техникой микробиологических исследований. Издание 4-е, переработ. и дополн. М.: Медицина, 1978. 394 с.
3. Справочник по микробиологическим и вирусологическим методам исследования / под ред. М.О. Биргера. 3-е издание перераб. и дополненное. М.: Медицина, 1982. 464 с.
4. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1993. 175 с.
5. Лабораторный практикум по общей микробиологии / Градова Н.Б. [и др.]. М.: ДеЛи принт, 2001. 131 с.
6. 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.
6. Гаузе Г.Ф. и др. Определитель актиномицетов: Роды *Streptomyces*, *Streptovorticillium*, *Chainia* / Г.Ф. Гаузе – М.: Книга по Требованию, 2014. 248 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РЕМОНТНЫМ МЕРОПРИЯТИЯМ ПРИ ОТКАЗАХ И АВАРИЯХ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Слепцов А.А.^{2, 1}, Капитонова Т.А.¹, Стручкова Г.П.¹, Тимофеева В.В.¹, Тарская Л.Е.¹

¹ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск

sanyaslepcov@gmail.com

В данной статье подробно рассматриваются этапы реализации разработки модели рекомендаций по ремонтным мероприятиям при отказах и авариях магистрального газопровода с использованием графовых нейронных сетей. Полученная нейронная сеть может быть использована для получения рекомендаций по ремонтным мероприятиям, которые необходимо провести для устранения отказов и аварий на магистральном газопроводе.

Введение. Магистральные газопроводы играют важную роль в транспортировке газа, но отказы и аварии на них могут привести к серьезным последствиям. В данной работе мы разрабатываем модель рекомендаций по ремонтным мероприятиям на основе графовых нейронных сетей, используя многолетние статистические данные по отказам МГ «Мастах-Берге-Якутск».

Модель предлагает оптимальные стратегии восстановления работоспособности газопровода. Поддержание целостности и работоспособности газопровода является основной задачей для нефтегазовой компании, правительственных учреждений и других заинтересованных сторон.

Мы использовали библиотеки Keras, TensorFlow, Gensim и scikit-learn для разработки модели Graph Convolutional Networks, которая предсказывает рекомендации по ремонтным мероприятиям при отказах и авариях магистрального газопровода.

Графовые нейронные сети. Графовые нейронные сети (ГНС) – это семейство нейронных сетей, которые могут естественным образом работать с данными, структурированными в виде графов. Извлекая и используя особенности графа, ГНС могут делать более обоснованные предсказания о сущностях в этих взаимодействиях, по сравнению с моделями, которые рассматривают разные сущности в отдельности.

ГНС не являются единственными инструментами, доступными для моделирования данных, структурированных в виде графов: графовые ядра и методы с использованием Random Walk были одними из самых популярных. Однако, на сегодняшний момент, ГНС в значительной степени заменили эти методы благодаря присущей им гибкости, позволяющей лучше моделировать такие системы, [1].

Материалы и методы. В ходе разработки модели нейронной сети, для задачи классификации узлов мы рассмотрели следующие методы: Graph Convolutional Networks, GraphSAGE, Random Forest и Node2Vec. Давайте более подробно рассмотрим алгоритмы GCN и Random Forest для задачи классификации узлов.

Графовые сверточные сети (Graph Convolutional Networks) стали мощным инструментом для анализа и обучения на основе данных, структурированных в виде графов. Графы широко используются для представления сложных отношений и взаимодействий в различных областях, таких как социальные сети, биологические сети, рекомендательные системы и графы знаний. GCN расширяют традиционные сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks) для работы с данными в виде графов за счет включения информации о соседях и учета локальной и глобальной структуры графа.

Подготовка данных. Для исследования были рассмотрены и анализированы многолетние статистические данные по аварийным отказам и ремонтам на магистральном газопроводе “Мастах-Берге-Якутск”. Благодаря дисперсионному анализу, было анализировано взаимодействие факторов и типов отказа или аварий. С помощью методов непараметрической статистики и анализа главных компонент были выявлены наиболее значимые факторы, характеризующие отказ или аварию в системе. Результаты указывают на важность давления на момент аварии, геокриологических условий, возраста трубопровода, части трубопровода, диаметра и объекта системы, на котором произошла авария, как основных факторов, влияющих на отказ или аварию.

Таблица 1. Наиболее значимые факторы, связанные с инцидентами на трубопроводах и проведенные ремонтные мероприятия

1	возраст	объект	дополнительный фактор	геокриологические условия	диаметр трубы	давление на момент отказа	ремонтные мероприятия
2	1	1	5	2	1	1	2
3	1	1	2	1	1	3	1
4	1	1	5	2	1	1	2
5	1	2	5	2	2	1	2
6	1	1	4	2	1	1	3
7	1	1	5	2	1	1	2
8	1	1	1	3	1	3	1
9	1	1	5	2	1	1	2
10	1	1	2	3	1	3	1
11	1	1	2	2	1	3	1
12	1	1	5	2	1	1	2
13	1	1	3	1	1	3	1
14	1	1	2	3	1	3	1
15	1	1	4	2	1	4	3
16	1	1	4	2	1	3	3

Следующим этапом разработки модели на основе графовых нейронных сетей было создание однодольного графа факторов, на основе которого мы будем обучать нейронную сеть. Мы воспользовались возможностями программы Neo4j Graph Database с плагином Neo4j Graph Data Science.

В итоге у нас получился однодольный граф ремонтных мероприятий при отказах и авариях на магистральном газопроводе, где каждый узел является фактором, а ребра представляют собой общие случаи между двумя случаями отказа.

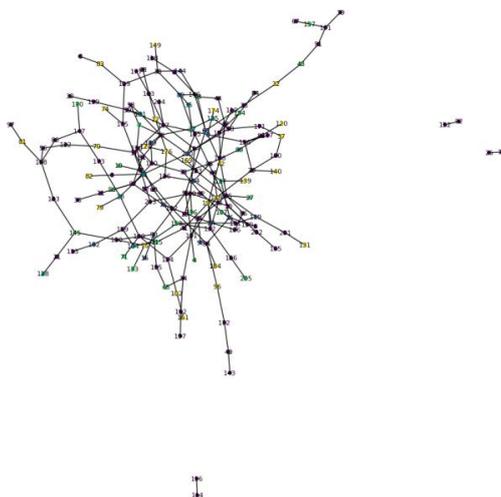


Рис. 4. Визуализация графа

Анализ полученных результатов. Путем случайной генерации мы отобрали 5 случаев аварийных отказов для проверки прогнозирования наших моделей:

Таблица 2. Случаи аварийного отказа

Случай	Возраст трубопровода	Объект	Дополнительный фактор	Геокриологические условия	Диаметр трубопровода, мм	Давление трубопровода на момент отказа, кгс/см ²
1	1–5 лет	МГ	Трещина	Низина/влажность	529	0.72–1.08
2	1–5 лет	МГ	Другое	Низина/влажность	529	0–0.27
3	1–5 лет	МГ	Деформация	Низина/влажность	529	0–0.27
4	11–15 лет	МГ	Деформация	Ровное/сухое	529	0.55–0.71
5	16–20 лет	Задвижка	Другое	Болото/озеро	529	0–0.27

Таблица 3. Точность обучения моделей на основе нейронных сетей

	Точность на обучаемом наборе	Точность на тестовом наборе
Базовая модель нейронной сети на основе FFN	76.67%	75.34%
Графовый нейросетевой классификатор на основе GCN	83.33%	85.21%

Таблица 4. Сравнение полученных прогнозов по ремонтным мероприятиям

Модель	Случаи				
	1	2	3	4	5
Базовая модель нейронной сети на основе FFN	- 1: 25.88%	- 1: 32.78%	- 1: 9.63%	- 1: 61.58%	- 1: 68.17%
	- 2: 5.84%	- 2: 31.31%	- 2: 9.55%	- 2: 0.31%	- 2: 0.25%
	- 3: 0.2%	- 3: 0.81%	- 3: 10.23%	- 3: 3.31%	- 3: 2.52%
	- 4: 67.9%	- 4: 32.6%	- 4: 64.97%	- 4: 24.62%	- 4: 27.98%
	- 5: 0.18%	- 5: 2.49%	- 5: 5.62%	- 5: 10.18%	- 5: 1.08%
Графовый нейросетевой классификатор на основе GCN	- 1: 36.2%	- 1: 85.71%	- 1: 13.11%	- 1: 1.23%	- 1: 0.03%
	- 2: 0.09%	- 2: 0.04%	- 2: 0.33%	- 2: 0.35%	- 2: 11.15%
	- 3: 0.02%	- 3: 1.16%	- 3: 0.99%	- 3: 0.95%	- 3: 0.04%
	- 4: 63.08%	- 4: 12.97%	- 4: 82.92%	- 4: 85.25%	- 4: 15.41%
	- 5: 0.61%	- 5: 0.12%	- 5: 2.66%	- 5: 12.22%	- 5: 73.38%

Наш графовый нейросетевой классификатор позволяет с более высокой точностью прогнозировать вид ремонтных мероприятий, которые нужно провести для устранения отказа или аварии. Рассмотрим случаи 1 и 5 из таблицы 4. Наша модель предлагает провести для 1 случая, исходя из входных факторов, демонтаж дефектного участка и провести монтаж катушки из равноценного материала; для случая 3 модель предлагает установить краны на месте вырезанных задвижек.

Вывод. На основе анализа многолетних статистических данных мы разработали модель рекомендаций по ремонтным мероприятиям для подземного газопровода с использованием графовых нейронных сетей и методов машинного обучения.

Модель эффективно учитывает сложную структуру взаимосвязей между компонентами МГ и определяет наиболее вероятные причины отказов. Она предлагает конкретные рекомендации по ремонту и обслуживанию, направленные на устранение выявленных проблем.

В результате применения нашей модели ожидается значительное улучшение эффективности ремонтных мероприятий, сокращается время простоя системы и повышается надежность работы инфраструктуры.

Литература

1. Donnat Ch., Holmes S. Tracking network dynamics: A survey using graph distances. *Ann. Appl. Stat.* 12 (2) P. 971 – 1012. <https://doi.org/10.1214/18-AOAS1176>.
2. McPherson M., Smith-Lovin L., Cook J.M. Birds of a Feather: Homophily in Social Networks, *Annual Review of Sociology*, 2001. P. 415–444.
3. Martin Ch., Reibeling M. A Process for the Evaluation of Node Embedding Methods in the Context of Node Classification, Institute of Information Systems Leuphana University of Luneburg, Germany, 2020. DOI:10.48550/arXiv.2005.14683

4. Kipf T. N., Welling M. Semi-supervised classification with graph convolutional networks. 2016. arXiv preprint arXiv:1609.02907.
5. Hamilton, W. L., Ying, R., & Leskovec, J. Inductive representation learning on large graphs. In Advances in neural information processing systems. 2017. P. 1024–1034.
6. Veličković, P., Cucurull, G., Casanova, A., Romero, A., Lio, P., & Bengio, Y. (2018). Graph attention networks. arXiv preprint arXiv:1710.10903.
7. Veličković, P., Fedus, W., Hamilton, W. L., Liò, P., Bengio, Y., Jegelka, S. Deep graph infomax. In Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations. 2019. 10.48550/arXiv.1909.10086.
8. Marzullo A., Stamile C., Deusebio E. Graph Machine Learning: Take Graph Data to the Next Level by Applying Machine Learning Techniques and Algorithms, Packt Publishing, 2021. 338 pp.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-360-362

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА В Г. ЯКУТСКЕ

Стручков А.Н., Прохоров В.А.

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск

artemstruchkov@icloud.com

В статье анализируются причины снижения качества дорог Якутска. Рассмотрен механизм появления наиболее распространенного дефекта дорожного полотна в условиях севера. На основе анализа местных разрушений, установлена их взаимосвязь и построено дерево отказов.

Повышение качества автомобильных дорог в условиях Севера является научно недостаточно решенной проблемой [1]. Качество дороги, как показатель, определяется потребительскими свойствами. Автомобильные дороги должны обладать высокими потребительскими свойствами, к которым относятся: обеспеченная скорость, непрерывность, удобство и безопасность движения, пропускная способность и ровность покрытия, а также эстетичность и экологическая безопасность. Качественные дороги в первую очередь определяются свойством их надежности. Надежность автомобильных дорог заключается в их бесперебойном функционировании в заданных сроках, режимах и условиях эксплуатации и содержания [2]. Согласно ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», надежность включает свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности. Надежность конструкций определяется свойствами прочности, жесткости и устойчивости его элементов. Основным понятием технического состояния дорожного полотна является отказ, под которым понимают событие, характеризующее потерю или снижение работоспособности. К отказам относятся дефекты дорожной одежды. Применительно к дорожной одежде термин «прочность» оценивается отсутствием трещин, проломов, просадок, приводящих к разрушению дорожной одежды, а также появлением деформаций, снижающих скорость и безопасность движения по дороге [3].

Наиболее распространенным дефектом дорожного полотна в условиях Севера является трещина. При проникновении воды в трещину происходит разрушение дорожного полотна в осенне-весенний период от повторного замораживания воды при низких температурах. Рассмотрим механизм появления трещины. В первом приближении дорожное покрытие рассматривается как неразрезная полоса бесконечной длины постоянного поперечного сечения. В связи с этим расчетную схему полосы вдоль дороги можно принять как защемленный с двух сторон брус, так как в продольном направлении деформации отсутствуют (рис. 1, схема 1). Рассмотрим расчет напряжений по методике сопротивления материалов для принятой расчетной схемы, как для статически неопределимого стержня при температурном воздействии (охлаждение). Принимаем основную систему полосы для разрешения неопределимости в виде (рис. 1, схема 2):

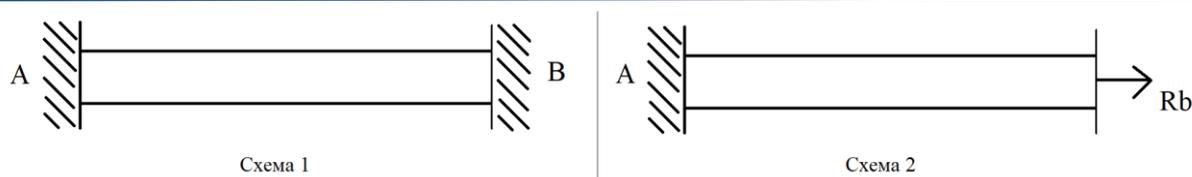


Рис. 1. Расчетная схема дорожной полосы при температурном воздействии

Для основной системы на опоре В суммарное удлинение от реакции и температурного воздействия равно нулю.

$$\Delta_B = \Delta_{Bt} + \Delta_{BRb} = 0, \quad (1)$$

где $\Delta_{Bt} = -\alpha \cdot \Delta t \cdot l$; $\Delta_{BRb} = \frac{Rb \cdot l}{EA}$;

α – коэффициент температурного расширения материала; Δt – температурный разброс от температуры возведения до низкой зимней температуры ($\Delta t = t_{\min} - t_0$); E – модуль упругости материала; A – площадь поперечного сечения.

Решая уравнение (2), получим, что в сечении дорожной полосы при понижении температуры возникают напряжения, определяемые по зависимости:

$$\sigma = \frac{Rb}{A} = \alpha_t \cdot \Delta t \cdot E. \quad (2)$$

Из чего следует, что растягивающие напряжения зависят от коэффициента температурного расширения материала, температурного разброса (Δt) и модуля упругости материала и не зависят от размеров поперечного сечения полосы для принятой расчетной схемы. Основной вывод заключается в том, что стесненность деформаций дорожного полотна при низких температурах вызывает напряженно-деформированное состояние, характерное для центрально растянутых элементов. При низких температурах асфальтобетонное покрытие становится хрупким. Это явление становится определяющим в интенсивном трещинообразовании асфальтобетонного покрытия в зимнее время. Асфальтобетон как хрупкий материал при низких температурах лучше работает на сжатие и хуже – на растяжение. Предел прочности асфальтобетона на растяжение имеет очень низкое значение и при низких температурах значительно снижается. Следовательно, при понижении температуры асфальтобетона произойдет образование трещин, т.к. возникающее растягивающее напряжение превысит предел прочности асфальтобетона.

Таким образом, основными причинами появления этого дефекта в условиях города Якутска, является резкое понижение температуры и низкое сопротивление асфальтобетона разрыву (рис. 2). При дополнительных неблагоприятных условиях, таких как технологические ошибки и недопустимые повторные нагрузки, образуется пролом. Поступление воды внутрь трещины, провоцирует процесс разрушения асфальта изнутри, что приводит к образованию ямы. Мелкие повреждения в совокупности с технологическими ошибками и экстремальными условиями эксплуатации приводят к более опасным дефектам, которые принято считать отказом дорожного полотна. Отказ может произойти без внешних предшествующих признаков. При увлажнении грунтов основания или при его недостаточном уплотнении, образуется просадка. Ремонт может восстановить работоспособность полотна и замедлить дальнейшее разрушение, но не является решением проблемы.

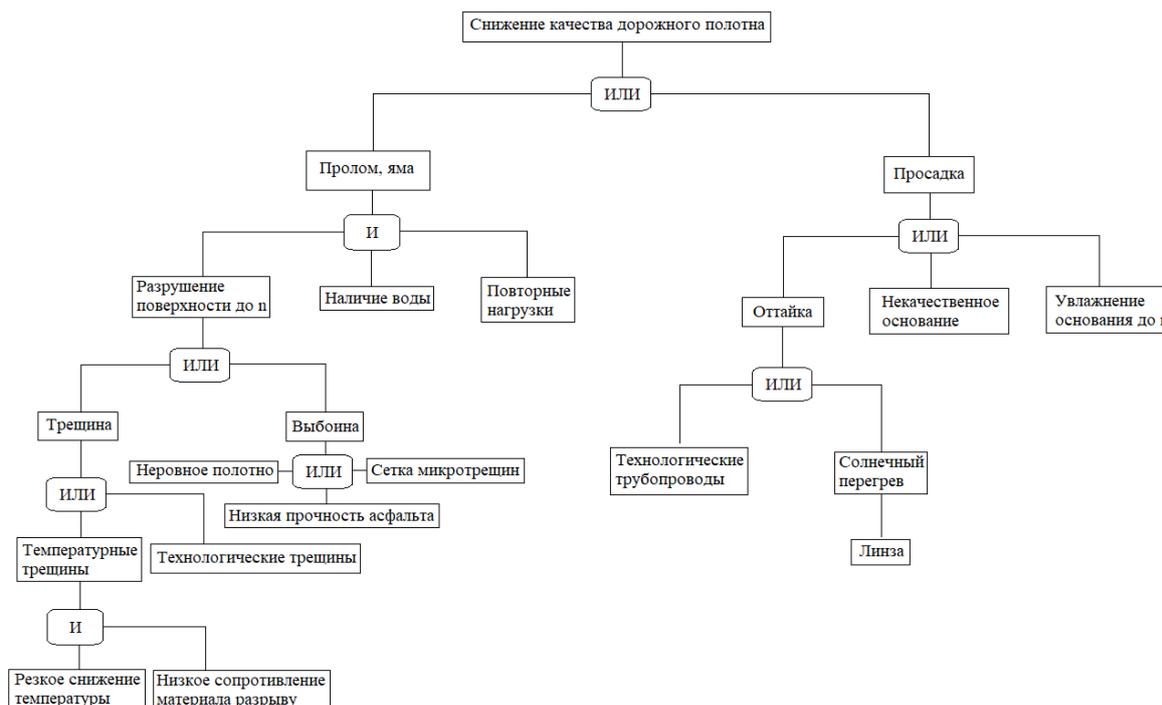


Рис. 2. Дерево отказа дорожного полотна Якутска

Основной причиной отказа дорожного полотна в Якутске, является отсутствие соответствующей технологии подготовки основания, способной соответствовать условиям многолетней криолитозоны. И напротив, этот процесс ускоряется при несоблюдении технологии и ошибок в проектировании. Повысить надежность дорожного полотна в Якутске, можно путем внедрения новых исследованных технологий в данной сфере.

Литература

1. Прохоров В.А. Качество и надёжность дорог в г. Якутске / Наука и техника в Якутии. № 1 (44), 2023. С.17–20.
2. Немчинов М.В. К вопросу обеспечения прочности дорожных одежд автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – Т. 78, № 4. – С. 30–35.
3. Бажанов А.П., Саксонова Е.С. Теоретические положения обеспечения надежности автомобильных дорог // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2018. – № 2. – С. 26–31.

КАРТИРОВАНИЕ УРОВНЯ ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ПОДВОДНОГО ПЕРЕХОДА ГАЗОПРОВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЕРАРХИИ, ДАННЫХ ДЗЗ И ГИС

Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Тарская Л.Е.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

sardankobeleva@gmail.com

Риск наводнений определяется вероятностью возникновения наводнения и его последствиями, поэтому он может быть очень высоким, если районы густонаселены и содержат жизненно важные объекты инфраструктуры. Карты опасности наводнений являются полезными инструментами для планирования застройки новых районов населенных пунктов, строительства критически важных промышленных объектов. Потенциально опасными объектами в исследуемых районах являются подводный переход газопровода и планируемое строительство моста через реку Лена. Было обнаружено, что комбинация ГИС, ДДЗЗ и метода процесса аналитической иерархии (АИР) многокритериального анализа решений является надежным способом оценки зон риска затопления, поскольку учитывает и взвешивает параметры, способствующие затоплению.

Концепция анализа риска нефтегазодобывающих территорий Сибири рассмотрена в [1], где предложены модели и критерии антропогенного риска, основанные на непрерывном геотехническом мониторинге. В особенности, это важно для районов подверженных воздействию опасных природных процессов, способных оказать влияние на трубопроводную систему и деградацию прилегающего ландшафта. Как указано в [2, 3] для предупреждения техногенных аварий и катастроф необходима оценка комплексных рисков, включающая различные факторы, которая основывается на достоверной информации о техногенной сфере, полученной с помощью мониторинга и построение карты риска.

Для решения поставленной задачи визуализации фактически сложившейся прогнозируемой гидрологической обстановки, а также картирования зон затоплений при прохождении паводков и половодий была создана тематическая база пространственных данных, содержащая информацию о речной сети, рельефе.

Факторы, обуславливающие наводнения, были определены с помощью обзора литературы, анализа результатов предыдущих работ, экспертных оценок. Мы определили 6 предикторов, связанных с наводнением на данном участке, которые включают максимальный уровень воды на участке во время половодья – фактические зоны затопления, расстояние до водотоков, топографию (высоты и склоны), растительность на территории – лес, кустарник, луг, пустырь, вода, грунты. Обработка данных и визуализация были выполнены с использованием ГИС и ДДЗЗ с растровыми данными, и пространственным разрешением 30 м, были определены классы для всех факторов, использованы снимки Landsat8-OLI, ASTER GDEM 2013 г.

Метод процесса аналитической иерархии (АИР) многокритериального анализа решений. В литературе приводятся многочисленные тематические исследования оценки опасности наводнений [1–6]. Многокритериальный анализ решений позволяет проводить комплексное моделирование, включая как количественные, так и качественные параметры, и может сочетаться с процессом аналитической иерархии (АИР) и ГИС для оценки весов предикторов и составления карт подверженности наводнениям. Основные критерии в качестве факторов, способствующих наводнениям, были определены на основе обзора литературы, анализа результатов предыдущих работ, экспертных оценок. Методы многокритериального анализа используются в качестве инструментов поддержки принятия решений для принятия сложных групп решений, где необходимо учитывать технологические, экономические, экологические и социальные аспекты, хорошо комбинируются с географическими информационными систе-

мами (ГИС) [7–12]. Нашей основной целью в исследовании многокритериального анализа решений на основе ГИС была количественная оценка подверженной затоплению территории в пяти зонах потенциального затопления (очень высокая, высокая, умеренная, низкая и очень низкая). Основные критерии в качестве факторов, способствующих наводнениям, были определены на основе обзора литературы, анализа результатов предыдущих работ, экспертных оценок.

В среде ГИС АНР используется для вычисления весов, приписываемых слоям пространственных данных, представляющих критерии, и для создания комбинированных карт с помощью инструмента «взвешенного наложения» в Arc GIS.

Факторы, используемые для моделирования опасности наводнения.

Тематическое изображение – высоты. Карта высот была подготовлена путем преобразования ЦМР в треугольную нерегулярную сеть, а затем в растровые слои с помощью инструмента преобразования ArcGIS. Растровые слои рельефа были переклассифицированы на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS. Мы также извлекли из ЦМР (цифровая модель рельефа) уровни высоты (elevation), уклона (slop).

Тематическое изображение – растровые слои уклонов. Растровые слои склонов были определены с помощью DEM в инструменте генерации склонов в ArcGIS. Затем карта склонов была переклассифицирована на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS.

Тематическое изображение – расстояние от водотоков. Для определения расстояния от реки использовался алгоритм евклидова расстояния из spatial analyst toolbox в Arc GIS. Затем растр был переклассифицирован на пять классов для подготовки тематического слоя удаленности от рек. Наивысшей категории (т. е. наибольшему расстоянию от реки) присвоена оценка 1, тогда как низшей категории (т. е. ближайшему расстоянию от реки) присвоена оценка 5, что указывает на очень высокий и очень низкий риск наводнений соответственно.

Тематическое изображение – растительность на территории участка. Для определения плотности, видов растительности были использованы нормализованные дифференциальные индексы растительности (NDVI) по изображениям Landsat 8. Затем растр был переклассифицирован на пять классов: лес (очень низкая), кустарники (низкая), травянистые угодья, сельскохозяйственные земли (средняя), пустыри (высокая) и вода (очень высокая) по степени риска наводнений (задержки водостока).

Тематическое изображение – грунты. Была сформирована карта грунтов входящих в литологический состав пород на территории участка. Затем уровень данных был переклассифицирован на пять субфакторов, с использованием метода равных интервалов по степени потенциальной потери устойчивости при увлажнении.

Методология исследования была сосредоточена на анализе основных факторов, влияющих на возможность затопления: расстояние до водотоков, топографию (высоты и уклоны), растительность, грунты, расстояние от трубопровода.

Таблица 1. Результирующие нормализованные веса предикторов

Расстояние до воды	0,333329
Высота	0,203813
Расстояние до трубопровода	0,241928
Уклон	0,032622
Грунты	0,139274
Растительность	0,048974

В таблице 1 приведены результирующие нормализованные веса показателей. Коэффициент согласованности $CR = 0,09$. Наиболее важный показатель с точки зрения веса был определен как «расстояние от водотоков» – 0,333329; следующими важными предикторами были определены «расстояние от трубы» – 0,241928; «высот» – 0,203813. Слой «грунты» и «растительность» были присвоены следующие по важности значения весов (0,139274 и 0,048974). Наименьший вклад в опасность наводнения вносит фактор – «уклон». Затем были рассчитаны общие баллы с использованием простой взвешенной суммы. Соответственно, каждый пиксель выходной карты был рассчитан с использованием следующего суммирования каждого слоя,

умноженного на свой вес. Конечным продуктом аналитической иерархии (АНР) многокритериального анализа решений была карта подверженности затоплениям с пятью зонами потенциального затопления, рис. 1. Результаты этого исследования показали, что комбинация ГИС, ДДЗЗ и АНР является надежным методом оценки зон риска затопления, поскольку она учитывает многочисленные элементы, обуславливающие затопление, и взвешивает компоненты, способствующие затоплению.

Эффективное планирование, основанное на оценке рисков, направлено на минимизацию ущерба людям и имуществу до наступления стихийного бедствия, но его эффективность в смягчении последствий стихийных бедствий требует высокого уровня технического и организационного сотрудничества и координации всех ответственных организаций и обществ.

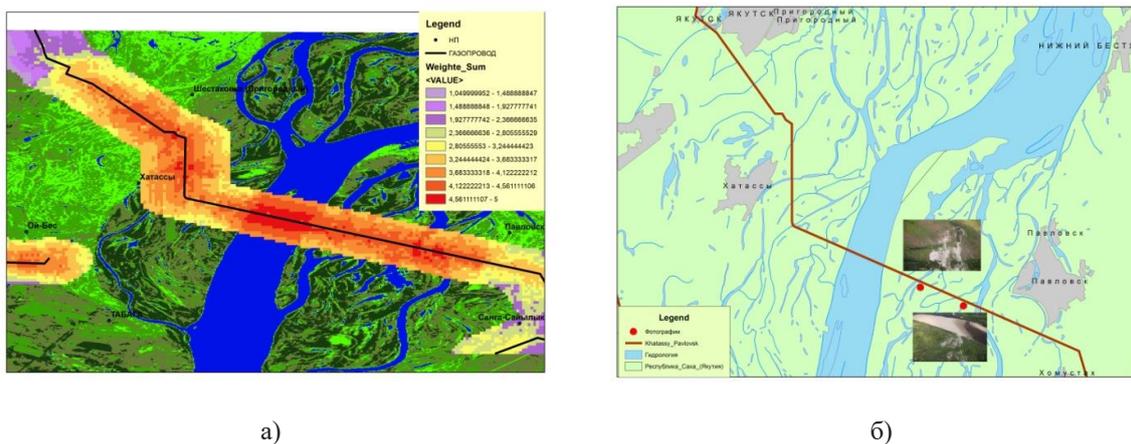


Рис. 1. Карта а) потенциальной опасности всплывтия участков трубопровода при затоплении и б) места всплывтия трубопровода, обнаруженные в результате аэровизуального облета участка газопровода Хатассы-Павловск в 2015 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 1023030900073-8-2.3.3, научная тема FWRS -2024-0032) и Российского научного фонда проект: 24-27-20095.

Литература

1. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Чернякова Н.А., Ничепорчук В.В. Оценка антропогенных рисков нефтегазодобывающих территорий Сибири // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 201. – № 5. – С. 42–52.
2. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Кукова В.И. Информационные аспекты безопасности в техногенной сфере // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 6. – С. 136–151.
3. Использование аэровизуального обследования для оценки геологических рисков нефтегазопроводов Севера / Г.П. Стручкова, Т.А. Капитонова, П.В. Ефремов, Л.Е. Тарская // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9. – С. 38–41. www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=5784.
4. Корниенко, С.Г. Аэрокосмические методы контроля состояния природной среды при разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений криолитозоны // Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа // В сб. ст. Всеросс. конф. (Москва, 15–18 нояб. 2011 г.). М. – ИПНГ РАН. – 2000. – С. 125–128.
5. Оценка опасности возникновения аварийных ситуаций на нефте-газопроводах с использованием дешифровки космоснимков / Г.П. Стручкова, Т.А. Капитонова, С.М. Тимофеева, П.В. Ефремов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Научно-технический журнал. Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера. – 2015. – № 30. – С. 365–370.
6. Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Попов К.А., Ефремов П.В. Использование геоинформационной базы данных разнородной информации для оценки состояния линейных технических систем в условиях криолитозоны // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 4. – С. 183–187.

7. Deepak Chaulagain, Parshu Ram Rimal, Same Noel Ngando, Benyoh Emmanuel, Kigha Nsafon, Dongjun Suh, Jeung-Soo Huh // Flood susceptibility mapping of Kathmandu metropolitan city using GIS-based multi-criteria decision analysis // Ecological Indicators. – 2023. – Vol 154, 110653.
8. Gemechu Shale, Amare Bantider, Ketema Abebe, Davide Geneletti. Geographic information system (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, oromia regional State, Ethiopia // Journal of Hydrology: Regional Studies. – 2020. – Vol. – 27, 100659.
9. V. Stelzenmüller, J. Lee, E. Garnacho, S.I. Rogers. Assessment of a Bayesian Belief Network–GIS framework as a practical tool to support marine planning // Marine Pollution Bulletin. – 2010. – Vol. – 60. – Issue 10. – P. 1743–1754. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.024>.
10. Yekenalem A., Golam K., Solomon T. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 174. pp. 1629-1641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.066>.
11. Yun Chen, Rui Liu, Damian Barrett, Lei Gao, Mingwei Zhou, Luigi Renzullo, Irina Emelyanova. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates // Science of The Total Environment. 2015 – Vol. 538. – P. 512–523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.094>.
12. Sharareh Rashidi Shikhteymour, Moslem Borji, Mehdi Bagheri-Gavkosh, Ehsan Azimi, Timothy W. Collins. A novel approach for assessing flood risk with machine learning and multi-criteria decision-making methods // Applied Geography. – 2023. – Vol. – 158. 103035.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-366-369

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИРИСТОРНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НА ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Хоютанов А.М.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

shuriklater@mail.ru

В настоящее время для регулирования энергетических потоков в линиях электропередачи предлагаются различные активно-адаптивные технические устройства, предназначенные для улучшения общих динамических характеристик в электроэнергетической системе, обозначенные как устройства FACTS (flexible ac transmission systems). Одной из вариацией данных устройств является разработанный тиристорный стабилизатор параметров (ТСП). В работе рассмотрена тестовая модель, предназначенная для гармонического анализа изменений значений тока и напряжения при работе регулятора-стабилизатора, а также его влияние на составляющие полной мощности.

Для улучшения общих динамических характеристик в электроэнергетической системе, применяются устройства FACTS (flexible ac transmission systems) [1–3]. Одной из вариацией данных устройств является разработанный тиристорный стабилизатор параметров (ТСП). Для исследования работы ТСП в качестве компенсатора реактивной мощности была смоделирована тестовая трехфазная схема (рис. 1) с источником электрической энергии, нагрузкой и регулятором-стабилизатором. Заданная модель предназначена для гармонического анализа изменений значений тока и напряжения при работе регулятора-стабилизатора, а также его влияние на составляющие полной мощности.

В качестве источника электрической энергии используется блок с амплитудным напряжением 400 В с начальной фазой равной 0 градусов, в качестве нагрузки – блок с активно-индуктивным сопротивлением, потребляющий 10+j10 кВА полной мощности.

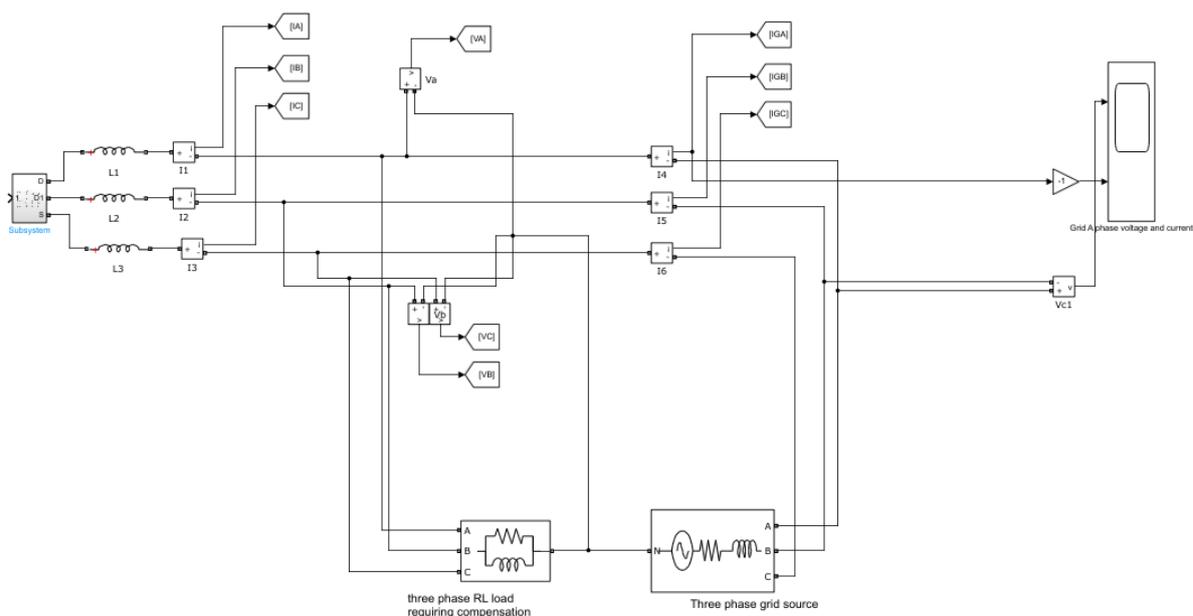


Рис. 1. Тестовая схема

Основой для вычислительных блоков гармонического анализа является система фазовой автоподстройки частоты, которая используется для извлечения информации об угле исходя из поступающей информации от значений трехфазных напряжений. Входной сигнал в блок представляет собой сигнал, полученный и сформированный на основе информации о напряжениях (токах) трехфазной системы (встроенное в математических редактор преобразование Парка). Выходной сигнал представляет собой фазовый угол из системы трехфазных напряжений.

В основе теории мгновенной мощности лежит матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_d & u_q \\ 0 & u_q & -u_d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где p_0 , p и q – нулевая, активная и реактивная составляющие мгновенной мощности; u_0 , u_d , u_q , i_0 , i_d , i_q – мгновенные значения напряжений и токов в координатах dq_0 , полученные из фазных мгновенных значений токов и напряжений с помощью преобразования Парка.

Для трехфазных сетей с изолированной нейтралью нулевая координата исключается, и формула принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ u_q & -u_d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Переход от системы координат abc к системе dq выполняется в соответствии с выражениями:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где ω – угловая частота переменного тока.

На основе данного преобразования и исходя из параметров схемы с помощью, приведенных на рис. 2–4 алгоритмов определения фазы напряжений, реактивной мощности и выходного значения тока получены следующие графики на рис. 5, 6.

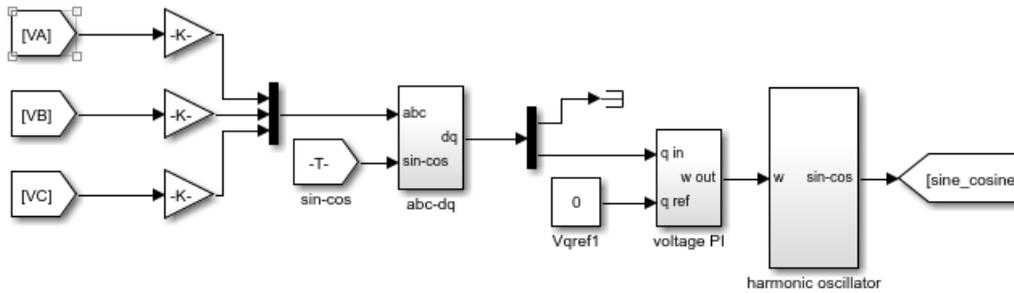


Рис. 2. Алгоритм определения фазы напряжений с помощью фазовой автоподстройки частоты

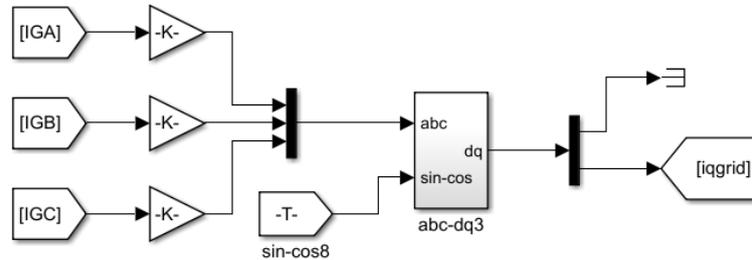


Рис. 3. Алгоритм определения реактивной мощности выдаваемой сетью

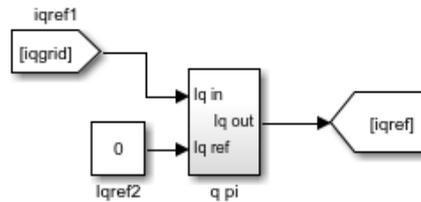


Рис. 4. Алгоритм определения выходного значения тока

Анализ полученных графиков показывает, что значительного отставания или опережения тока относительно напряжения не наблюдается, что указывает на минимальное значение реактивной мощности несмотря на явный активно-индуктивный характер нагрузки, исходя из условий тестирования. Реактивная мощность нагрузки обеспечивается за счет регулятора-стабилизатора, а из источника электрической энергии используется только активная составляющая мощности.

Формы выходного напряжения и тока с ТСП имеют неискаженный синусоидальный характер.

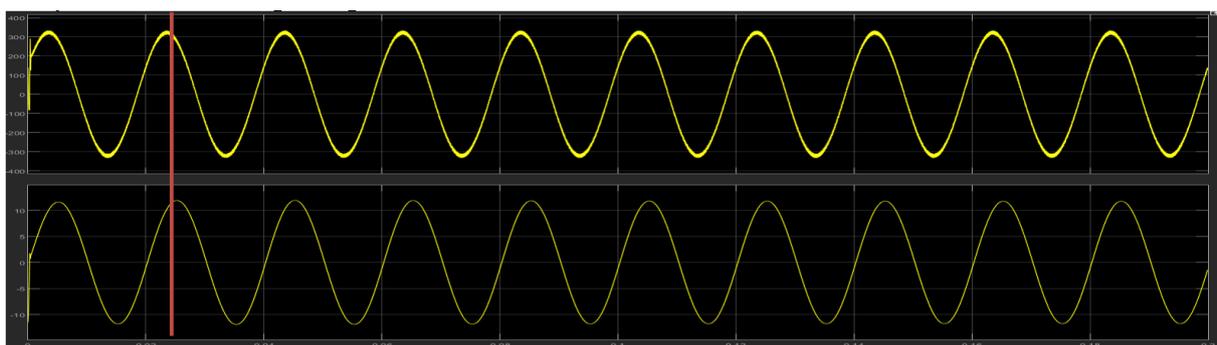


Рис. 5. Выходные функции напряжения (U, В) и тока (I, А) фазы А с учетом компенсации

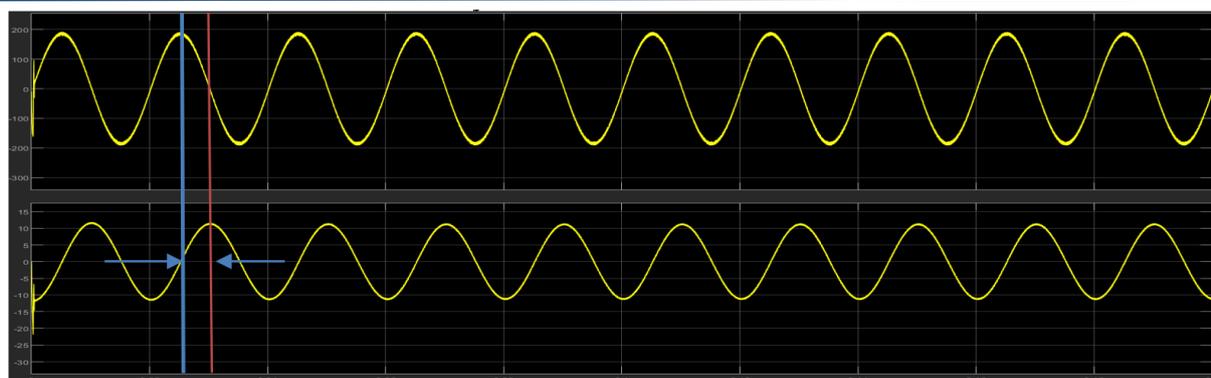


Рис. 6. Выходные функции ТСПд напряжения и тока фазы А

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0031).

Литература

1. The unified power-flow controller – a new approach to power transmission control / L. Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williamset al. // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995, vol. 10, No2, pp. 1085–1097.
2. Power flow control by unified power flow controller / Khan Muhammad Yousaf Ali, Khalil Umair et al. // Engineering Technology & Applied Science Research. 2019, vol. 9, is.2, pp. 3900–3904.
3. Abido M.A. Pole placement technique for PSS and TCSC-based stabilizer design using annealing // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2000, vol. 22, is.8, pp. 543–554.

DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-369-371

ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОГЭС НА ОСНОВЕ ГИДРОГРАВИТАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Хоютанов А.М., Ачикасов Р.Р.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск

shuriklater@mail.ru

Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики поддерживает реализацию инвестиционных проектов по модернизации неэффективной дизельной, мазутной и угольной генерации в удаленных и изолированных районах Дальнего Востока и Арктики на основе использования возобновляемых источников энергии, в том числе малых ГЭС. Предлагаемая в работе микро-ГЭС работает при погружении турбины в свободный поток воды и преобразуют кинетическую энергию потока. Свободнопоточная микро-ГЭС может работать параллельно с дизель-генератором, сокращая расход дорогостоящего топлива. Большим преимуществом такой микро-ГЭС является отсутствие земляных и строительных работ при ее установке в месте использования.

Микро-ГЭС является гидравлической системой, где определяющим фактором является расход Q , а мощность (N) – это совокупность ускорения свободного падения расхода, напора, плотности воды и выражается формулой:

$$N = g * Q * H * \eta, \quad (1)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с²; Q – расход, м³/с; H – напор, м; η – КПД турбины.

Расход Q при этом может иметь объемное выражение (м^3):

$$Q = \frac{V}{t} = v \times S, \quad (2)$$

где: Q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; V – объем жидкости, проходящий через поперечное сечение потока за время t , м^3 ; t – время, за которое жидкость объемом V проходит через поперечное сечение потока; S – площадь поперечного сечения потока, м^2 .

Также расход Q может иметь массовое выражение ($\text{кг}/\text{с}$):

$$QM = \rho \times Q, \quad (3)$$

где: ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$.

Из вышеуказанного видно, что вода как подвижная среда, легко меняющая свои формы, но при этом, сохраняющая неразрывность потока, проходя через гидравлическую систему ГЭС, создает мощность, которую можно преобразовать в электрическую энергию на основе анализа различных компоновок гидроэнергетических установок [1–2].

При этом расход QM как массовая единица ($\text{кг}/\text{с}$), обладающая определенной скоростью движения может преобразовывать свою кинетическую энергию в электрическую посредством электрогенератора в гидравлической системе на рис 1.

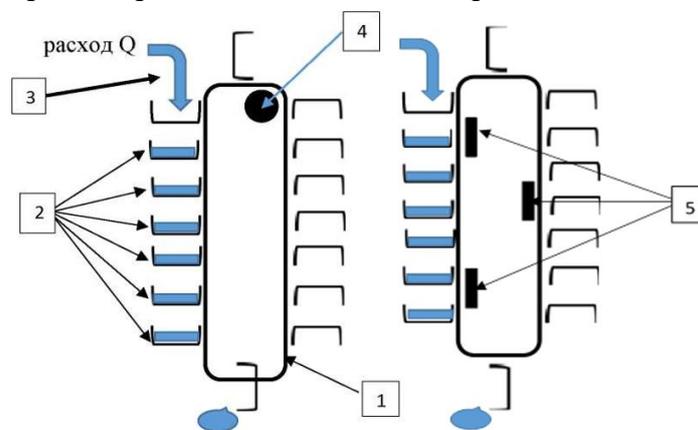


Рис. 1. Схема гидра-гравитационного преобразователя: 1– подвижная лента; 2– специальные емкости для жидкости (MQ); 3– патрубок истечения жидкости; 4– электрогенератор вращения; 5– линейный электрогенератор

Гидравлическая система на рис. 1 является гидро-гравитационным преобразователем, где расход истекающей жидкости Q представляет собой единичную массу способную приобретать любую форму при этом возникает техническая возможность аккумулировать расход Q в разных емкостях в составе одной подвижной системы.

Гидро-гравитационный преобразователь – это механизм для преобразования кинетической энергии падающей массы (жидкости в специальных емкостях) в электрическую энергию.

На приведенном выше рис. 2 четко просматриваются ёмкости, формирующие общую массу, где расход Q выполняет важнейшую функцию, а именно поэтапно формирует общую массу (MQ), кратную количеству емкостей (n), которая при достижении нижнего края поэтапно удаляется из гидравлической системы, тем самым создавая разность масс относительно вертикальной оси движения в системе. И как результат, поступательное движение всей системы, где скорость системы (V) в любой момент времени определяется формулой, $\text{м}/\text{с}$:

$$V = g \times t, \quad (4)$$

где: g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; t – время, с .

При этом количество емкостей зависит от высоты установки (H) и в последующих формулах может не учитываться, так как имеет косвенное значение, связанное с ускорением свободного падения. Данная взаимосвязь легко разрушается регулированием общей массы системы (MQ) и коэффициента трения (потери энергии). Такое же косвенное значение имеет расход (Q) так как являться составной частью общей массы (MQ).

Исходя из вышеизложенного, конечная формула расчета мощности гидро-гравитационного преобразователя (P) приобретет форму:

$$P = g \times MQ \times Vm \times \rho, \quad (5)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; MQ – общая масса, $\text{м}^3/\text{с}$; Vm – скорость массы, м/с ; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Для достижения указанного технического результата предлагается использование гидро-гравитационного преобразователя, в котором содержатся вращаемые опорные ролики, размещенные на вертикальном основании в виде треугольника, на которой размещена гибкая бесконечная лента с закреплёнными на ней водо-наполняемыми специальными емкостями с возможностью опрокидывания. Верхняя часть бесконечной ленты расположена наклонно относительно вертикальной оси для равномерного напыления емкостей. Подводящий деривационный водовод, распределяя воду по емкостям сформирует общую массу (MQ) и передает кинетическую энергию падающей массы на передающий вал к которой закреплен электрогенератор. Для достижения угловой скорости электрогенератора в гидро-гравитационном преобразователе достигается определенная линейная скорость гибкой бесконечной ленты, преобразуемая в угловую скорость посредством ведомой звезды.

При низких расходах (Q) воды и как следствие недостатка электрической мощности, в состав гидро-гравитационного преобразователя устанавливается понижающая кинематическая пара. Данная система достигает угловой скорости электрогенератора за счет увеличения гибкости набора линейной скорости. Подобные системы передачи механической энергии широко применяются в промышленности.

Таким образом, гидро-гравитационный преобразователь способен найти свое применение в области генерации электрической энергии, в качестве механических приводов для различных гидравлических устройств, где применение электрических приводов категорически недопустимо.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0031).

Литература

1. А. А. Гришаев. Энергетика свободного падения. Институт метрологии времени и пространства, Москва: 2010. С 1–3.
2. А. К. Лямасов. Разработка и исследования повышающего гидротрансформатора для гидроэнергетических установок малых и микро-ГЭС // Диссертация. 2014. С 16–43.
3. П. Е. Левковский Поиск оптимальных конструкций водяных колес в работе Шарля Боссю // Современные проблемы науки и образования. Москва, 2012. № 1. С 2–3.
4. С. Г. Плачкова, И. В. Плачков. Водяные колеса и их эволюция // Киевэнерго, 2001. С. 35–48.
5. Р. Р. Ачикасов, В. В. Грицан. Оптимизация конструктивных параметров МГЭС с ортогональной турбиной и регулирующим бассейном // Природообустройство – 2015, – № 5. – С. 25–30.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕВЕРНЫХ И АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Хоютанов А.М.¹, Давыдов Г.И.¹, Васильев П.Ф.¹, Местников Н.П.^{1,2}, Реев В.Г.^{1,2},
Ачикасов Р.Р.¹

¹ ФИЦ ЯНЦ СО РАН ИФПТС СО РАН, Якутск

² СВФУ им. М.К. Аммосова, Якутск

shuriklater@mail.ru

Одной из стратегических задач Российской Федерации в сфере энергетики является развитие распределённой генерации в удаленных и изолированных районах. Соответствующее направление отмечено во всех отраслевых и макрорегиональных документах стратегического планирования, включая Доктрину энергетической безопасности Российской Федерации, Энергетическую стратегию России на период до 2035 года, стратегии социально-экономического развития Дальневосточного федерального округа и Арктической зоны Российской Федерации. Реализация указанного направления предполагает замещение действующей неэффективной дизельной (мазутной, угольной) генерации на основе внедрения современных энергетических технологий, включая ВИЭ, а также обеспечение локального энергоснабжения новых инвестиционных проектов вдали от централизованной энергетической инфраструктуры. В данной работе рассмотрены пути повышения эффективности функционирования энергетических систем северных и арктических территорий Республики Саха (Якутия).

Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера. В автономных энергосистемах Северо-Востока России совершенствуется применение солнечных электростанций [1]. Бесперебойное функционирование и стабильность режимов работы солнечных электростанций зависят от характера влияния внешних факторов, таких как: солнечная инсоляция; облачность; задымление окружающей среды, вызванное лесными пожарами; температура окружающей среды; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей (пыль, снег). Влияние данных факторов имеет сезонный характер. Отсутствие учета внешних факторов приводит к отклонениям расчетных и фактических показателей функционирования солнечной электростанции на 10...22%.

Проведенные натурные исследования по идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на режим работы солнечных электростанций, функционирующих в составе автономных энергосистем, которые установили следующее [1]: поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное мелкодисперсными фракциями пыли, уменьшает выработку электроэнергии на 44...46%; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное снеговым покровом, уменьшает выработку электроэнергии на 12,4...79%; задымление окружающей среды, вызванное сезонными лесными пожарами, уменьшает выработку электроэнергии на 33,88...74,42%; наличие облачности уменьшает выработку электроэнергии на 8,03...95,18%; при температуре окружающей среды в диапазоне –60...+20 °С показатели выработки электроэнергии (–3,28...–0,16%); температура окружающей среды в диапазоне +30...+40 °С уменьшает выработку электроэнергии на 16,81%.

Методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, разработанная на основе совокупности методик расчета выработки электроэнергии, и технико-экономических показателей, позволяет повысить достоверность результатов расчета параметров функционирования электростанций к фактическим значениям за счет дополнительного учета внешних факторов.

Разработанная в [1] математическая модель функционирования солнечных электростанций на базе предложенной методики, учитывает внешние факторы, и позволяет выполнить оценку ее энергопотенциала. При этом доказано, что данная модель увеличивает достоверность результатов расчета в среднем на 4,69% путем сопоставления расчетных и фактических данных функционирования 10 действующих солнечных электростанций на территории Северо-Востока России.

Разработанный в [1] способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей электростанций, учитывает траекторию движения Солнца, и позволяет увеличить выработку электроэнергии на 33,25%. Сущность данного способа заключается в размещении двухсторонних фотоэлектрических панелей по дугообразной форме на специальном светоотражающем покрытии. Данный способ позволяет увеличить объем экономии топлива на 34%, уменьшить объемы выбросов CO₂ на 33,8% в течение летнего периода. При этом размер площади размещения панелей увеличивается в сравнении с линейным способом размещения.

Разработанный в [1] способ защиты фотоэлектрических панелей электростанций от негативного влияния поверхностного загрязнения, вызванного мелкодисперсными фракциями пыли в летне-осенний и снеговым покровом в зимне-весенний периоды, предохраняет от образования загрязнения на поверхности панелей в течение 14 суток вследствие чего уменьшается периодичность их очистки. Сущность данного способа заключается в нанесении жидкого воскового покрытия на поверхность панели. Исследования показали, что применение разработанного способа снижает интенсивность загрязнения панелей. При отсутствии применения данного способа защиты, выработка электрической энергии снижается на 46%, а при применении – на 9,90%. То есть эффект от применения данного способа уменьшает уровень снижения выработки электроэнергии по причине негативного влияния поверхностного загрязнения – в среднем на 37%.

Проведенный анализ показателей надежности автономной энергосистемы с солнечной электростанцией и системой накопления энергии на примере с. Мачах (северная Якутия) показал, что при комплексном применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов, следующее: уменьшения недоотпуска электроэнергии на 2,88%; увеличения коэффициента готовности объекта на 0,013 о.е.; увеличения вероятности безотказной работы на 0,14 о.е. Техничко-экономическая и экологическая оценки функционирования автономной энергосистемы с солнечной электростанцией на примере с. Мачах (северная Якутия) показали, что при комплексом применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов, следующее: достижение годовой экономии моторного масла – 0,23 т; годовая экономия дизельного топлива – до 17,55 т; уменьшение годовых выбросов CO₂ на 55,29 т.; период автономной работы солнечной электростанции без выработки дизельной электростанции – до 1 мес./год; дисконтированный срок окупаемости применения способов в оцениваемый объект – 11 лет. Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономных энергосистем с солнечными электростанциями, при комплексном применении представленных способов, показал, что в летний период – продолжительность автономного питания от солнечной электростанции составила 14...24 часов в сутки. При этом коэффициент использования установленной мощности солнечной электростанции увеличивается на 7,5...9,5% [1].

Исследование возможного применения тепловых насосов в изолированных энергосистемах. В настоящее время использование тепловых насосов (ТНУ) является одним из эффективных методов энергосбережения. Широкое применение ТНУ получили в таких странах как Швеция, Норвегия, Финляндия и т. д. В России ввиду дешевизны природного топлива большого распространение не получили. Однако в арктических территориях с изолированными системами энергоснабжения цена традиционного топлива может возрасти до 2,5 раз из-за расходов на транспортировку. В связи с чем является актуальным внедрение новых методов энергосбережения [2].

На рис. 1 представлена схема ТНУ [2]. Первым элементом является испаритель. В нем происходит подвод низко потенциального тепла хладагенту. Хладагент, имеющий низкую температуру кипения, начинает фазовый переход из жидкого в газообразное состояние. Далее газообразный хладагент подводится к компрессору (2), где происходит процесс сжатия, сопровождающийся повышением температуры до 100 °С. В конденсаторе (3) горячий хладагент

отдает тепло теплоносителю, при этом происходит фазовый переход в жидкое состояние. Дроссельная шайба (4) предназначена для снижения давления и температуры хладагента до первоначального значения. Горячий теплоноситель после конденсатора накапливается в баке аккумулятора (5) для сглаживания расхода теплоносителя.

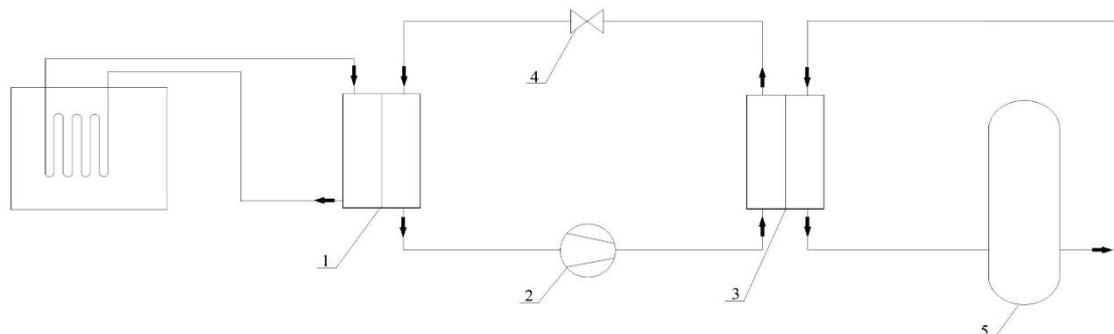


Рис. 1. Схема ТНУ: 1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссельная шайба; 5 – бак аккумулятор

Предлагается внедрение ТНУ к эксплуатируемым дизельным электростанциям (ДЭС) с утилизацией тепла выхлопных газов [3]. В качестве источника низкопотенциального тепла в зимнее время возможно использование непромерзающих водоемов (реки, озера), находящихся в непосредственной близости к населенным пунктам, также возможно использование низкопотенциального тепла земли, (температура кипения фреона -26 С) либо воздуха при условии, что температура воздуха должна быть выше температуры кипения фреона. Тепловую энергию, выработанную в ТНУ, предлагается пускать на нагрев обратной и подпиточной воды. Путем внедрения ТНУ происходит дозагрузка ДГУ до расчетных оптимальных значений (рис. 2), что ведет к снижению удельного расхода дизельного топлива, подключению дополнительного источника тепла и в перспективе к увеличению отопительного запаса для подключения новых потребителей. Интеграция ТНУ в ДЭС осуществляется с применением системы автоматического управления (САУ) для синхронизации и оптимизации расходов сетевой, подпиточной воды и горячего теплоносителя ТНУ.

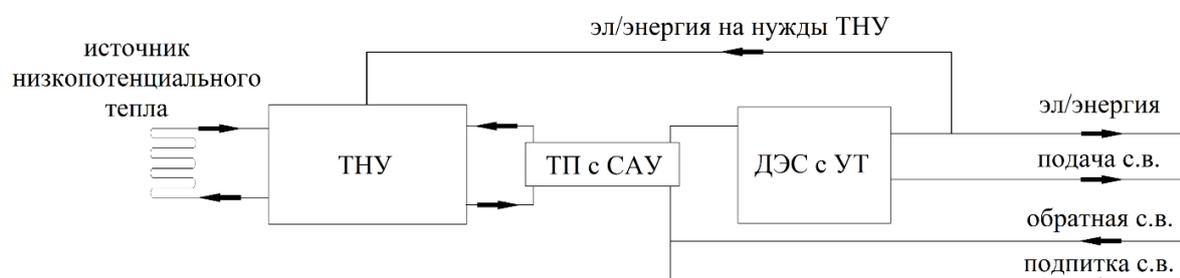


Рис. 2. Схема ДЭС с ТНУ

В работе [3] проведен первичный оценочный технико-экономический расчет для ДЭС с утилизацией тепла для п. Эльдикан. Электрическая мощность станции равна 14,9 МВт при выработке тепла 1 Гкал/час. При внедрении теплового насоса с коэффициентом трансформации равным 2,5 ед. тепловой производительностью 58 кВт в количестве 5 шт. повышается теплопроизводительность ДЭС на 25%. Проведенная первичная оценка возможного применения теплового насоса с интеграцией в работу ДЭС показал свою состоятельность. В последующих этапах настоящего проекта необходимо проведение детализированного поэлементного изучения, разработки структурной схемы, разработки наиболее эффективного способа внедрения ТНУ в работу ДЭС, разработки методики расчета режимных параметров и оценки эксплуатационной надежности.

Опытно-полевые испытания бесплотинного гидроагрегата. Бесплотинный гидроагрегат представляет собой гидротурбину со встроенным гидронасосом, который приводится в действие свободным течением потока реки. При этом заявленная для работы скорость потока реки определена в пределах 1 м/с и выше. Принцип действия сводится к тому, что встроенный гидронасос нагнетает воду в трубопровод под давлением, откуда далее подается на раструб

струи. Предполагается применение системы управления струей, контролирующую подачу воды на активную гидротурбину Пелтона или гидротрансформатор с электрогенератором [4–5].

Русловой гидроагрегат устанавливается в свободный водный поток, при этом он преобразовывает поток реки в механическое вращение вертикально расположенного вала и приводит в движение гидронасос, который нагнетает воду в трубопровод, создавая избыточное давление в нем. Вода, протекая по трубам, подается на орошение, в гидроаккумулирующий бассейн или используется по другому назначению.

Важнейшим элементом руслового гидроагрегата (рис. 3), является рабочая лопасть. Благодаря Г-образной раме рабочая лопасть имеет две плоскости активного преобразования потока.

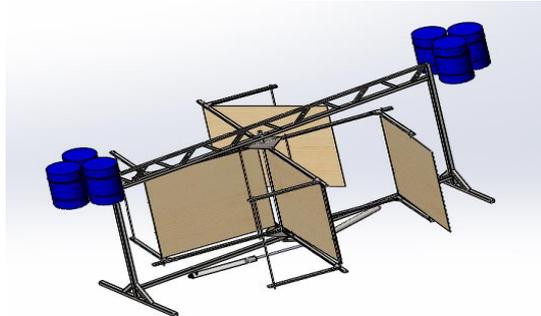


Рис. 3. Русловой гидроагрегат

Рабочая лопасть, состоящая из подвижной пластины закрепленная посредством свободной оси к Г-образной раме, воспринимает давление потока реки и прижимает подвижную пластину к упору. В процессе вращения вертикально расположенного вала и рабочей лопасти, подвижная пластина под действием того же давления потока реки проворачивается на свободной оси и достигает упора. Тем самым устанавливается вторая плоскость, на которую воздействует течение реки. При дальнейшем вращении вертикально расположенного вала и рабочей лопасти, подвижная пластина занимает положение флюгера, тем самым снижая сопротивление. В результате таких естественных действий подвижной пластины, возникает разница давлений на рабочих лопастях, а вместе с тем создает момент силы, передаваемый на вал. Вертикально расположенный вал, передает момент силы и направление вращения на элемент конструкции, исполняющей кинематику коленчатого вала, далее коленчатый вал приводит в действие исполнительный механизм.

К преимуществам конструкции гидроагрегата необходимо отнести:

- снижение показателей негативного воздействия на экологию используемой реки, миграцию рыбы, изменение русла и дна;
- бесперебойность подачи воды по расчетным показателям, по заданным параметрам давления и объема;
- возможность работы под толстым слоем льда и на большой глубине, что довольно часто требуется обеспечить на реках Сибири и Крайнего Севера, что позволит осуществлять бесперебойную подачу электрической энергии к удаленным от централизованного электроснабжения малым населенным пунктам (рис. 4).

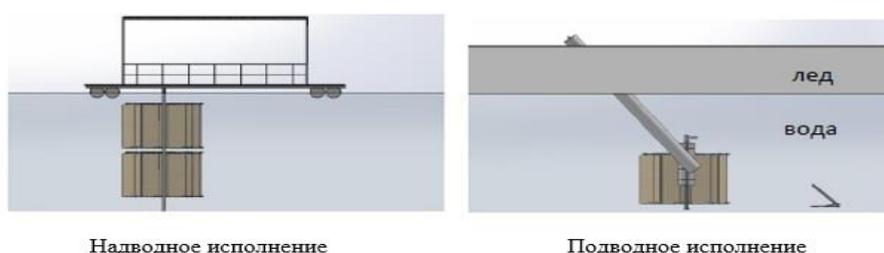


Рис. 4. Возможные варианты исполнения

Кроме энергетических целей гидроагрегат возможно применять для транспортировки воды, в т. ч.: по напорному водоводу; мелиорация; гидроаккумулирование; очищение воды (обратный осмос).

Натурные испытания проводились на створе реки Лена у берега в районе города Якутск. Для натурных испытаний гидроагрегат был выполнен из профильных труб различного сечения. В качестве активной рабочей лопасти применен прямоугольный щит из древесного материала. Для удержания гидроагрегата в плавучем состоянии применялся – понтон. Для поддержания гидроагрегата в рабочем положении применена рама, в которую установлен гидроагрегат. В неподвижном состоянии гидроагрегат удерживает якорное устройство. Гидроагрегат имеет вертикально расположенный вал с механизмом изменения положения лопастей. В момент встречного течения потока реки, создается возможность направленного вращения рабочего колеса, при этом лопасти, естественным образом нивелируются относительно потока, тем самым развивая максимальную мощность гидротурбины в целом.

Заявленная для работы скорость течения реки 1 м/с и достигнутое гидростатическое давление 1 МПа в гидросистеме при площади ометания 4 м² подтверждена.

Использование предлагаемых решений повышения эффективности работы отдельных элементов энергетических систем северных и арктических территорий позволят усовершенствовать методы, средства и системы управления для эффективного функционирования и повышения надежности электроэнергетических систем на базе их интеллектуализации, обеспечить управляемость и повысить надежность систем передачи и распределения электрической энергии на основе высокоточной электроники в условиях экстремально низких температур и многолетнемерзлых грунтов, а также использовать новые методы и способы эффективной распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии согласно концепции развития энергетической инфраструктуры арктических территорий РФ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FWRS-2024-0031).

Литература

1. Местников, Н. П. Прикладные способы усовершенствования солнечных электростанций в условиях Севера / Н. П. Местников, А. И. Хайбуллина, А. М. Н. Альзаккар. – Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2023.
2. Реев, В. Г. Анализ внедрения тепловой насосной установки в условиях Севера и Арктики Республики Саха (Якутия) / В. Г. Реев, П. Ф. Васильев // Новые технологии в учебном процессе и производстве : Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракетоуплана многоразовой транспортной космической системы «Буран», Рязань, 12–14 апреля 2023 года / Под редакцией А.Н. Паршина. – Рязань: Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2023.
3. Реев, В. Г. Расчет цикла теплового насоса при различных источниках низкопотенциального тепла в условиях Арктики Республики Саха (Якутия) / В. Г. Реев, Д. С. Г. Утум // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2023.
4. Гришаев А. А. Энергетика свободного падения. Институт метрологии времени и пространства, Москва: 2010. С 1–3.
5. Лямасов А.К. Разработка и исследования повышающего гидротрансформатора для гидроэнергетических установок малых и микро-ГЭС // Диссертация. – 2014. С 16–43.

ПОЛУЧЕНИЕ БИОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ И ПОЛИСАХАРИДОВ МИКРОБНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Шигаров Г.И., Мещерякова А.В., Новокупцев Н.В., Ревин В.В.

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», г. Саранск

gshigarov@mail.ru

В настоящее время для производства древесных композиционных материалов используют синтетические смолы, которые в процессе эксплуатации выделяют токсичные летучие вещества и канцерогены. Для решения этой проблемы перспективным направлением является использование в качестве связующего полисахаридов микробного происхождения для получения древесных биокomпозиционных материалов широкого назначения, в частности экзополисахарид леван.

В настоящее время разрабатывается и производится множество различных древесных композиционных материалов, обладающих хорошими эксплуатационными и потребительскими свойствами. Несмотря на высокие технические показатели и отсутствие необходимости в использовании высококачественной древесины, данные материалы имеют серьезные недостатки. Получение на основе синтетических связующих обуславливает выделение ими в процессе эксплуатации в воздушную среду фенола, формальдегида и ряда других токсичных веществ. Поэтому проблема снижения токсичности древесных композиционных материалов весьма актуальна. Для ее решения используют различные способы, но, к сожалению, существуют определенные проблемы. Поэтому ведется интенсивный поиск новых природных соединений, способных заменить синтетические смолы биологическим связующим на основе микробных полисахаридов [1, 2].

Перспективными являются связующие, в состав которых входят биополимеры – полисахариды микробного происхождения, одним из которых является экзополисахарид леван [3]. Он обладает высокими адгезивными свойствами и может быть использован при получении биокomпозиционных материалов на основе древесного сырья, которые соответствуют современным требованиям стандартов – экологическим, эксплуатационным, физико – механическим и потребительским характеристикам (рис. 1) [4, 5].

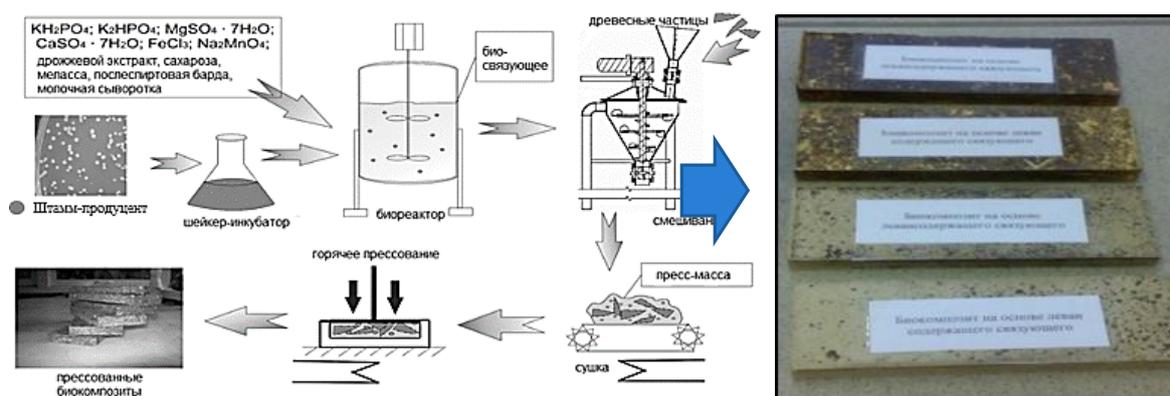


Рис. 2. Древесные биокomпозиты на основе микробного левана и технологическая схема их получения [4]

В результате проведено культивирование штамма-продуцента левана на питательных средах, содержащих мелассу (отхода свеклосахарной промышленности) в качестве дешевого источника углерода в различных концентрация и было определено содержание экзополисахаридов в культуральных жидкостях. Для повышения адгезивных свойств и реакционной способности микробных полисахаридов, в том числе и левана проводят их модификацию. Получены

биокомпозиционный материал на основе древесного сырья и изучены их физико-механические характеристики. При этом предел прочности при статическом изгибе составил 7 – 24 МПа в зависимости от состава биокompозита и условий его получения. Водопоглощение было равно 17%, а разбухание по толщине в воде – 10%. Также было проведено изучение структуры и химических изменений в древесных биокompозитах методами рентгеновской томографии, сканирующей электронной микроскопии и ИК-Фурье-спектроскопии (рис. 2).

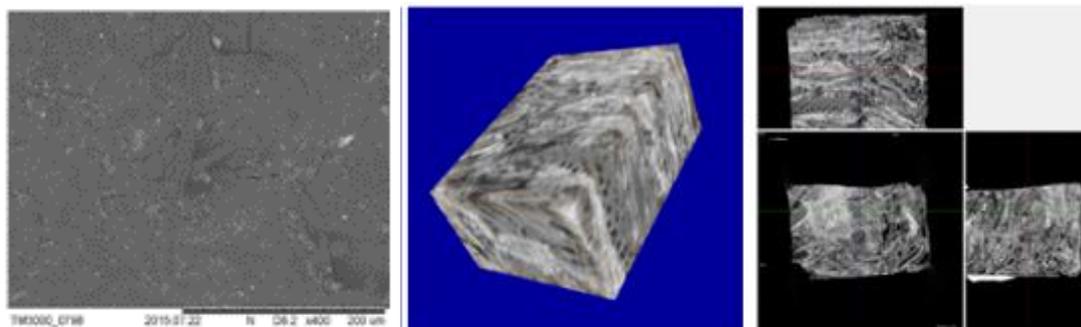


Рис. 2. Изучение структуры биокompозиционных материалов

Ключевые преимуществами данного направления являются: экологическая безопасность; биоразлагаемость и биосовместимость с окружающей средой; утилизация отходов промышленности; себестоимость ниже на 25–50% по отношению к существующим аналогам. Показана возможность получения биокомпозиционных материалов на основе лигноцеллюлозного сырья и полисахарида левана в качестве биосвязующего.

В итоге, можно констатировать, что полученные биокомпозиционные материалы могут найти широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности получение мебели для детских и медицинских учреждений, а также биоразлагаемых контейнеров для сельского хозяйства, растениеводства и флористики.

Литература

1. Revin V. Production of bacterial exopolysaccharides: xanthan and bacterial cellulose / V. Revin, E. Liyaskina, M. Parchaykina [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 19, № 24. P. 14608–14646.
2. Novokuptsev N. Production of an environmentally friendly, pressed composite material from straw using biological binders developed from modified residual beer yeast and spent microbial culture media containing the polysaccharide levan / N.V. Novokuptsev, D.A. Kadimaliev, A.J. Abd [et al.] // Journal of Materials and Environmental Science. 2018. Vol. 9, № 9. P. 2539-2548.
3. Ревин В. В. Биокompозиционные материалы: монография / В. В. Ревин, Д. А. Кадималиев, В. В. Шутова [и др.]. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2021. 332 с.
4. Revin V. V., Novokuptsev N. V, Red'kin N. A. Optimization of cultivation conditions for *Azotobacter vinelandii* D-08, producer of the polysaccharide levan, for obtaining biocomposite materials / V. Revin, N. Novokuptsev, N. Red'kin // Bioresources. – 2016. Vol. 11, № 4. P. 9661–9675.
5. Kadimaliev D. Computation of durability of particle boards based on biobinders during thermal aging / D. Kadimaliev, V. Revin, V. Vodyakov [et al.] // Journal of the Indian academy of wood science. 2021. Vol. 18, № 6. – P. 26–31.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТОИМОСТНОЙ ОЦЕНКИ БРИЛЛИАНТОВ ФАНТАЗИЙНОГО ЦВЕТА

Эверстова Д.Г.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

everstova_d@mail.ru

Для бриллиантов фантазийных цветов прейскурранты не разрабатываются, в отличие от стандартных бриллиантов, поэтому стоимость формируется исключительно на основе биржевых цен на определенный камень фантазийного цвета. Стоимостная оценка бриллиантов фантазийного цвета требует учета большего количества факторов, чем при оценке стандартных бриллиантов. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается разработанная методика расчета цен на бриллианты фантазийного цвета, основанная на индексе FCDI и средней рыночной стоимости определенного фантазийного цвета бриллианта. С использованием разработанной методики составлены прейскурранты для бриллиантов фантазийного цвета, охватывающие 16 цветовых характеристик.

Для оценки бриллиантов обычных цветов существуют стандарты, опираясь на которые определяется их стоимость. Индикатором цен на бриллианты является еженедельный прейскуррант Rapaport Diamond Report, но стоимость бриллиантов фантазийных цветов в нем не отражается. Все природные бриллианты фантазийного цвета известны как чрезвычайно редкие природные ресурсы, поэтому ценность фантазийного бриллианта возрастает вместе со сложностью определения и редкости его цвета. Бриллианты фантазийных цветов сложно оценить, так как цена на подобные бриллианты зависит от интенсивности цвета, массы и качества камня, а также редкости цвета [1].

Два бриллианта с одинаковыми цветовыми оценками могут сильно различаться по цене в зависимости от того, насколько красиво выглядит бриллиант [2]. Небольшие вариации в окраске приводят к значительным скачкам стоимости. Например, для красных и розовых бриллиантов возможно резкое снижение стоимости, если у них проявляется коричневый оттенок. И наоборот, если основной цвет – коричневый, то стоимость может подскочить вверх, если проявляется оранжевый оттенок. Для синих бриллиантов нежелательным является серый оттенок, а для зеленых – желтый оттенок. Поэтому описание цвета должно быть более точным в терминологическом плане, а также сопоставимым, то есть выраженным количественно.

Поскольку цвет является характеристикой электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов, качественная объективная оценка цвета камня должна производиться с использованием определенной системы. Для исключения субъективности при определении фантазийного цвета бриллиантов в работе [3] предложен метод с использованием колориметрической системы, разработанной всемирно известной компанией Pantone Inc. и использующей цифровую идентификацию цветов. Однако в настоящее время не существует методики определения стоимости цветных бриллиантов из категории «фантазийных», поскольку такие камни являются настоящей редкостью. Тем не менее, в определенных спорных ситуациях требуется обоснованная безусловная база для доказательства стоимости бриллианта фантазийной окраски.

С другой стороны, цены на бриллианты вообще, а в случае бриллиантов фантазийного цвета, сильно зависят от «рыночных» цен. Для того, чтобы получить представление об уровнях цен, сложившихся на рынке цветных бриллиантов, дилеры и геммологи обычно собирают информацию о реальных сделках с этими камнями, в первую очередь по итогам аукционных торгов на Sotheby's и Christie's. Иногда в каталогах этих аукционов при подготовке к продаже какого-либо цветного бриллианта приводятся цены сделок с другими подобными камнями [4]. С учётом этих данных на основе операций по приобретению десятков тысяч фантазийных

цветных бриллиантов с 2005 г. для отслеживания изменений стоимости бриллиантов фантазийных цветов компанией Fancy Color Research Foundation (далее – FCRF) разработан индикатор изменений рыночных цен на желтые, розовые и синие фантазийные бриллианты – три категории, которыми торгуют наиболее часто, называемый «индекс» [4, 5].

Индекс представляет более глубокое понимание того, как цены на фантазийные цветные бриллианты влияют на розничные продажи ювелирных изделий, а также на оптовую торговлю и добывающую промышленность. Данный индекс обновляется каждый квартал. Индекс FCDI (Fancy Color Diamond Index) можно использовать для анализа и прослеживания истории изменения цен на различные редкие цветные фантазийные бриллианты [5]. Изменения индекса FCDI с 2005 г. по 2022 г. представлены на рисунке 1.

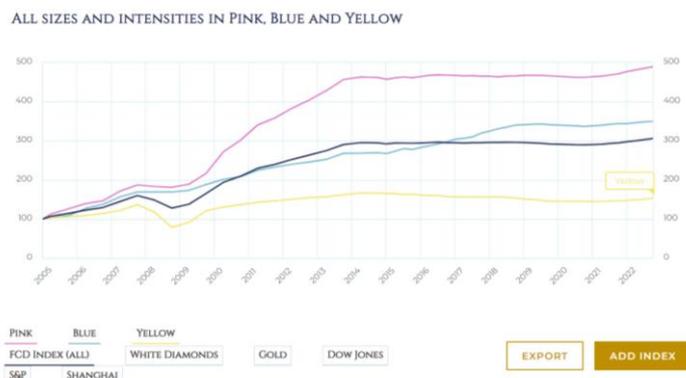


Рис. 1. Изменения индекса FCDI с 2005 г. по 2022 г. [5]

Исходя из этого, в данной работе предлагается методика оценки стоимости бриллиантов фантазийных цветов на основе сочетания метода определения фантазийных цветов бриллиантов, предложенного в работе [3], индекса FCDI, а также средней рыночной стоимости бриллианта с определенным фантазийным цветом.

Таблица 1 показывает совокупный среднегодовой темп роста спроса на бриллианты по отдельности розовых, синих и желтых цветов, а также на все бриллианты данных категорий. Во втором столбце показан общий рост спроса с 2005 года по 2022 год, на третьем – за определенный период. Из таблицы 1 видно, что больше всего увеличился спрос на бриллианты розового цвета, а именно на 389,7%. На бриллианты синего цвета общий спрос за 17 лет увеличился на 250%, а на желтые не так значительно по сравнению с ценами на бриллианты розовых и синих цветов, но все же увеличился на 53,1%.

Таблица 1. Изменения индекса FCDI в процентах [5]

	Годовой темп роста	Общий рост спроса	Рост спроса/период
Розовые	9,2%	389,7%	21,6%
Синие	7,2%	250,0%	13,9%
Желтые	2,4%	53,1%	2,9%
Все бриллианты данных категорий	6,4%	206,0%	11,4%

Для ориентирования по ценам на бриллианты фантазийных цветов требуется отдельный прейскурант, аналогичный прейскуранту Rapaport Diamond Report. Он должен основываться на факторе, который был бы основой для такого прейскуранта. Анализируя цены на бриллианты за текущий период из различных источников, нами была определена средняя цена бриллиантов фантазийных цветов в весовом диапазоне от 0,23 до 19,99 кар., которые приведены в таблице 2. Данный фактор, определенный нами как «средняя цена», явился основой для составления прейскуранта стоимости бриллиантов 16-ти фантазийных цветов и учитывающий такие факторы, как цвет фантазийного бриллианта, интенсивность цвета, масса в каратах, чистота, а также качество огранки и люминесценцию.

Прейскурант разделен по критериям чистоты: для каждой категории чистоты определенного фантазийного цвета создана отдельная таблица. В таблицах по вертикали указаны раз-

меры бриллиантов в каратах, а по горизонтали – интенсивность цвета. Цены указаны для бриллиантов высшего качества огранки (то есть – А) и не имеющих люминесценцию. Прейскуранты охватывают 16 фантазийных цветов, определяемых по методике, предложенной в работе [3], включающих буквенно-цифровые обозначения. Также предусмотрено разделение на бриллианты традиционной и «фантазийной» огранки. Однако цены в этом прейскуранте являются основой всего расчета стоимости фантазийного цвета бриллианта. Для корректного расчета стоимости по данному подходу следует в категории размерности брать среднюю цену за последнее значение веса, то есть если в размерной категории 0,23–0,29 карат средняя стоимость бриллианта – 2100 \$, то это будет средняя цена за 0,29 карат. Например, для бриллианта массой 0,24 карат стоимость определяется методом пропорции.

Таблица 2. Средняя стоимость бриллиантов желтого и оранжево-желтого цвета (5Y и 2,5Y) круглой формы огранки за 1 карат: а) для бриллиантов чистоты IF; б) для бриллиантов чистоты VVS

а)

IF	Fancy Light	Fancy	Fancy Intense	Fancy Vivid	Fancy Deep	Fancy Dark
0.23 - 0.29	2100	2200	3900	6050	2750	2700
0.30 - 0.49	2350	2450	4350	6800	3100	3100
0.50 - 0.69	3500	4450	7450	13900	5500	5200
0.70 - 0.99	4500	5800	9800	18700	7450	6500
1.00 - 1.49	5300	7150	11300	24700	9150	7450
1.50 - 1.99	7150	9100	16100	29600	11600	10300
2.00 - 2.99	8600	12000	19600	41700	15300	13500
3.00 - 3.99	9100	12600	22900	57000	18800	14300
4.00 - 4.99	11200	15500	28200	70000	22700	17500
5.00 - 6.99	13700	17600	32300	84000	24200	18700
7.00 - 9.99	17400	21900	40300	93000	29600	23400
10.00 - 19.99	18400	26500	48400	116000	29600	23900

б)

VVS	Fancy Light	Fancy	Fancy Intense	Fancy Vivid	Fancy Deep	Fancy Dark
0.23 - 0.29	1900	2050	3600	5550	2550	2450
0.30 - 0.49	2150	2200	4000	6250	2850	2850
0.50 - 0.69	3200	4050	6850	12700	5050	4750
0.70 - 0.99	4150	5300	9000	17100	6850	6000
1.00 - 1.49	4850	6550	10400	22700	8400	6850
1.50 - 1.99	6550	8300	14800	27100	10600	9450
2.00 - 2.99	7900	11000	18000	38200	14100	12300
3.00 - 3.99	8300	11500	21000	52000	17300	13100
4.00 - 4.99	10200	14200	25900	65000	20800	16000
5.00 - 6.99	12600	16200	29600	77000	22200	17100
7.00 - 9.99	15900	20100	37000	85000	27100	21500
10.00 - 19.99	16900	24300	44400	106000	27100	21900

Стоимость изменяется так же от таких факторов как качество огранки и люминесценция. В зависимости от качества огранки стоимость снижается следующим образом: для качества огранки Б – на 2% от стоимости качества огранки А; для качества огранки В – на 5% от стоимости качества огранки А; для качества огранки Г – на 11% от стоимости качества огранки А. В зависимости от люминесценции стоимость снижается следующим образом: для средней люминесценции стоимость понижается на 4%; для сильной люминесценции стоимость понижается на 8%. В таблице 3 представлена совокупность факторов, влияющих на стоимость фантазийного цвета бриллианта.

Таблица 3. Изменение стоимости бриллианта фантазийного цвета от дополнительных факторов

Качество огранки	Отсутствует люминесценция	Умеренная люминесценция	Сильная люминесценция
А	–	4%	8%
Б	2%	6%	10%
В	5%	9%	13%
Г	11%	15%	19%

Цена бриллиантов фантазийных цветов варьируется в зависимости от спроса на конкретный цвет и его интенсивность. Поэтому для корректной оценки стоимости определённого бриллианта фантазийного цвета требуется рассчитанную стоимость сопоставить с индексом FCDI на момент составления данных. То есть из работы [5] за индекс – 100 стоит брать период составления данных, указанных в методике (первый квартал 2023г.) и к настоящему периоду будут видны изменения в процентах. Если рыночный спрос на определённый фантазийный

цвет с конкретной интенсивностью возрос или снизился, то предстает возможность скорректировать стоимость уже оценённого бриллианта.

Таким образом, в данной работе разработана методика стоимостной оценки бриллиантов фантазийного цвета, а также составлены прейскуранты для 16 фантазийных цветов бриллиантов на основе их средней стоимости. При расчете стоимости с учетом всех характеристик бриллиантов предлагаемая методика позволяет получить более точное представление о реальной цене бриллиантов фантазийных цветов и положении их на рынке.

Данная работа выполнена в рамках НИР «Разработка методического обеспечения аттестации и стоимостной оценки ограненных алмазов (бриллиантов)» (шифр «Джемсонит») по Государственному контракту № 2123189201162017729147283/2021-116 от 22.06.2021 г.

Литература

1. Бриллианты фантазийных цветов (Fancy Diamonds). Почему они дороже белых? – URL: <https://mgc-labs.ru/publication/brillianty-fantaziinyh-tsvetov-fancy-diamonds-pochemu-oni-dorozhe-belyh/> (дата обращения: 15.08.2024).
2. Color Diamond Prices – The Value of Fancy Color Diamonds – URL: <https://www.leibish.com/color-diamond-prices-the-value-of-fancy-color-diamonds-article-530> (дата обращения: 15.08.2024).
3. Правила и порядок определения фантазийных цветов бриллиантов: методические рекомендации. С.: Смоленский геммологический центр. Смоленск, 2008. 25 с.
4. Цветные бриллианты – URL: <http://www.diamanters.ru/color.htm> (дата обращения: 16.08.2024).
5. Fancy Color Research Foundation – Index – URL: <https://www.fcresearch.org/the-fancy-color-diamond-index/> (дата обращения: 16.08.2024).



РЕШЕНИЕ

ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ЦЕЛОСТНОСТЬ И РЕСУРС В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ», ПРИУРОЧЕННОЙ К 75-ЛЕТИЮ ЯНЦ СО РАН

С 19 по 23 сентября 2024 г. в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) – обособленном подразделении ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» (ЯНЦ СО РАН) состоялась Всероссийская конференция «Целостность и ресурс в экстремальных условиях» (ЦРЭУ-2024), приуроченная к 75-летию ЯНЦ СО РАН. Конференция проводилась в рамках мероприятий, посвященных **300-летию РАН** и **II Арктического конгресса «Арктика – территория стратегических научных исследований»** и стала продолжением одноименной международной конференции, организованной в 2019 году. Официальным спонсором конференции выступила компания ООО «МИЛЛАБ».

В рамках конференции проведены мероприятия по увековечению памяти известных учёных ИФТПС СО РАН:

– открытие почётной мемориальной доски выдающемуся советскому и российскому учёному в области комплексных проблем энергетики, заслуженному энергетик РФ, почётному гражданину РС(Я), лауреату премии им. Г.М. Кржижановского РАН, участнику Великой Отечественной войны, доктору технических наук, профессору **Н.А. Петрова**.

– научная секция, посвящённая 70-летию со дня рождения ведущего учёного в области теплообменных процессов при низких температурах, доктора технических наук **Е.Г. Старостина**;

Также организована молодёжная конференция «Материалы и технологии для экстремальных условий» при финансовой поддержке **Научно-образовательного фонда молодых ученых Республики Саха (Якутия) (НОФМУ)**, в которой приняли участие студенты, аспиранты, специалисты и молодые ученые.

В программу конференции включено **147** поданных заявок, из них заслушаны **86 очных** и **24 дистанционных доклада**, а также рассмотрено **37 заочных докладов**.

В работе Конференции приняли участие ведущие учёные, представители академических, научно-исследовательских, образовательных учреждений, ведомственных производственных организаций из различных городов России, включая Якутск, Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Томск, Саратов, Пермь, Казань, Уфа, Саранск, Екатеринбург, Нижний-Новгород и др. В пленарном и секционных заседаниях участвовали **2** члена-корреспондента РАН, **1** действительный член Академии наук РС (Я), **21** доктор наук, **49** кандидатов наук, **20** научных сотрудников и представителей различных организаций, а также **42** молодых инженера, лаборанта, аспиранта, магистра и студента. В итоге активное участие в конференции приняли **более 130 участников** из организаций:

научно-исследовательских центров и институтов:

- ФИЦ ЯНЦ СО РАН (ИФТПС СО РАН, ИПНГ СО РАН, ИГДС СО РАН);
- НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва;

- НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург;
- ИМАШ РАН, Москва;
- Красноярского филиала ФИЦ ИВТ;
- Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск;
- Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина, Новосибирск;
- ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала, Новосибирск;
- Физико-математический институт ФИЦ Коми Научного центра УрО РАН;
- Институт мерзлотоведения СО РАН им. П.И. Мельникова, Якутск;
- АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ВНИКТИ), Коломна, Московская область;
- АО Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ЦНИИТМАШ), Москва;
- ИСЭМ СО РАН им. Л.А. Ментелева, Иркутск;
- Пермского ФИЦ Уральского отделения РАН.

ВУЗов:

- Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск;
- СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург;
- РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва;
- ВО Российский государственный профессионально-педагогический университет (РГППУ), Екатеринбург;
- Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний-Новгород;
- Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.;
- Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск;
- Тюменский индустриальный университет;
- Уфимский государственный нефтяной технический университет.

производственных организаций:

- ООО «МАГМАВЭЛД СПб», Санкт-Петербург;
- ООО «Астрапроект», Казань;
- ООО «УНТЦ «Сварка», Санкт-Петербург
- ПАО Якутскэнерго, Якутск.

Целью конференции являлось выявление проблем, обсуждение аспектов и выработка решений по актуальным вопросам, связанным с целостностью и жизненным циклом, обеспечением защищённости машин и конструкций, сложных технических и живых систем, функционирующих в экстремальных условиях, фундаментальным и прикладным аспектам физики прочности и механики разрушения при низких температурах, надёжностью и ресурсом конструкций и технических систем в условиях холодного климата, созданием новых хладостойких материалов и технологий, развитием энергетики транспорта энергоресурсов и нефтегазового комплексов на Севере и в Российской Арктике как основы безопасности и росту промышленного и научного потенциала Северо-Востока РФ; расширения межрегионального сотрудничества, привлечения инвестиций и развития инновационных структур, с приобщением молодых ученых, аспирантов и студентов к научным исследованиям в РС(Я).

На Конференции обсуждались **актуальные вопросы**, посвященные:

- техногенной и энергетической безопасности Республики Саха (Якутия) с точки зрения целостности и ресурса, расчетно-экспериментальные и технологические методы обеспечения хладостойкости машин и конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях Севера и Арктики, особенности применения полимерных и композиционных материалов для северных территорий РФ и влияния климатических факторов на их свойства и разрушение, а также экстремальные температурно-временные факторы прочности и защищённости, и геоэкологические риски реализации проектов по развитию нефтегазового комплекса в Арктической зоне;

– натурным испытаниям материалов, элементов конструкций и сложных технических систем в условиях холодного климата, а также разработки и экспериментально-теоретическому обоснованию физических принципов инженерии покрытий с низкоразмерной структурой методами технологий сварки и наплавки;

– живучести локомотивов и подвижного состава железнодорожного транспорта, методам оценки и прогнозирования ресурса ответственных узлов и агрегатов, подверженных циклическим воздействиям и усталости; структурной неоднородности металла труб как причины потери надежности и долговечности оборудования, работающего в условиях арктического климата; особенностям применения сварочных технологий и материалов для конструкций Севера и Арктики, реализации дополнительных способов послесварочной обработки для повышения надежности сварных соединений низколегированных хладостойких сталей при низких климатических температурах;

– региональным особенностям и возможностям развития энергетики Республики Саха (Якутия), в том числе анализу динамики изменения запасов угольных ресурсов и добычи энергетического угля в РС(Я), теплоте фазовых переходов воды как возобновляемого источника энергии; исследованию вариантов энергоснабжения труднодоступных территорий Севера и Арктики, и оценке масштабов рационального использования энергии ветра на труднодоступных территориях востока российской Арктики;

– геофизическому мониторингу состояния мерзлых грунтов, целостности и долговечности дорог и дорожных покрытий в экстремальных условиях Субарктики, эффективным конструкциям противопучинных опор линий электропередач;

– вопросам фундаментального и прикладного характера по созданию и исследованию новых полимерных материалов и их композитов, в том числе нанокompозитов, связанным с рецептуростроением, исследованием физико-механических и эксплуатационных свойств, а также изучением влияния климатических факторов окружающей среды на их свойства; проблемам и перспективам микролегирования литых сплавов, эксплуатации металлических изделий в условиях низких температур;

– исследованию биозаражения как фактора снижения сортности бивней мамонта при длительном хранении и автоматизации процесса создания сувенирной продукции.

На основе обсуждения заслушанных докладов участников всероссийской конференции ЦРЭУ-2024, Оргкомитетом принято следующее решение:

РЕШЕНИЕ:

1. Рекомендовать министерствам и ведомствам Правительства РС(Я) заинтересовывать производственные предприятия и промышленные компании к непосредственному участию в реализации междисциплинарных проектов в качестве промышленных партнеров с целью внедрения и применения на практике разработок научных коллективов, научно-обоснованного решения существующих производственных проблем, развития фундаментальной и прикладной науки.

2. Обратиться в ОУС по физико-техническим наукам Академии наук РС(Я) и научно-технический совет при Главе РС(Я) с просьбой поддержки мероприятий, направленных на научно-технологическое развитие Республики Саха (Якутия) с целью перехода экономики Якутии на новый высокотехнологический уровень путём реализации тесного сотрудничества научно-образовательных и производственных организаций.

3. Рекомендовать для реализации пунктов 1 и 2 настоящего Решения, а также для официальной сертификации новых методов, технологий и материалов, направленных на повышение безопасности и эффективности, целостности и ресурса технических систем, эксплуатирующихся в условиях Севера, Арктики и Субарктики, организацию Центра новых цифровых технологий и климатических испытаний материалов и техники в северном исполнении в рамках Центра арктического превосходства РС(Я).

4. Опубликовать материалы докладов участников пленарного и секционных заседаний в сборнике материалов конференции, в том числе сведения о научном вкладе Н.А. Петрова и Е.Г. Старостина в популярном виде.

Организация работы конференции оценивается положительно. Подчеркивается важная роль Совета молодых ученых и специалистов ИФТПС СО РАН в привлечении молодых учёных, специалистов, аспирантов и студентов к представлению материалов. Это содействует признанию мероприятия школой кадрового резерва.

Программный и организационный комитет конференции выражает огромную благодарность спонсору мероприятия ООО «МИЛЛАБ» и Научно-образовательному фонду молодых ученых РС(Я) за финансовую поддержку.

В заключение участники и соорганизаторы всероссийской конференции отмечают выдающийся вклад сотрудников ИФТПС СО РАН профессора Н.А. Петрова в развитие фундаментальных исследований и прикладных разработок в области комплексных проблем энергетики Севера, и доктора наук Е.Г. Старостина в области фундаментальных основ физики теплообменных процессов при низких температурах, и поздравляют ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», как правопреемника Якутского филиала АН СССР, с 75-летним юбилеем со дня образования.

Генеральный директор ЯНЦ СО РАН,
председатель программного комитета,
член-корр. РАН М.П. Лебедев

И.о. директора ИФТПС СО РАН,
председатель организационного комитета,
к.т.н. Е.С. Лукин

Ученый секретарь ИФТПС СО РАН,
к.ф.-м.н. Н.А. Протоdjeяконова

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель: ЛЕБЕДЕВ М.П., член-корр. РАН
Зам. председателя: СТАРЦЕВ О.В., д.т.н., профессор

Члены программного комитета:

БАХМЕТ Ольга Николаевна, член-корр. РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
БЕРЛИН Александр Александрович, академик РАН, ИХФ им. Н.Н. Семенова
БОЛОТОВ Иван Николаевич, член-корр. РАН, ФИЦ комплексного изучения Арктики им. Н.П. Лавёрова УрО РАН
БУЗНИК Вячеслав Михайлович, академик РАН, ИОНХ РАН
ВОЛОБУЕВ Юрий Сергеевич, к.т.н., Институт сварки АО «НПО «ЦНИИТМАШ»
ГВИШИАНИ Алексей Джерменович, академик РАН, председатель Научного совета РАН по изучению Арктики и Антарктики
ГОРБАЧ Владимир Дмитриевич, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»
ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич, д.т.н., ИФТПС СО РАН
ДЁГТЕВА Светлана Владимировна, член-корр. РАН, ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН»
ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, член-корр. РАН, Институт мерзлотоведения СО РАН
КАБЛОВ Евгений Николаевич, академик РАН, заместитель Президента РАН
КАПИТОНОВА Тамара Афанасьевна, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН
КРИВОВИЧЕВ Сергей Владимирович, академик РАН, ФИЦ «Кольский НЦ РАН»
КУЛЬЧИН Юрий Николаевич, академик РАН, ДВО РАН
ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, академик АН РС(Я), д.т.н., ИФТПС СО РАН
ЛЫСАК Владимир Ильич, академик РАН, ВолгГТУ
МАХУТОВ Николай Андреевич, член-корр. РАН, ИМАШ РАН
ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, академик АН РС(Я), д.т.н., СВФУ им. М.К. Аммосова
ПАНИН Сергей Викторович, д.т.н., ИФПМ СО РАН
ПАРМОН Валентин Николаевич, академик РАН, СО РАН
ПОХИЛЕНКО Николай Петрович, академик РАН, СО РАН
РАССКАЗОВ Игорь Юрьевич, член-корр. РАН, Хабаровский ФИЦ ДВО РАН
РЕНЕВ Евгений Петрович, к.с.-х.н., ФИЦ «Тюменский научный центр СО РАН»
РУДЕНКО Виктор Николаевич, академик РАН, председатель УрО РАН
РУДСКОЙ Андрей Иванович, академик РАН, ректор СПбПУ
САНЕЕВ Борис Григорьевич, д.т.н., ИСЭМ СО РАН
САРАЕВ Юрий Николаевич, д.т.н., ИФТПС СО РАН
СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич, д.т.н., ИФТПС СО РАН
СОКОЛОВА Марина Дмитриевна, д.т.н., ИПНГ СО РАН
СТЕННИКОВ Валерий Алексеевич, академик РАН, ИСЭМ СО РАН
СТЕПАНОВ Анатолий Викторович, д.т.н., ИФТПС СО РАН
ТИМОФЕЕВ Анатолий Михайлович, д.т.н., ИФТПС СО РАН
ТКАЧ Сергей Михайлович, д.т.н., директор ИГДС СО РАН
ХОЛЬКИН Анатолий Иванович, академик РАН, ИОНХ РАН
ШЕВЧЕНКО Владимир Ярославович, академик РАН, ИХС РАН
ШПЕДТ Александр Артурович, член-корр. РАН, ФИЦ «Красноярский НЦ СО РАН»
ЯКОВЛЕВА Софья Петровна, д.т.н., ИФТПС СО РАН

Секретарь конференции – СИДОРОВ Михаил Михайлович, к.т.н., ИФТПС СО РАН
E-mail: conferenceiptpn@inbox.ru

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

ЛУКИН Евгений Саввич, к.т.н., ИФТПС СО РАН, Председатель
АММОСОВА Ольга Александровна, к.т.н., ИПНГ СО РАН
БОЛЬШЕВ Константин Николаевич, к.т.н., ИФТПС СО РАН
БОРИСОВА Мария Захаровна, к.т.н., ИФТПС СО РАН
ВАСИЛЬЕВ Павел Филиппович, к.т.н., ИФТПС СО РАН
ВАСИЛЬЕВА Мария Ильинична, к.т.н., ИФТПС СО РАН
ГАЙНОВ Григорий Анатольевич, ИФТПС СО РАН
ГОГОЛЕВА Ольга Владимировна, к.т.н., ИПНГ СО РАН
ДАВЫДОВ Геннадий Иванович, ИФТПС СО РАН
ИВАНОВ Александр Русланович, к.т.н., ИФТПС СО РАН
КРАВЦОВА Ольга Николаевна, к. т.н., ИФТПС СО РАН
ПАВЛОВ Никита Владимирович, ИФТПС СО РАН
ПЕТРОВ Виктор Николаевич, ИФТПС СО РАН
ПИНИГИН Дмитрий Дмитриевич, ИФТПС СО РАН
ПРОТОДЬЯКОНОВА Надежда Анатольевна, к.ф.-м.н., ИФТПС СО РАН
СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна, ИФТПС СО РАН
ТАППЫРОВА Надежда Ивановна, ИФТПС СО РАН
ХОЮТАНОВ Александр Михайлович, ИФТПС СО РАН
ШАДРИНОВ Николай Викторович, к.т.н., ИПНГ СО РАН

НАШИ ПАРТНЕРЫ



Официальный спонсор

ООО «МИЛЛАБ» – компания 30 лет специализируется на поставках общелабораторного, испытательного, аналитического и технологического оборудования



Молодежная конференция «Материалы и технологии для экстремальных условий» организовано при поддержке СО НКО «Научно-образовательный фонд поддержки молодых ученых Республики Саха (Якутия)» **НОФМУ** <http://nofmu.ru>

НОФМУ создан в целях стимулирования роста научного потенциала Республики Саха (Якутия) и повышения конкурентоспособности молодых ученых и специалистов научных организаций и научно-образовательных учреждений, специалистов наукоёмких и инновационных предприятий, находящихся на территории Республики Саха (Якутия), а также аспирантов и докторантов очного и заочного обучения



www.millab.ru

Основные направления деятельности компании

- **Аналитика:**
спектрометры, хроматографы, анализаторы
- **Синтез:**
реакторы, термостаты, ротационные испарители, системы молекулярной дистилляции
- **Термообработка:**
вакуумные шкафы, печи
- **Испытания материалов:**
климатические камеры, камеры коррозии
- **Микробиология:**
автоклавы, стерилизаторы, инкубаторы
- **Весы, мешалки, центрифуги, вакуумные станции, дозирующие насосы**
- **Лабораторная мебель**

Преимущества нашей компании



Официальный дистрибьютор



Сертифицированная сервисная поддержка



Лучшие цены



Склад в Москве с запасом оборудования



Комплексные поставки, реализация технически сложных проектов



г. Москва
Т: +7 (495) 933-71-47
info@millab.ru

г. Санкт-Петербург
Т: +7 (812) 612-99-80
spb@millab.ru

г. Краснодар
Т: +7 (861) 201-14-27
south@millab.ru

г. Екатеринбург
Т: +7 (343) 287-29-14
ekb@millab.ru

г. Новосибирск
Т: +7 (383) 363-09-00
sibir@millab.ru

АВТОРЫ

- Абрамов Владимир Владимирович
Аковецкий Виктор Геннадьевич
Аммосов Григорий Сергеевич
Анахов Сергей Вячеславович
Антонов Александр Александрович
Аргунова Кира Константиновна
Балановский А.Е.
Белослюдцева Дайаана Яковлевна
Большев Константин Николаевич
Ботвин Глеб Владимирович
Буслаева Ирина Ивановна
Васильев Андрей Петрович
Васильева Алина Анатольевна
Васильева Мария Ильинична
Ваулин Петр Васильевич
Вит Алина Александровна
Волохов Григорий Михайлович
Гаврильева Анна Андреевна
Галяткин С.Н.
Гладких Андрей Викторович
Гоголева Ольга Владимировна
Гридасов Александр Валентинович
Гуляшинов П.А.
Гусев Евгений Леонидович
Далбаева Елена Александровна
Данилов Александр Дмитриевич
Двирная Елена Вячеславовна
Дондуков Саян Дмитриевич
Еремин Никита Викторович
Ермаков Сергей Борисович
Ефремов Владимир Николаевич
Злобина Ирина Владимировна
Иванов Александр Русланович
Иванов Гаврил Иванович
Иванов М.А.
Иванова Альбина Егоровна
Иванова Ирина Владимировна
Исакова Татьяна Александровна
Каймонов Михаил Васильевич
Капитонова Тамара Афанасьевна
Киселев Артем Юрьевич
Князев Дмитрий Александрович
Коваль Татьяна Васильевна
Колесова Елена Семеновна
Корниенко Герман Викторович
Корнилова Зоя Григорьевна
Коссов Валерий Семенович
Кравцова Ольга Николаевна
Куваев Василий Анатольевич
Агнаев Степан Сергеевич
Алексеев Анисий Анисиевич
Аммосова Л.С.
Андреев Александр Семенович
Аргунова Анастасия Гавриловна
Ачикасов Ростислав Романович
Бекренев Николай Валерьевич
Блазнов Алексей Николаевич
Борисова Мария Захаровна
Бубнова Алла Родионовна
Варламов Степан Прокопьевич
Васильев Павел Филиппович
Васильева Е.Д.
Васильева Мария Ильинична
Винокурова Татьяна Александровна
Возняковский Александр Петрович
Габышев Александр Александрович
Гайдукова Людмила Викторовна
Гао Ю.
Глязнецова Юлия Станиславовна
Голиков Николай Иннокентьевич
Гузанов Б.Н.
Гусев Георгий Николаевич
Давыдов Геннадий Иванович
Данзанова Елена Викторовна
Данилова Сахаяна Николаевна
Демин Кирилл Андреевич
Дьяконов Афанасий Алексеевич
Ермаков Борис Сергеевич
Ерофеевская Лариса Анатольевна
Захаров Василий Егорович
Зуева Ирина Николаевна
Иванов Виктор Климентьевич
Иванов Джулустан Семенович
Иванов Тулуйхан Джулустанович
Иванова Изабелла Карловна
Иванова Надежда Николаевна
Казанцев Александр Георгиевич
Калачева Людмила Петровна
Карпов И.Д.
Климова Аина Михайловна
Ковалев Максим Александрович
Коган Алексей Маркович
Копырин Михаил Михайлович
Корнилова Валентина Васильевна
Корякин Александр Кимович
Котелкова Елена Олеговна
Кротов А.С.
Кузьмин Георгий Петрович

Кушнарёва К.И.
Кычкин Анатолий Константинович
Лазарева Н.Н.
Левченко А.М.
Лифшиц Сара Хаимовна
Лукачевская Ирина Григорьевна
Максимова Екатерина Михайловна
Марков Айтал Еремеевич
Маслацова Анна Алексеева
Махарова Сусанна Николаевна
Местников Николай Петрович
Михайлов Владимир Егорович
Мишигдоржийн Ундрах Лхагвасуренович
Москвитина Людмила Викторовна
Москвичев Егор Владимирович
Непомнящий Александр Сергеевич
Низина Татьяна Анатольевна
Никулин Константин Васильевич
Ноговицын Дмитрий Дмитриевич
Оганьян Эдуард Сергеевич
Охлопкова Айталиа Алексеевна
Павлова Валерия Валерьевна
Пасечная А.А.
Петров Виктор Николаевич
Петров Дмитрий Дмитриевич
Петров Олег Максимович
Петрова Павлина Николаевна
Петухова Евгения Спартаковна
Пинигин Дмитрий Дмитриевич
Попов Георгий Георгиевич
Портнягин Альберт Серафимович
Протодьяконова Надежда Анатольевна
Прохоров Дмитрий Валерьевич
Ревин Виктор Васильевич
Рожин Игорь Иванович
Савин Д.А.
Сакошев Е.Г.
Салтыкова Анастасия Леонидовна
Сараев Юрий Николаевич
Семёнов Сергей Владимирович
Сивцев Семен Исаевич
Сильвестров Артем Степанович
Слепцов Александр Александрович
Слепцов Олег Ивкентьевич
Солдатов Константин Васильевич
Спирин Илья Петрович
Старцев Валерий Олегович
Стаценко Владимир Николаевич
Степанов Валерий Егорович
Стручков Артем Николаевич
Стручкова Галина Прокопьевна
Таппырова Надежда Ивановна
Кычкин Айсен Анатольевич
Лавренчук Варвара Анатольевна
Лебедев Михаил Петрович
Лепов Валерий Валерьевич
Лоскин Николай Николаевич
Макаров И.С.
Малышев Алексей Владимирович
Маркова Марфа Алексеевна
Матушкин А.В.
Медведев П.А.
Мещерякова Ангелина Владимировна
Мичуров Н.С.
Москвитин Степан Григорьевич
Москвичев Владимир Викторович
Нгуен Ван Вин
Низин Дмитрий Рудольфович
Никулин В.Е.
Новокупцев Николай Васильевич
Ноев Иван Иванович
Оконешникова А.В.
Павлов Никита Владимирович
Паршин Сергей Георгиевич
Пермяков Петр Петрович
Петров Вячеслав Васильевич
Петров Марк Григорьевич
Петров Петр Петрович
Петрова Татьяна Николаевна
Пивкин Николай Андреевич
Попов А.С.
Попов Дмитрий Николаевич
Прокопьев Айсен Русланович
Прохоров Валерий Афанасьевич
Радченко Михаил Владимирович
Реев Василий Георгиевич
Саввинова Н.А.
Садыков Руслан Ханафьевич
Сакошев Захар Германович
Санников Игорь Иннокентьевич
Семенов Семен Осипович
Сергеева Людмила Прокопьевна
Сидоров Михаил Михайлович
Скачков Юрий Борисович
Слепцов Гавриил Николаевич
Соколова Марина Дмитриевна
Соловьев Тускул Михайлович
Старостина Анна Егоровна
Старцев Олег Владимирович
Степанов Анатолий Викторович
Степанова Ксения Валерьевна
Стручков Николай Федорович
Сыромятникова Айталиа Степановна
Тарасов Петр Петрович

Тарская Лина Егоровна
Тимаков Максим Владимирович
Тимофеев Михаил Николаевич
Тихонов А.Г.
Улаханов Н.С.
Федорова Айталипа Федоровна
Фесик С.А.
Хабаров Денис Родионович
Хоютанов Александр Михайлович
Чалая Ольга Николаевна
Чириков Александр Александрович
Чуриков Д.О.
Шадринов Николай Викторович
Шардаков Игорь Николаевич
Шегуров Эдуард Анатольевич
Шигаров Георгий Игоревич
Эверстова Дайаана Григорьевна
Яковлева Софья Петровна
Ялыгин Сергей Алексеевич

Терешкин Айсен Леонидович
Тимофеев Анатолий Михайлович
Тимофеева В.В.
Тихонова Сардана Алексеевна
Федоров Андрей Леонидович
Федотова Марина Алексеевна
Фирсов В.В.
Хаглеев Андрей Николаевич
Цветков Роман Валерьевич
Чибулаев Игорь Александрович
Чунин Виталий Владимирович
Шабуневич Виктор Иванович
Шапошников Н.О.
Швецов Олег Викторович
Шеина Зинаида Макаровна
Эверстов М.М.
Яковлев Юрий Аркадьевич
Яковлева Софья Петровна

Оформление и верстка Ю. Болдырева

Дата подписания к использованию: 22.10.2024
Объем издания: 19,5 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 978-5-907851-71-9



9 785907 851719 >