

## Сходна ли физика эффекта Мпембы и «якутского салюта»

Лепов В.В., д.т.н., академик АН РС(Я)

Такие известные публике термины, как «эффект Мпембы» и «якутский салют», часто употребляют вместе, имея ввиду необычное поведение горячей воды при низкой температуре, с первого взгляда не соответствующее известным законам физики. Однако и условия проявления этих явлений, и физическая их интерпретация довольно сильно отличаются. Для экспериментов в обоих случаях используется горячая вода (кипяток температурой около  $90^{\circ}\text{C}$ , или  $363^{\circ}\text{K}$ ), которую подвергают действию низких температур. Однако в первом случае это камера морозильника или рефрижератор, в которых поддерживается температура около  $-24^{\circ}\text{C}$  ( $249^{\circ}\text{K}$ ), а во втором – холодный воздух в условиях якутской зимы с температурой около  $-40^{\circ}\text{C}$  ( $233^{\circ}\text{K}$ ). Якутская зима характеризуется низкой влажностью воздуха, близкой к нулевой. Пар, интенсивно образующийся при испарении горячей воды в окрестности разбрызгиваемых капель, тут же поглощается нагретым воздухом, который мгновенно охлаждается, тут же конденсируя влагу в виде тумана. Процесс испарения и поглощения протекает в динамике, на лету, и на большой площади водяных капель, поэтому жидкость не успевает превратиться в лёд, поскольку фазовый переход - это достаточно энергоёмкий процесс.

В случае «эффекта Мпембы» – даже условия его проявления сильно разнятся. Первоначально данный парадокс упоминался ещё в трудах таких ортодоксальных учёных, как Френсис Бэкон, Рене Декарт, и Аристотель, начиная с 350 г. до нашей эры. В современный период развития науки на это явление в 1963 году обратил внимание школьник Эрасто Мпемба из Республики Танганьика (ныне Объединённая Республика Танзания), заметив быстрое замерзание стаканчиков с горячим мороженым в школьном рефрижераторе по сравнению с

остывшими до комнатной температуры (Mpemba E.B., Osborne D.G. Cool? // Physics Education. - Institute of Physics, 1969. - V. 4, - 3. - P.172-175).

В дальнейших экспериментах исследователями использовалась обычная вода. Эффект подтверждался независимо от условий, когда было возможно испарение жидкости, или нахождение растворенных газов в воде. Обычно 70 мл воды наливались в 100-мл лабораторные стаканчики, которые размещали на пенопластовых листах, чтобы исключить контактный теплоперенос, при этом один образец имел начальную температуру в 25 °С, а другой —90 °С. Однако эффект проявлялся и при других условиях (см. рис.1). Даже размещение воды в пластиковых бутылках, удаление из камеры снега и льда для исключения их плавления в процессе замерзания, не сказывались существенно на проявление «эффекта Мпембы».

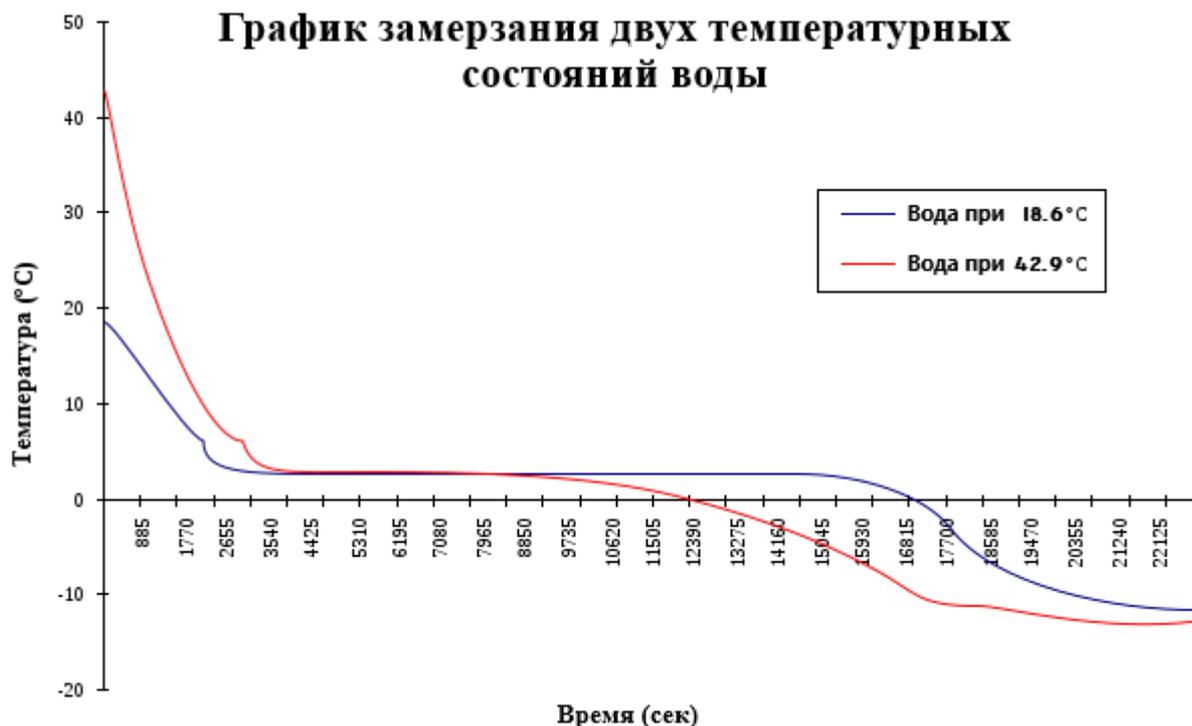


Рис. 1. Эффект Мпембы при начальных температурах воды 18,6 (синяя) и 42,9 °С (красная кривая) [[https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект\\_Мпембы](https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Мпембы)]

Высказывалось множество различных объяснений данного парадокса, одно из них, выдвинутое в 2017 году, отражает мнение большей части ученых, занимавшихся этим вопросом, и состоит в том, что по мере нагревания водородные связи ослабевают, и молекулы воды в кластерах занимают такие позиции, из которых им проще переходить к кристаллической структуре льда (*Yunwen Tao, Wenli Zou, Junteng Jia, Wei Li, Dieter Cremer. Different Ways of Hydrogen Bonding in Water - Why Does Warm Water Freeze Faster than Cold Water? Chem. Theory Comput. 2017, 13, 1, 55–76*). В холодной воде всё происходит так же, но энергии на разрыв водородных связей требуется больше — поэтому замерзание происходит медленнее [Ученые нашли новое объяснение «парадоксу Мпембы». *naked-science.ru*, 9 января 2016. URL: <https://naked-science.ru/article/sci/uchenye-nashli-novoe-obyasnenie>, Дата обращения: 16 декабря 2021]

На рис.2 показана модель вода, находящейся в адиабатически открытой одномерной трубке при некоторой начальной температуре, охлаждаемой потоком более низкой температуры. Источник жидкости разделен на объемную массу (balk B) и поверхностную плёнку (skin S) в правой части области вдоль оси X, с термической диффузностью  $\alpha_b$  и  $\alpha_s$ , соответственно, и отношением массы плотности  $\rho_s/\rho_b = 3/414,16$ . Граница пленки обозначена как  $x = 0$ . Коэффициент теплообмена (испарения) на трубке будет отличаться при отсутствии ( $j = 1$ ) и наличии ( $j = 2$ ) плёнки. [*Chang Q. Sun, Qing Jiang, Weitao Zheng, Ji Zhou, Yichun Zhou. Hydrogen-bond memory and water-skin supersolidity resolving the Mpemba paradox (англ.) // Physical Chemistry Chemical Physics. — 2014-10-09. — Vol. 16, iss. 42. — P. 22995–23002.*]

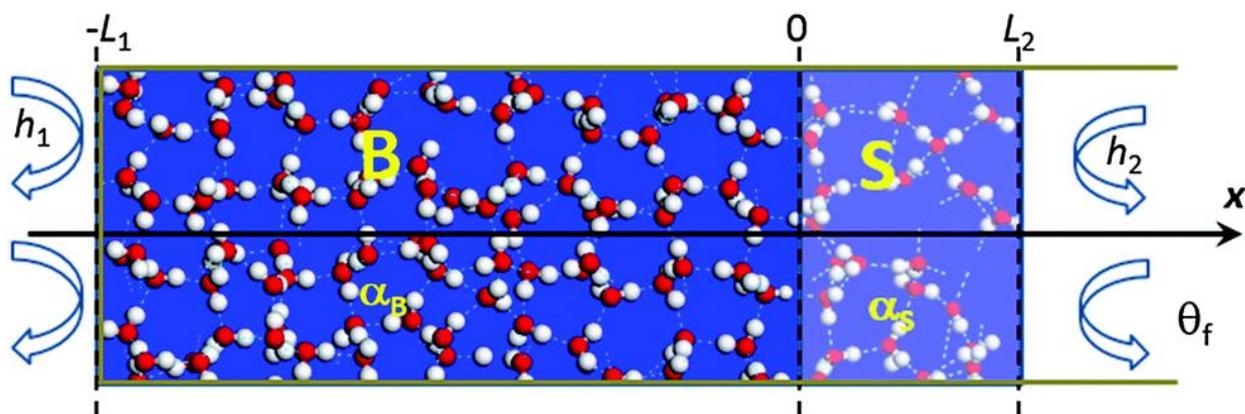


Рис.2. Схема моделирования теплообмена поверхностного слоя и открытой воды с водородными связями (кластерами).

Но здесь следует учитывать тот факт, что водородные связи очень трудно исследовать, и упомянутые работы группы ученых имеют, по большей части, расчётно-теоретический характер. В частности, ими вводится понятие о суперпрочной форме кожи (плёнок) воды, связи Н-О которых при температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеют схожие энергетические характеристики со связями, образующимися во льду при  $-(15-20)\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Несогласованное и взаимокомпенсирующее воздействие электронов на молекулы воды укорачивает водородную связь Н-О, и удлиняет расстояние между несвязанными молекулами О и Н, тем самым обеспечивая двойную поляризацию не связанных между собой молекул. Это усиливает дипольный момент, упругость, вязкость и тепловую устойчивость плёночных форм, при этом потери плотности составляют 25%, что является причиной гидрофобности и вязкости поверхности воды, а также сверхтекучести в микроканалах. Все эти эффекты в совокупности приводят к реализации механизма замедления быстрого замораживания холодной воды.

Более подробно различные аспекты поведения различных форм воды при комнатной и низкой температурах отражены в монографии «Атрибуты воды» [Chang Q. Sun, Yi Sun. The Attribute of Water Single Notion, Multiple Myths. Springer, 2016. - 494 pp. ISSN 0172-6218 Springer

Series in Chemical Physics ISBN 978-981-10-0178-9 ISBN 978-981-10-0180-2 (eBook) DOI 10.1007/978-981-10-0180-2].

Также стоит заметить, что конвекция в горячей воде происходит гораздо эффективнее, и при условии быстрого возникновения вместо поверхностной плёнки ледяной корки с внутренними микроканалами, реализуются идеальные условия для проявления «эффекта Мпембы», как в открытых, так и в закрытых от испарения ёмкостях с водой. Ещё одна версия объяснения эффекта, основанная на распределениях молекул по энергиям в горячей и холодной воде, сильно отличающихся как от классического распределения Максвелла-Больцмана, так и друг от друга, также хорошо укладывается в рамки такой молекулярно-термодинамической теории.

В заключение однозначно можно сказать, что физика процессов в «эффекте Мпембы» (Mpemba paradox) и явлении «якутского салюта» (Yakut salute) совершенно разная в силу различных условий их проявления. Парадокс Мпембы связан с аномально быстрым замерзанием горячей воды по сравнению с водой комнатной температуры, а зрелищное явление якутского салюта воспроизводится с помощью горячей воды в сухой холодной атмосфере Центральной Якутии. Высокая влажность, недостаточно низкая температура, а также использование холодной воды приведёт либо к полному отсутствию данного эффекта, либо к потере его зрелищности.