

НЕКОТОРЫЕ ПАРАДОКСЫ ФИЗИКИ

Поливанов А.А., Колесниченко В.С.

Камышинский технологический институт (филиал) «Волгоградского государственного технического университета», Камышин, e-mail: polivanov@kti.ru

Статья посвящена рассмотрению двух известных физических парадоксов – эффекта Мпембы и явление, получившее название «кризис теплообмена». Эффект Мпембы – известное физическое явление, которое заключается в том, что горячая вода в определенных случаях замерзает быстрее, чем холодная, хотя при этом он противоречит классическим представлениям о термодинамике. Кризис теплообмена – явление ухудшения теплообмена, приводящие к резкому увеличению температуры металла. Данное явление очень широко распространено, и имеет множество проявлений. Однако механизм развития этого процесса до настоящего времени до конца не известен, ввиду его сложности и многообразия. Принято считать, что существует кризис теплообмена первого рода – следствие перехода пузырькового кипения жидкости на поверхность, и кризис второго рода – следствие испарения или срыва водяной микропленки с поверхности. Для исследования этих парадоксов авторами была проведена серия экспериментов, результаты которых полностью подтвердились. Основываясь на полученные результаты, авторами была дана оценка данных явлений и сделана попытка их обосновать. Очевидно, что оба рассмотренных физических парадокса требуют более детального изучения, и авторы намерены продолжить данное исследование.

Ключевые слова: эффект Мпембы, кризис теплообмена, теплопроводность, кристаллизация, конвекция

SOME PHYSICS PARADOXES

Polivanov A.A., Kolesnichenko V.S.

Reader of Kamyslin Technological Institut (branch) of Volgograd State Technical University, Kamyslin, e-mail: polivanov@kti.ru

The article is devoted to the consideration of two well-known physical paradoxes – the Mpemba effect and the phenomenon called the «heat transfer crisis». The Mpemba effect is a well-known physical phenomenon, which is that in some cases hot water freezes faster than cold water, although it contradicts the classical concepts of thermodynamics. Heat transfer crisis is a phenomenon of deterioration of heat transfer, leading to a sharp increase in metal temperature. This phenomenon is very widespread, and has many manifestations. However, the mechanism of development of this process is still not fully known, due to its complexity and diversity. It is considered that there is a crisis of heat transfer of the first kind – a consequence of the transition of bubble boiling of a liquid to a surface one, and a crisis of the second kind – a consequence of evaporation or disruption of the water microfilm from the surface. To study these paradoxes, the authors conducted a series of experiments, the results of which were fully confirmed. Based on the results obtained, the authors evaluated these phenomena and made an attempt to substantiate them. Obviously, both the considered physical paradoxes require more detailed study, and the authors intend to continue this study.

Keywords: Mpemba effect, heat transfer crisis, thermal conductivity, crystallization, convection

Несмотря на бурное развитие фундаментальных и прикладных наук, к настоящему времени остается еще много неразгаданных тайн и парадоксов, которые невозможно объяснить на основе имеющихся на данный момент знаний. В настоящей статье авторами будут рассмотрены два известных парадокса физики, которые легко воспроизводятся в домашних условиях, но классическая наука не может дать им четкое и внятное объяснение. Это эффект Мпембы и явление, получившее название «кризис теплообмена».

Эффект Мпембы – известный физический парадокс, который гласит, что горячая вода в определенных случаях замерзает быстрее, чем холодная, хотя при этом, если следовать классическим представлениям о термодинамике, она должна отдать окружающей среде большее количество теплоты, чем холодная и, следовательно, охлаждаться дольше [1].

Этот феномен замечали в своё время Аристотель, Френсис Бэкон, Рене Декарт, Исаак Ньютон и многие другие. На Руси этот феномен тоже знали – когда заливали зимой ледяной каток, использовали горячую воду, даже кипятком.

Однако, как объяснить этот эффект, до сих пор точно никто не знает. У учёных к настоящему моменту накопилось множество версий, но пока никто не смог детально объяснить этот парадокс. Горячая и холодная вода обладают разными свойствами, но пока не ясно, какие именно играют роль в этом случае: разница в переохлаждении, испарении, формировании льда, конвекции или воздействии растворенных газов на воду при разных температурах.

Следует отметить, что во всех случаях данный парадокс был установлен экспериментальным путем. А свое название он получил благодаря следующему случаю.

Эрасто Мпемба, в 1963 году ученик средней школы в Танзании, выполнял практическую работу по кулинарии. Требовалось приготовить домашнее мороженое: вскипятить молоко, растворить сахар, охладить смесь до комнатной температуры, а затем поместить ее в холодильник, чтобы заморозить. Мпемба, опасаясь, что не успеет выполнить задание в отведенное для этого время, поместил в холодильник горячую смесь молока с сахаром. К его удивлению, она замерзла даже раньше, чем продукт, приготовленный в соответствии с технологией.

Эрасто Мпемба обратился за разъяснениями к учителю физики, но он не принял это в серьез. Мпемба экспериментировал не только с молоком, но и с обычной водой, и этот эффект также проявил себя.

Позже он обратился к профессору Денису Осборну из Университетского колледжа Дар-Эс-Салама, со следующим вопросом: «Если взять два контейнера с равными объемами воды, так что в одном из них вода будет иметь температуру 35 °С, а в другом – 100 °С, и поместить их в морозильник, во втором вода замерзнет раньше. Почему?» Осборн заинтересовался этим вопросом, и в 1969 году, он и Мпемба опубликовали результаты своих экспериментов в журнале *Physics Education* [2]. С тех пор обнаруженный ими эффект называется эффектом Мпембы.

С тех пор высказывались разные версии, одна из которых гласила: часть горячей воды сначала просто испаряется, а потом, когда осталось меньшее её количество, вода застывает быстрее. Эта версия, в силу своей простоты, стала самой популярной, но учёных удовлетворяла не полностью.

В основу другой популярной версии было положено учение о молекулярном составе воды. Как известно, молекулы воды состоят из одного атома кислорода и двух атомов водорода, удерживаемых вместе ковалентными связями, что на уровне частиц выглядит как обмен электронами. Другой известный факт заключается в том, что атомы водорода притягиваются к атомам кислорода из соседних молекул – при этом образуются водородные связи. Вместе с тем молекулы воды отталкиваются друг от друга. Учёные заметили: чем теплее вода, тем большим оказывается расстояние между молекулами жидкости из-за увеличения отталкивающих сил. В результате водородные связи растягиваются, а следовательно, запасают большую энергию. Эта энергия высвобождается при охлаждении воды – молекулы сближаются друг с другом. А отдача энергии, как известно, и означает охлаждение.

Высказывались и другие версии, основанные на известных явлениях физики, таких как теплопроводность, переохлаждение воды, конвекция и т.д. [3].

В дальнейшем эффект Мпембы исследовался и наблюдался в различных физических системах помимо воды, в том числе – в углеродных нанотрубках и клатратных гидратах, однако до сих пор феномен не понят до конца. Было выдвинуто несколько объяснений, и даже поставлен под сомнение сам факт наличия этого явления. Так, Антонио Ласанта и его соавторы теоретически продемонстрировали и изучили эффект Мпембы на примере сыпучих тел, состоящих, как песок, из мелких частиц. При помощи моделирования и кинетики они установили, что основополагающим фактором проявления эффекта Мпембы являются начальные условия, и смогли определить, какими они должны быть. Было установлено, что эффект Мпембы весьма чувствителен к изначальному состоянию жидкости или, другими словами, ее истории. Это может объяснить неуловимость и противоречивость эффекта Мпембы в воде, поскольку сложно подготовить образец должным образом. Но использование вместо воды сыпучих тел упрощает задачу.

Совсем недавно команда исследователей из Технологического университета Наньян в Сингапуре (*Nanyang Technological University*) во главе с химиком Си Чжаном заявила, что им удалось разрешить вековую загадку о том, почему тёплая вода застывает быстрее, чем холодная. Как выяснили китайские специалисты, секрет кроется в количестве энергии, запасённой в водородных связях между молекулами воды [4].

Авторы данной публикации также провели серию экспериментов по исследованию эффекта Мпембы. В ходе исследования температура горячей воды принималась равной 60 °С и 90 °С, а температура холодной воды была фиксированной и равнялась 30 °С. Использовалась обычная водопроводная вода. Масса воды в каждой пробе равнялась 50 грамм.

Время эксперимента – 90 минут с периодичностью замера температуры 5 минут; температура в морозильной камере – минус 17 °С, дно отсека, в который устанавливался контейнер с водой без инея и льда, материал – пластик. Температура замерялась термомпарой с мультиметром, дополнительные замеры проводились инфракрасным термометром. Дополнительно за процессом осуществлялось визуальное наблюдение при помощи веб – камеры. Основные результаты эксперимента показаны на рис. 1.

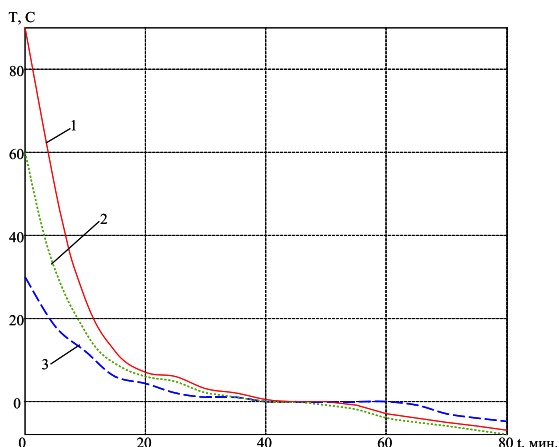


Рис. 1. Зависимость температуры проб с холодной и горячей водой от времени

На рис. 1 цифрами обозначены: 1 – проба с водой температуры 90 °С, 2 – 60 °С, 3 – 30 °С.

В результате этого эксперимента был сделан вывод, что в условиях равных тепловых сопротивлений границ вода/воздух (вода/испаритель холодильника), быстрее остужается до температуры кристаллизации вода с более низкой начальной температурой, то есть холодная, однако кристаллизация в горячей воде идет быстрее. Таким образом, как и ожидалось, горячая вода замерзает быстрее холодной (в рассматриваемом эксперименте почти на 15 минут), при этом разница в скорости замерзания воды с температурой 60 °С и 90 °С почти не заметна; возможно, это связано с погрешностью измерений температуры.

По окончании эксперимента образцы со льдом были повторно взвешены. Оказалось, что масса льда в пробе с холодной водой практически не изменилась (точность имеющихся весов не позволила установить уменьшение массы), масса пробы с водой температуры 60 °С сократилась на 4 грамма пробы с водой температуры 90 °С – на 7 грамм, то есть незначительно по отношению к начальной массе. Таким образом, можно утверждать, что процесс испарения воды при кристаллизации не играет решающую роль при объяснении эффекта Мпембы.

Таким образом, наиболее вероятным объяснением эффекта Мпембы является наличие центров кристаллизации в виде растворенных солей, а также теплообмен. При минимизации этих двух факторов эффект может не наблюдаться, как отмечали другие исследователи, например [5].

Кроме того, процесс нагрева и охлаждения зависит от изобарной теплоемкости, а процесс плавления и кристаллизации – от удельной теплоты плавления вещества. При быстром охлаждении на поверхности контакта сред возникает череда фазовых переходов с аномальным, по сравнению с обычной теплопередачей, перераспределением тепла. Таким образом, можно утверждать, что эффект Мпембы – это «быстрая заморозка», и при ней более горячее тело остывает быстрее: к обычному теплообмену добавляется эффект перетока внутренней энергии замораживаемого вещества при фазовых переходах.

Другой физический парадокс, который был изучен авторами – это так называемый «кризис теплообмена» – явление ухудшения теплообмена, приводящие к резкому увеличению температуры металла [1]. Данное явление очень широко распространено, и имеет множество проявлений, а в данной работе рассмотрен один из частных случаев.

Стальной стержень небольшой длины и диаметра с одного края нагревается до высокой температуры (500–900 °С). При этом благодаря невысокой теплопроводности стали другой край стержня остаётся холодным (слабо нагревается) и его можно свободно держать не защищённой рукой. Однако если нагретый край стержня резко охладить в холодной воде, температура холодного края резко увеличивается, в некоторых случаях его даже невозможно будет взять в руки.

Для проверки этого парадокса был взят стальной стержень длиной 20 сантиметров и диаметром 5 миллиметров, который нагревался пламенем бытовой газовой горелки примерно на 10-15% его длины. Температура нагретого края стержня определялась приблизительно по его цвету, поскольку термометра не рассчитана на такой нагрев. А температура холодного края определялась с помощью термопары с мультиметром, как и в первом примере.

После нагревания стержня определялась температура его краев (холодного и горячего), затем стержень охлаждался в воде комнатной температуры, и снова определялась температура его холодного края.

Результаты этих измерений показаны на рис. 2.

На рис. 2 по горизонтальной шкале отложена температура горячего края стержня (определялась приблизительно), по вертикальной – температура холодного. Цифрой 1 обозначена температура холодного края до охлаждения в воде, цифрой 2 – сразу после охлаждения.

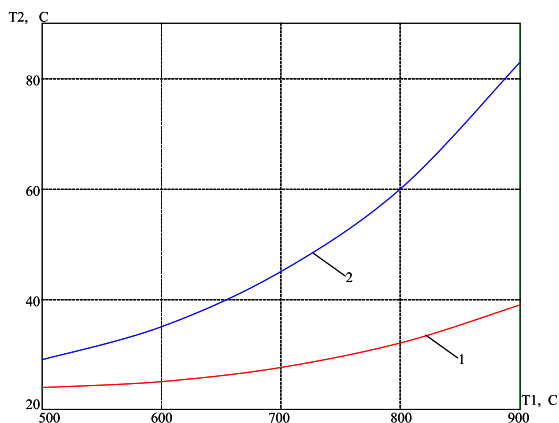


Рис. 2. Зависимость температуры холодной стороны стержня от температуры горячей стороны до и после охлаждения

Результаты данных измерений показали, что действительно, после резкого охлаждения горячего края стержня происходит нагревания холодного, причем тем больше, чем выше была температура горячего. Обычно данный эффект проявляется в закрытых объемах, таких как трубопроводы, котлы и т.д. [6], однако, в данном случае также удалось воспроизвести подобный эффект.

Явление кризиса теплообмена известно давно, однако, механизм развития этого процесса до настоящего времени до конца не известен, ввиду сложности и многообразия данного явления, также, как и эффект Мпембы. Принято считать, что существует кризис первого рода – следствие перехода пузырькового кипения жидкости на поверхность, и кризис второго рода – следствие испарения или срыва водяной микропленки

с поверхности [6]. В данном случае, очевидно, имеет место кризис первого рода. Кроме того, по мнению авторов, при быстром охлаждении горячего края стержня возникает акустическая волна, направленная вдоль его оси (при резком охлаждении стержня отчетливо ощущается слабая вибрация), которая также способствует переносу энергии от нагретого края стержня к холодному.

Очевидно, что оба рассмотренных физических явления требуют более детального изучения, и авторы намерены продолжить данное исследование. Вместе с тем, все эксперименты были проведены авторами самостоятельно в бытовых условиях и с применением несертифицированных средств измерений. Поэтому приведенные результаты могут иметь достаточно большую погрешность, однако, для качественного объяснения явлений и обоснования их существования этих результатов вполне достаточно.

Список литературы

1. Википедия. Свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 12.01.2019).
2. Mpemba E.B., Osborne D.G. Cool? Physics Education. 1969. Т. 4. № 3. P. 172–175.
3. Oren Raz, Zhiyue Lu. Nonequilibrium thermodynamics of the Markovian Mpemba effect and its inverse. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114. iss. 20. P. 5083–5088.
4. Chang Q. Sun, Qing Jiang, Weitao Zheng, Ji Zhou, Yichun Zhou. Hydrogen-bond memory and water-skin supersolidity resolving the Mpemba paradox. Physical Chemistry Chemical Physics. 2014. Vol. 16. iss. 42. P. 22995–23002.
5. Клейменов М., Лозовенко С.В. Охлаждение жидкостей, эффект Мпембы // Физика для школьников. 2015. № 1. С. 40–43.
6. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 2000. 451 с.