

Эффект Мпембы или почему горячая вода замерзает быстрее холодной?

Эффект Мпембы (Парадокс Мпембы) – парадокс, который гласит, что горячая вода при некоторых условиях замерзает быстрее, чем холодная, хотя при этом она должна пройти температуру холодной воды в процессе замерзания. Данный парадокс является экспериментальным фактом, противоречащим обычным представлениям, согласно которым при одних и тех же условиях более нагретому телу для охлаждения до некоторой температуры требуется больше времени, чем менее нагретому телу для охлаждения до той же температуры.

Этот феномен замечали в своё время Аристотель, Френсис Бэкон и Рене Декарт, однако лишь в 1963 году танзанийский школьник Эрасто Мпемба установил, что горячая смесь мороженого замерзает быстрее, чем холодная.

Будучи учеником Магамбинской средней школы в Танзании Эрасто Мпемба делал практическую работу по поварскому делу. Ему нужно было изготовить самодельное мороженое – вскипятить молоко, растворить в нём сахар, охладить его до комнатной температуры, а затем поставить в холодильник для замерзания. По-видимому, Мпемба не был особо усердным учеником и промедлил с выполнением первой части задания. Опасаясь, что не успеет к концу урока, он поставил в холодильник ещё горячее молоко. К его удивлению, оно замерзло даже раньше, чем молоко его товарищей, приготовленное по заданной технологии.

Он обратился за разъяснениями к учителю физики, но тот лишь посмеялся над учеником, сказав следующее: «Это не всемирная физика, а физика Мпембы».

После этого Мпемба экспериментировал не только с молоком, но и с обычной водой. Во всяком случае, уже будучи учеником Мквавской средней школы он задал вопрос профессору Деннису Осборну из университетского колледжа в Дар-Эс-Саламе (приглашенному директором школы прочесть ученикам лекцию по физике) именно по поводу воды: «Если взять два одинаковых контейнера с равными объёмами воды так, что в одном из них вода имеет температуру 35°C, а в другом – 100°C, и поставить их в морозилку, то во втором вода замерзнет быстрее. Почему?» Осборн заинтересовался этим вопросом и вскоре в 1969 году они вместе с Мпембой опубликовали результаты своих экспериментов в журнале «Physics Education». С тех пор обнаруженный ими эффект называется *эффектом Мпембы*.

До сих пор никто точно не знает, как объяснить этот странный эффект. У учёных нет единой версии, хотя существует много. Всё дело в разнице свойств горячей и холодной воды, но пока не понятно, какие именно свойства играют роль в этом случае: разница в переохлаждении, испарении, формировании льда, конвекции или воздействию разжиженных газов на воду при разных температурах.

Парадоксальность эффекта Мпембы в том, что время, в течение которого тело остывает до температуры окружающей среды, должно быть пропорционально разности температур этого тела и окружающей среды. Этот закон был установлен ещё Ньютоном и с тех пор много раз подтверждался на практике. В данном же эффекте вода с температурой 100°C остывает до температуры 0°C быстрее, чем такое же количество воды с температурой 35°C.

Тем не менее, это ещё не предполагает парадокс, поскольку эффекту Мпембы можно найти объяснение и в рамках известной физики. Вот несколько объяснений эффекта Мпембы:

Испарение

Горячая вода быстрее испаряется из контейнера, уменьшая тем самым свой объём, а меньший объём воды с той же температурой замерзает быстрее. Нагретая до 100°C вода теряет 16% своей массы при охлаждении до 0°C.

Эффект испарения – двойной эффект. Во-первых, уменьшается масса воды, которая необходима для охлаждения. И во-вторых, из-за испарения понижается её температура.

Разница температур

Из-за того, что разница температур между горячей водой и холодным воздухом больше – следовательно, теплообмен в этом случае идет интенсивнее и горячая вода быстрее охлаждается.

Переохлаждение

Когда вода охлаждается ниже 0°C она не всегда замерзает. При некоторых условиях она может претерпевать переохлаждение, продолжая оставаться жидкой при температурах ниже температуры точки замерзания. В некоторых случаях вода может оставаться жидкой даже при температуре –20°C.

Причина этого эффекта в том, что для того, чтобы начали формироваться первые кристаллы льда, нужны центры кристаллообразования. Если их нет в жидкой воде, тогда переохлаждение будет продолжаться до тех пор, пока температура не понизится настолько, что кристаллы начнут формироваться спонтанно. Когда они начнут формироваться в переохлаждённой жидкости, они начнут расти быстрее, формируя ледовую шугу, которая замерзая, будет образовывать лёд.

Горячая вода больше всего подвержена переохлаждению поскольку её нагревание устраняет растворённые газы и пузырьки, которые в свою очередь, могут служить центрами образования кристаллов льда.

Почему же переохлаждение заставляет горячую воду застывать быстрее? В случае с холодной водой, которая не переохлаждается, происходит следующее: на её поверхности образуется тонкий слой льда, который действует как изолятор между водой и холодным воздухом, и тем самым препятствует дальнейшему испарению. Скорость формирования кристаллов льда в этом случае будет меньше. В случае с горячей водой, подвергающейся переохлаждению, переохлаждённая вода не имеет защитного поверхностного слоя льда. Поэтому она теряет тепло намного быстрее через открытый верх.

Когда процесс переохлаждения заканчивается и вода замерзает, теряется намного больше тепла и поэтому формируется больше льда.

Многие исследователи этого эффекта считают переохлаждение главным фактором в случае с эффектом Мпемба.

Конвекция

Холодная вода начинает замерзать сверху, ухудшая тем самым процессы теплоизлучения и конвекции, а значит и убыли тепла, тогда как горячая вода начинает замерзать снизу.

Объясняется этот эффект аномалией плотности воды. Вода имеет максимальную плотность при 4°C. Если охладить воду до 4°C и поместить её в среду с более низкой температурой, поверхностный слой воды замерзнет быстрее. Потому что эта вода менее плотная чем вода при температуре 4°C, она останется на поверхности, формируя тонкий холодный слой. При этих условиях тонкий слой льда будет формироваться на поверхности воды в течение короткого времени, но этот слой льда будет служить изолятором, защищающим нижние слои воды, которые будут оставаться при температуре 4°C. Поэтому дальнейший процесс охлаждения будет проходить медленнее.

В случае с горячей водой ситуация совершенно иная. Поверхностный слой воды будет охлаждаться более быстро за счёт испарения и большей разницы температур. Кроме того, холодные слои воды более плотные, чем слои горячей воды, поэтому слой холодной воды будет опускаться вниз, поднимая слой тёплой воды на поверхность. Такая циркуляция воды обеспечивает быстрое падение температуры.

Но почему этот процесс не достигает точки равновесия? Для объяснения эффекта Мпембы с точки зрения конвекции следовало бы принять, что холодные и горячие слои воды разделены и сам процесс конвекции продолжается после того, как средняя температура воды опустится ниже 4°C.

Однако нет экспериментальных данных, которые подтверждали бы эту гипотезу, что холодные и горячие слои воды разделены в процессе конвекции.

Растворённые в воде газы

Вода всегда содержит растворённые в ней газы – кислород и углекислый газ. Эти газы имеют способность уменьшать точку замерзания воды. Когда вода нагрета, эти газы выделяются из воды, поскольку их растворимость в воде при высокой температуре ниже. Поэтому когда горячая вода охлаждается, в ней всегда меньше растворённых газов, чем в не нагретой холодной воде. Поэтому точка замерзания нагретой воды выше, и она замерзает быстрее. Этот фактор иногда рассматривается как главный при объяснении эффекта Мпембы, хотя никаких экспериментальных данных, подтверждающих этот факт нет.

Теплопроводность

Этот механизм может играть существенную роль, когда вода помещается в морозильник холодильной камеры в небольших контейнерах. В этих условиях замечено, что контейнер с горячей водой протаивает под собой лёд морозильной камеры, улучшая тем самым тепловой контакт со стенкой морозилки и теплопроводность. В результате чего, тепло отводится от контейнера с горячей водой быстрее, чем от холодного. В свою очередь контейнер с холодной водой не протаивает под собой снег.

Все эти (а также другие) условия изучались во многих экспериментах, но однозначного ответа на вопрос – какие из них обеспечивают стопроцентное воспроизводство эффекта Мпембы – так и не было получено.

Так, например, в 1995 году немецкий физик Давид Ауэрбах изучал влияние переохлаждения воды на этот эффект. Он обнаружил, что горячая вода, достигая переохлажденного состояния, замерзает при

более высокой температуре, чем холодная, а значит быстрее последней. Зато холодная вода достигает переохлаждённого состояния быстрее горячей, компенсируя тем самым предыдущее отставание.

Кроме того, результаты Ауэрбаха противоречили полученным ранее данным, что горячая вода способна достичь большего переохлаждения из-за меньшего количества центров кристаллизации. При нагревании воды из нее удаляются растворенные в ней газы, а при её кипячении выпадают в осадок некоторые растворенные в ней соли.

Утверждать пока можно только одно – воспроизводство этого эффекта существенно зависит от условий, в которых проводится эксперимент. Именно потому, что воспроизводится он далеко не всегда.

О.В. Мосин (сайт «Всё о воде» <http://www.o8ode.ru/article/tawa/mpemba.htm>)