

## Как кипит вода?

*Дж. Уокер*

Как ни обычно это явление, вы, скорее всего, не замечали всех его удивительных особенностей. С одними нельзя не считаться на практике, другие позволяют проводить весьма опасные трюки, которые когда-то показывали на карнавалах смельчаки.



Начнем с наблюдения. Нагреем кастрюлю водопроводной воды снизу пламенем или электрическом источником тепла. При нагревании воды растворенные в ней молекулы воздуха выделяются из раствора и собираются в крошечные пузырьки в трещинах на дне кастрюли. (Эти участки достаточно малы, чтобы поверхностное натяжение не дало воде залить их при наполнении кастрюли.) Со временем каждый пузырек раздувается, и его плавучесть увеличивается. В конце концов пузырек отрывается от трещины и всплывает на поверхность воды. Так как трещина еще заполнена воздухом, там начинает образовываться другой пузырек. Образование пузырьков воздуха – знак того, что вода нагревается, но это еще далеко не кипение.

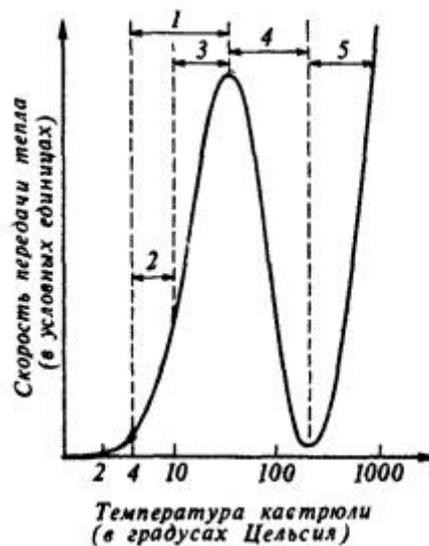
Вода, соприкасающаяся с атмосферой, кипит при температуре, которую иногда называют нормальной температурой кипения  $t_k$ . Например,  $t_k = 100^\circ\text{C}$  при давлении воздуха 1 атм. Так как вода на дне кастрюли не соприкасается с атмосферой, она остается жидкостью, даже если нагревается выше  $t_k$  на несколько градусов. При нагреве и перегреве она постоянно смешивается с остальной водой путём конвекции (горячая вода поднимается, и более холодная вода замещает ее).

При дальнейшем повышении температуры кастрюли нижний слой воды начнет испаряться, и молекулы воды будут собираться в маленькие пузырьки пара в сухих трещинах. Эта фаза кипения отмечена отрывистыми звуками, гудением и иногда жужжанием. Вода почти поет о том, как ей не нравится нагреваться. Каждый раз, как пузырек пара поднимается в более холодную воду, он внезапно исчезает, потому что пар внутри него конденсируется. При каждом таком исчезновении возникает звуковая волна – гудение, которое вы слышите. Когда температура всей массы воды повысится, пузырьки не смогут исчезнуть, пока они не оторвутся от трещин и не пройдут часть пути к поверхности воды (рис.1).

Если вы продолжаете нагревать кастрюлю, шум исчезающих пузырьков становится громче, а потом исчезает. Шум начинает смягчаться, когда вся вода достаточно горяча, чтобы пузырьки пара достигли поверхности; там они лопаются с легким всплеском. Теперь вода кипит.

Если ваш источник тепла – кухонная плита, история здесь кончается. Однако с помощью лабораторной горелки вы сможете продолжить повышать температуру кастрюли. Теперь пузырьки пара становятся столь многочисленными и отрываются от своих трещин так быстро, что они объединяются и образуют столбы пара, которые бурно и хаотически поднимаются вверх, иногда встречая ранее оторвавшиеся «куски» пара. Образование пузырьков и столбов пара называется пузырьчатым (дословно «зародышевым») парообразованием – образование и рост пузырьков зависит от трещин, служащих зародышевыми участками.

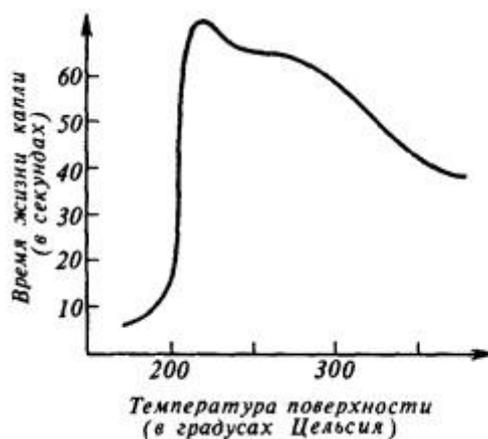
Если вы продолжаете повышать температуру кастрюли после стадии столбов и «кусков», парообразование вступает в новую фазу, называемую переходным режимом. Теперь при каждом последующем повышении температуры кастрюли скорость передачи тепла воде уменьшается. Это уменьшение – не парадокс. В переходном режиме большая часть дна кастрюли покрыта слоем пара. Так как водяной пар передает тепло на порядок хуже, чем жидкость, передача тепла воде уменьшается. Чем горячее становится кастрюля, тем меньше ее прямой контакт с водой и тем хуже передача тепла. На практике эта ситуация может оказаться опасной. Например, для теплообменника, задача которого – снять тепло с источника. Если допустить, чтобы вода в теплообменнике вошла в переходный режим, источник может опасно перегреться из-за уменьшения отвода тепла.



**Рис.1** Кривая кипения для воды. 1 – пузырчатое кипение, 2 – изолированные пузырьки, 3 – столбы и «куски» пара, 4 – переходный режим кипения, 5 – пленочное кипение.

Возможно, именно это явление стало причиной железнодорожной катастрофы — взрыва паровоза. Локомотив приводился в действие водяным паром. Бойлер с водой располагался над топкой, в которой горела нефть, и отделялся от нее надежным металлическим листом — так называемым потолочным листом. Горячие газы текли от топки по трубам, идущим в воде. Тепло передавалось воде по всей длине труб и по площади потолочного листа. Так как пар в бойлере находился в ограниченном объеме, он был под высоким давлением, что повысило температуру кипения воды.

Обычно это устройство безопасно. Однако, если потолочный лист слишком раскаляется, парообразование входит в переходный режим, что сильно уменьшает передачу тепла через лист. Если ситуация не контролируется, потолочный лист может размягчиться, прогнуться и треснуть под большим давлением и тяжестью воды в бойлере. Очевидно, так и произошло. Когда вода хлынула в топку, резкое падение давления снизило температуру кипения воды. Так как температура воды была выше новой точки кипения, часть ее мгновенно превратилась в пар, объем которого резко увеличился, что и привело к взрыву. Взрыв прорвал бойлер, оторвал его от двигателя, перевернул и отшвырнул в сторону. Погибло три человека.



**Рис.2** Кривая времени жизни капли воды на горячей поверхности.

Вернемся к нашим наблюдениям. Допустим, вы все еще продолжаете повышать температуру кастрюли с помощью лабораторной горелки. В конце концов вся поверхность дна покроется паром, и тепло будет медленно передаваться жидкости над паром в основном путем излучения. Эта фаза называется пленочным кипением.

Хотя вы не можете получить пленочное кипение в кастрюле, грея воду на кухонной плите, в кухне оно иногда встречается. Моя бабушка однажды показала, как пленочное кипение помогает определить, достаточно ли разогрелась сковородка для блинов. После того как она немного нагрела пустую сковородку, она брызнула на нее несколько капель воды. Капли с шипением испарились за несколько секунд. Их быстрое исчезновение показало ей, что сковорода еще не достаточно горяча для теста. Нагрев сковородку сильнее, она повторила проверку, брызнув еще воды. В этот раз капли свернулись в шарики и крутились на металлической поверхности более минуты, перед тем, как исчезнуть. Теперь сковорода была достаточно горяча для теста.

Для изучения бабушкиного опыта я нагрел плоскую металлическую пластину лабораторной горелкой. Контролируя температуру пластины термомпарой, я аккуратно ронял каплю дистиллированной воды из шприца, расположенного точно над пластиной (шприц дал мне возможность получать капли одинакового размера). Капля падала в углубление, сделанное в пластине молотком с шаровым бойком. Уронив каплю, я изучал время ее жизни на пластине. Затем я нарисовал график зависимости времени жизни капель от температуры пластины (рис.2). У графика есть интересный пик. При температуре пластины от 100 и приблизительно до 200°C каждая капля растекалась по пластине тонким слоем и быстро испарялась. При температуре пластины около 200°C капля сворачивалась и жила около минуты. При более высокой температуре пластины водяные шарики не держаться так долго. Подобные эксперименты с водопроводной водой дали график с более плоским пиком, возможно из-за того, что взвешенные частицы прорывают слой плохо проводящего тепло пара.

Тот факт, что капля воды, нанесенная на металл, температура которого гораздо выше температуры кипения воды, живет долго, был впервые описан еще в 1732 году, но достаточно широко не исследовался до 1756 года, пока Иоганн Готлиб Лейденфрост не опубликовал свой «Трактат о некоторых свойствах обычной воды». Из-за того, что работа Лейденфроста не переводилась с латыни до 1965 года, она оказалась мало известной. Тем не менее сейчас именно его имя связывается с явлением долговременности жизни капли на горячей пластине. Кроме того, температура, соответствующая пику полученного мною графика зависимости времени жизни капли от температуры поверхности (рис.2), называется точкой Лейденфроста.

Лейденфрост делал опыты с железной ложкой, докрасна раскаленной в горне. Помещая в ложку каплю воды, он измерял время ее жизни с помощью качающегося маятника. Он отметил, что капля, казалось, всасывала свет и тепло ложки, оставляя на поверхности пятно более тусклое, чем остальная часть ложки. Первая капля продержалась в ложке 30 секунд, вторая капля – только 10, последующие – лишь несколько секунд.

Лейденфрост неправильно понял результаты своих опытов, потому что не осознал, что долгоживущие капли на самом деле кипели. Разрешите мне объяснить это.

При температуре пластины ниже точки Лейденфроста вода растекается по пластине и быстро отводит тепло от нее, что обеспечивает полное испарение капли за несколько секунд. Когда температура равна или выше точки Лейденфроста, нижняя часть капли, нанесенной на пластинку, почти мгновенно испаряется, и давление образовавшегося пара не позволяет остальной части капли коснуться пластины. Слой пара постоянно пополняется за счет дополнительной воды, испаряющейся с нижней поверхности, благодаря теплу от пластины, которое излучается и проводится сквозь пар. Хотя толщина слоя менее 0,1мм у наружной границы и около 0,2 мм в центре, он резко замедляет испарение капли (рис. 3). Таким образом пар поддерживает и защищает каплю в течение минуты или около того.



**Рис. 3** Поперечное сечение капли Лейденфроста

Чтобы показать течение пара из-под капли Лейденфроста, я посыпал пластину мелким порошком. Когда капля кружилась по пластине, пар, идущий из-под нее, сдувал с пути крупинцы порошка. Я также создавал большие амебоподобные капли воды, вводя шприц в верх плавающей капли и добавляя в нее несколько струек воды. Такие капли были довольно громоздкими и часто разрушали слой пара под ними из-за своего большого веса. Каждое такое разрушение отмечалось громким шипением, так как часть капли внезапно испарялась.

Аналогичные опыты можно проводить не только с водой, но и с другими жидкостями. Для уксуса, например, точка Лейденфроста соответствует температуре около 250°C, для спирта – около 150°C.

Прочитав перевод исследования Лейденфроста, а вспомнил описание интересного трюка, который показывали на карнавалах в начале века. Рассказывают, что исполнитель мог окунать мокрые пальцы в расплавленный свинец. Решив, что там не было надувательства, я предположил, что этот трюк должен основываться на эффекте Лейденфроста. Как только мокрые пальцы исполнителя прикасались к горячему жидкому металлу, часть воды испарялась, покрывая кисть слоем пара. Если пальцы погружать быстро, они значительно не нагреваются.



Я не мог воспротивиться искушению проверить свое объяснение. На лабораторной горелке я расплавил в тигле крупный кусок свинца. Затем я нагрел свинец до температуры более  $400^{\circ}\text{C}$ , что гораздо выше его температуры плавления ( $328^{\circ}\text{C}$ ). Намочив палец в водопроводной воде, я приготовился коснуться поверхности расплавленного свинца. Должен признаться, что мой помощник стоял рядом с аптечкой. Также должен признаться, что несколько первых попыток оказались неудачными, так как мой мозг протестовал против этого нелепого эксперимента, направляя палец мимо свинца.

Когда я наконец преодолел страх и быстро коснулся свинца, я был поражен. Как я и думал, часть воды на пальце испарилась, образуя защитный слой. Так как контакт был коротким, излучения и проводимости тепла было недостаточно для того, чтобы ощутимо поднять температуру кожи. Я расхрабрился. Намочив кисть, я погрузил все пальцы в свинец, коснувшись дна сосуда, – ожога не было. Очевидно, эффект Лейденфроста, или точнее – наличие пленочного кипения, защитило мои пальцы.

Я еще сомневался в моем объяснении. А возможно ли коснуться свинца сухим пальцем, не обжегшись? Отбросив все разумные мысли, я попытался это сделать и мгновенно понял свою глупость, когда боль пронзила палец. Я продолжил эксперимент с помощью маленькой сухой сосиски, погружая ее в расплавленный свинец на несколько секунд. Ее кожа быстро чернела – ей не доставало защиты пленочным кипением, как и моему сухому пальцу.

Вы не должны повторять этот опыт ни в коем случае!

Надо сказать, что погружение пальцев в расплавленный свинец представляет собой серьезную опасность. Если температура свинца лишь чуть выше точки плавления, потеря тепла при испарении воды может привести к затвердению свинца на пальцах. Если выдергивать получившуюся «перчатку» из горячего твердого свинца из сосуда, она будет контактировать с пальцами так долго, что они обязательно будут обожжены. Кроме того, очень опасны мокрые пальцы. Когда избыточная вода испаряется, она может вызвать разбрызгивание расплавленного свинца на все окружающее и, что особенно серьезно, в глаза. От таких взрывных испарений у меня остались шрамы на руках и лице.

Похожий пример использования эффекта Лейденфроста описан в бестселлере Роберта Руанка «Нечто значительное». Чтобы определить, кто из двух людей говорит правду, вождь африканской деревни приказал каждому лизнуть горячий нож. Считается, что язык правдивого человека будет смочен слюной. Тогда часть слюны подвергнется пленочному кипению, и язык не будет обожжен. С другой стороны, у лжеца пересохнет во рту, и защиты пленочным кипением не будет.

Пленочное кипение можно также увидеть, когда проливается жидкий азот – большие и маленькие капли сворачиваются в шарики и катаются по полу. Температура жидкого азота около  $-200^{\circ}\text{C}$ . Когда капля пролитой жидкости приближается к полу, ее нижняя поверхность испаряется, образовавшийся слой пара поддерживает оставшуюся жидкость, позволяя ей прожить удивительно долгое время.

Мне рассказывали о трюк, при котором исполнитель лил в рот жидкий азот «не обжигаясь», несмотря на его крайне низкую температуру. Жидкость немедленно подвергалась пленочному кипению по нижней поверхности и не касалась непосредственно языка. По глупости я повторил этот опыт. Неоднократно все проходило гладко и эффектно. С большой

капель жидкого азота во рту я концентрировался на том, чтобы не проглотить ее, и при этом выдыхал. Влага в моем холодном дыхании конденсировалась, создавая ужасную струю, тянущуюся изо рта примерно на метр. Однако в последний раз жидкость термически повредила два моих передних зуба так сильно, что эмаль превратилась в «дорожную карту» из трещин. Мой дантист убедил меня прекратить этот опыт.

Эффект Лейденфроста может также играть роль в другом безрассудно храбром опыте – ходьбе по горячим углям. Иногда средства массовой информации с большой шумихой и различной мистической чушью сообщают об исполнителе, шагающем по горячим углям. Заявляется, что защита от сильного ожога дается властью духа над материей. На самом деле при успешной «прогулке» ступни защищает физика. Особенно важен тот факт, что, хотя поверхность углей очень горяча, ее теплопроводность очень мала. Если исполнитель идет умеренным шагом, прикосновение ступни такое кратковременное, что она проводит от углей очень мало энергии. Конечно, более медленная ходьба может вызвать ожог, так как более долгий контакт допустит передачу ступне тепла не от поверхности, а от внутренней части углей.

Если смочить ступни перед ходьбой, жидкость сможет также защищать их. Например, исполнитель мог пройти по сырой траве, перед тем, как ступить на горячие уголья. Или его ноги могли быть просто потными из-за жара углей или возбуждения перед представлением. Когда исполнитель ступает на угли, тепло испаряет влагу на ступнях, и к коже передается меньше тепла. Кроме того, могут быть точки контакта, где жидкость подвергается пленочному кипению, что тоже дает защиту от горячих углей.

Я ходил по горячим углям пять раз. Четыре раза я достаточно боялся, и ноги были потными. Однако в пятый раз я счел мою безопасность само собой разумеющейся, и ноги были сухими. Ожоги, которые я получил, оказались сильными и очень болезненными. Ноги не заживали несколько недель.

Моя неудача могла быть вызвана отсутствием пленочного кипения на ступнях, но я пренебрег и дополнительным фактором безопасности. В предыдущие дни я из предосторожности прижимал к груди учебник физики, дабы укрепить мою веру в науку. Увы, в тот день, когда я так сильно обжегся, я забыл книгу.

Я долго доказывал, что последним из финальных экзаменов для получения ученой степени должна быть «ходьба по огню». Если кандидат на степень верит в физику так сильно, что не обожжет ноги, председатель тут же вручает ему диплом. Это испытание будет гораздо более показательным, чем традиционные экзамены.

*(D.Holliday, R.Resnics, "Fundamentals of Physics",  
Third edition extended, 1988 (John Willey & Sons, N.Y.))*