

УДК 536.423.1

К вопросу об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя*

Ю.П. Ивочкин, С.Н. Вавилов, Ю.А. Зейгарник, К.Г. Кубриков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

Экспериментально показано, что при контакте горячей и холодной жидкостей уменьшение недогрева холодной жидкости до температуры насыщения изменяет характеристики паровой пленки, обволакивающей фрагменты горячей жидкости, снижает вероятность самопроизвольного прямого контакта жидкостей, взрывного вскипания холодной жидкости и генерации импульса давления, инициирующего тонкую фрагментацию горячего теплоносителя и паровой взрыв. Описан механизм, приводящий к изменению поведения паровой пленки с уменьшением недогрева.

Ключевые слова: жидкий металл, паровой взрыв, давление, фрагментация.

Некоторые феноменологические аспекты инициирования тонкой фрагментации горячего теплоносителя

Наиболее интересной и до сих пор до конца не изученной стадией парового взрыва является этап тонкой фрагментации (дробления) крупных капель горячей жидкости с характерным размером единицы сантиметров. Мало изучены и процессы, инициирующие фрагментацию. По завершении стадии предварительного перемешивания (премиксинга), предшествующей тонкой фрагментации, капли горячей жидкости окружены паровыми пленками, то есть на этих каплях происходит пленочное кипение холодной жидкости, недогретой до температуры насыщения T_s . Это исходное состояние системы на стадии тонкой фрагментации. Конечное ее состояние — множество образовавшихся мелких фрагментов горячего теплоносителя миллиметрового и субмиллиметрового размера. Именно на этих частицах происходит интенсивное парообразование холодной жидкости, т. е. распределенное в пространстве пузырьковое кипение недогретой воды, сопровождающееся резким ростом давления, получившим название паровой взрыв.

Очевидно, что некое спонтанное или наложенное воздействие должно инициировать мелкое дробление горячих капель и массовый, почти одновременный переход пленочного кипения в пузырьковое. Таким воздействием служит импульс давления. Об этом говорят многочисленные опыты с искусственным

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-1262-а).

иницированием (триггерингом) парового взрыва электрическим разрушением проволоочки, ударным перемещением поршня и т. д. [1, 2]. Логика подсказывает, что спонтанной фрагментации горячих капель и переходу к пузырьковому кипению холодной жидкости на горячих фрагментах также предшествует импульс давления, наиболее вероятным источником которого является случайный контакт горячей и холодной жидкостей.

На (рис. 1, *a, b*) воспроизведены результаты наших экспериментов по контакту сильно нагретой нержавеющей полусферы, моделирующей каплю горячей жидкости, с холодной дистиллированной водой. Видно, что так же, как в случае фрагментации жидкой капли [3], это взаимодействие сопровождается импульсом давления. Амплитуда импульса доходит до 1 МПа, что сопоставимо по величине с импульсами давления, реализуемыми в опытах с искусственным триггерингом. Эксперименты также показали наличие определенного временного запаздывания в несколько десятков микросекунд между моментом контакта и началом импульса давления. Причем подобная ситуация наблюдалась в широком диапазоне температур горячей поверхности, в том числе и при температурах заведомо выше так называемой точки предельного перегрева жидкости. Это время необходимо для прогрева пристенного слоя жидкости, приведения его в метастабильное состояние и гомогенного вскипания. Как указывалось выше, контакт носит случайный характер, и его вероятность, в частности, зависит от величины недогрева холодной жидкости до температуры насыщения ΔT_n .

Неоднократно отмечалось, что вероятность парового взрыва сильно уменьшается при приближении температуры жидкости $T_{ж}$ к температуре насыщения T_s [1]. Об этом же говорят данные работ [4–7], в которых установлено, что пороговое значение температуры воды, при которой еще наблюдается фрагментация в ней капель жидкого металла, находится в диапазоне 60–80 °С.

В контексте изложенного можно предположить, что с уменьшением $\Delta T_n = T_s - T_{ж}$ снижается вероятность контакта холодной жидкости с перегретой поверхностью и возникновения резкого вскипания жидкости, порождающего всплеск давления. Ниже представлены соответствующие опытные данные и их возможная интерпретация.

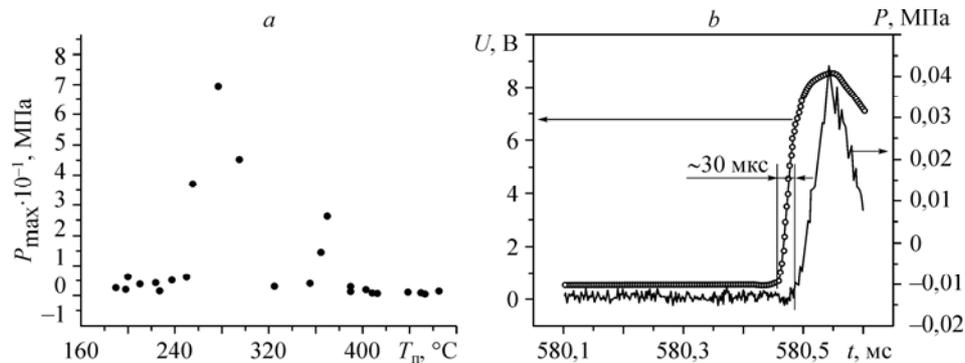


Рис. 1. Результаты экспериментов по взрывному сходу паровой пленки с полусферической поверхности. Температура охлаждающей воды 20 °С.

a — зависимость значения максимальной амплитуды давления от температуры нагретой поверхности, *b* — осциллограммы выходных сигналов с датчиков давления и электрического контакта.

Методика и результаты экспериментальных исследований

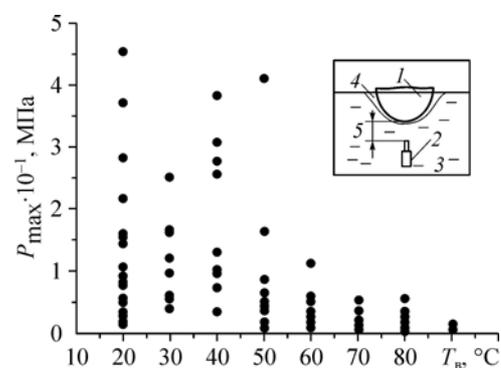
Подробное описание экспериментальной установки и методики проведения опытов приведено в работах [7, 8]. Эксперименты состояли в следующем. Нагретое тело (металлическая полусфера) медленно погружалось в охладитель, имеющий температуру ниже температуры насыщения, и исследовались процессы развития и разрушения пленки пара, образующейся около нагревателя. В качестве охладителя использовалась дистиллированная вода, дегазированная путем двухчасового кипячения. Съемные рабочие образцы, представляющие собой цилиндрические тела с полусферической торцевой частью диаметром 5–30 мм, были изготовлены из нержавеющей стали X18H10T. Температуры нагретого тела и охлаждающей воды контролировались хромель-алюмелевыми термопарами. Сигнал термопар поступал на многоканальный прецизионный усилитель, а затем записывался и обрабатывался с помощью измерительного блока фирмы National Instruments, включающего АЦП PX16070E и процессор SCXI100. Измерение давления осуществлялось пьезоэлектрическим датчиком фирмы PCB типа 113A22, имеющим резонансную частоту выше 500 кГц. Датчик работает совместно с блоком формирования сигнала PCB mode 148A22, позволяющим производить измерения в частотном диапазоне 0–300 кГц. Измерение параметров электрического контакта при соприкосновении охладителя с горячей поверхностью производилось с помощью АЦП PX16070E. Сигналы датчиков температуры, давления и электрического контакта синхронизированы, причем точность синхронизации измерений быстро меняющихся величин (давления и тока контакта) составляла 1 мкс. Скорость оцифровки сигналов датчиков давления (контакта) и температуры составляла $7 \cdot 10^5$ 1/с и 100 1/с, соответственно. Опыты при одних и тех же режимных параметрах повторялись несколько раз.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по максимальному значению амплитуды в пакете импульсов давления, генерируемых при взрывном сходе паровой пленки от температуры охлаждающей воды. Диапазон температур горячей поверхности, отвечающий представленным на рис. 2 данным, составлял 190–350 °С. Видно, что при одинаковой температуре охладителя имеет место существенный разброс опытных данных. Это явление может быть связано со случайным характером процесса соприкосновения охладителя с нагретой поверхностью, в том числе из-за неподдающихся контролю незначительных изменений состояния поверхности нагрева. Важно отметить, что с увеличением температуры охладителя явно прослеживается уменьшение максимальной амплитуды в пакете импульсов давления. При температуре воды 90 °С оно не превышало 10 кПа. Это хорошо согласуется с уже упоминавшимся фактом отсутствия парового взрыва при малых (менее 20 °С) недогревах воды до температуры насыщения.

Попробуем найти объяснение этому явлению в поведении паровой пленки, разделяющей недогретую воду и горячую поверхность при изменении степени недогрева холод-

Рис. 2. Зависимость максимального давления от температуры охлаждающей воды.

1 — полусфера, 2 — датчик давления, 3 — вода, 4 — паровая прослойка, 5 — расстояние от полусферы до датчика давления (5 мм).



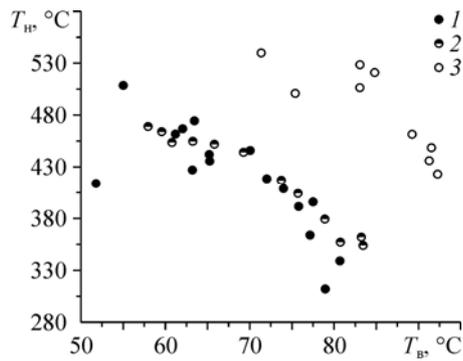


Рис. 3. Зависимость образования колебательного режима паровой прослойки от температур нагревателя T_n и охлаждающей воды T_w .

Диаметр полусферы 20 (1), 10 (2), 5 (3) мм.

ной жидкости до температуры насыщения. Наши исследования показывают, что при определенных сочетаниях температур воды и нагретой поверхности наблюдается переход от состояния гладкой стационарной паровой пленки к ее существованию в колебательном режиме. Границы режимов со спокойной и колеблющейся межфазной поверхностью показаны на рис. 3. Режимам с колебаниями границы раздела фаз для полусфер разного диаметра соответствуют температурные области, расположенные над приведенными экспериментальными кривыми.

Форма волн, образующихся на поверхности раздела фаз, показана на видеокадрах, представленных на рис. 4, *a*. Временной интервал между кадрами и время экспозиции составляли 1 и 0,1 мс соответственно. Видеоматериал получен с помощью цифровой видеокамеры Redlike SCOPE. Амплитудно-частотная характеристика и характерное значение частоты (~ 80 Гц) колебаний поверхности в нижней части полусферы, определенные с помощью волоконно-оптического преобразователя перемещений ИВТРАН [9], показаны на (рис. 4, *b*). Образующиеся волны имеют специфический вид (роликовые углубления в жидкую фазу) и низкую частоту. Они отличаются от наиболее часто встречающихся капиллярных волн, образующихся на поверхности раздела фаз пар–жидкость.

Также были проведены опыты, в которых использовались тела с плоской греющей торцевой поверхностью размером 10 мм. В процессе медленного подвода горячего плоского нагревателя к водной поверхности при определенных сочетаниях температур горячей поверхности и жидкости также возникали колебания границы раздела фаз. На рис. 5 показан характерный вид осциллограмм, полученных

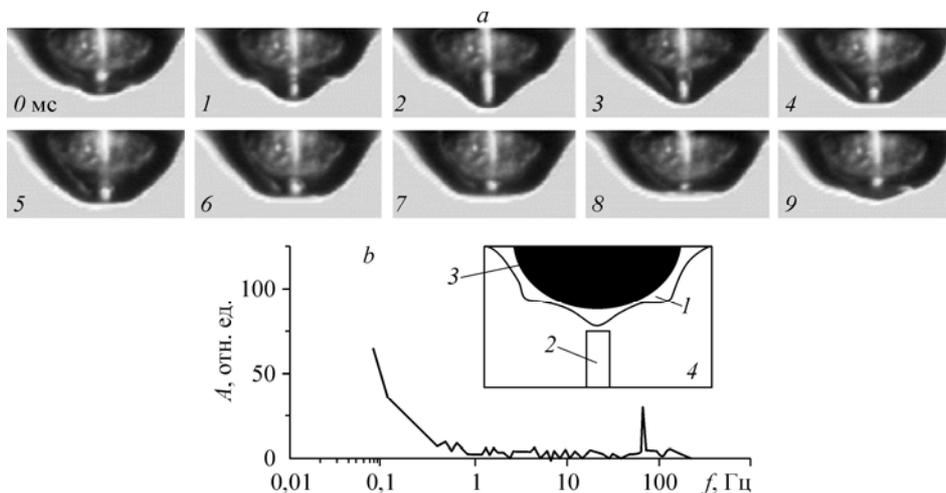


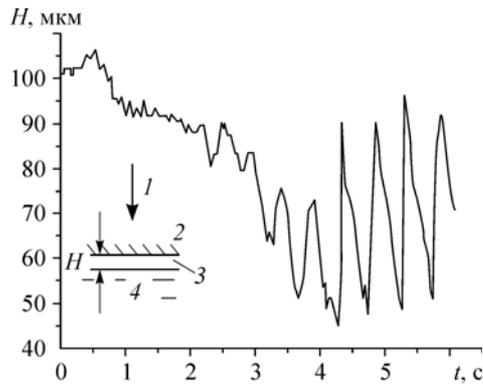
Рис. 4. Видеокадры колебаний паровой пленки около нагретой полусферы (*a*) и их амплитудно-частотная характеристика (*b*).

1 — паровая прослойка, 2 — волоконно-оптический датчик перемещений, 3 — полусфера, 4 — вода.

Рис. 5. Осциллограмма колебаний границы раздела фаз пар–жидкость в экспериментах с плоским нагревателем.

1 — тепловой поток, 2 — горячая стенка, 3 — слой пара, 4 — вода.

путем цифровой обработки отдельных последовательных видеокадров. Заметим, что, в отличие от опытов с полусферой, паровая прослойка под плоским нагревателем пульсировала как единое целое с характерной частотой в несколько Герц. Уменьшение частоты пульсаций по сравнению с возмущениями, наблюдаемыми в опытах с нагретыми полусферами, возможно, связано с увеличением объема колеблющейся паровой полости и массы присоединенной жидкости.



Интерпретация полученных результатов

Можно предположить, что возникновение колебательного режима при определенных сочетаниях температур охладителя и нагретого тела связано с резкой интенсификацией испарения с межфазной поверхности в нижней части полусферы (в этом месте толщина паровой пленки минимальна, а тепловой поток максимален) и по всей торцевой площади нагрева (в случае плоской конфигурации греющей поверхности). Действительно, в условиях пленочного кипения около нагретого тела тепло от его поверхности к поверхности раздела фаз отводится теплопроводностью, конвекцией и излучением, а от поверхности раздела фаз конвекцией вглубь жидкости, а также с теплотой фазового перехода в процессе испарения в паровую полость.

Количество тепла, отводимого свободной конвекцией от поверхности раздела фаз вглубь жидкости, можно оценить, воспользовавшись в качестве первого приближения известной формулой для теплоотдачи горизонтального цилиндра при $T_w = \text{const}$ [10]:

$$\text{Nu} = 0,5(\text{Gr Pr})^{0,25} (\text{Pr}_ж / \text{Pr}_w)^{0,25}, \quad (1)$$

где $\text{Nu} = \alpha D / \lambda$ — число Нуссельта, Gr , $\text{Pr}_ж$, Pr_w — соответственно числа Грасгофа и Прандтля (при температурах воды и насыщения), α — коэффициент теплоотдачи, D — диаметр полусферы, λ — коэффициент теплопроводности воды. При этом подразумевается, что граница раздела фаз пар–жидкость ведет себя как твердая поверхность, имеющая температуру 100°C .

Результаты расчетов по тепловой мощности, которая может быть отведена от полусферы свободной конвекцией в зависимости от температуры воды, показаны на графике рис. 6. На этом же рисунке приведены экспериментальные значения тепловой мощности, отводимой от полусферы в момент появления колебаний паровой пленки. Эти значения оценивались по показаниям двух термомпар, заделанных в центре полусферы и на оси цилиндрической части образца (см. рис. 6), а также путем численных расчетов нестационарных температурных полей в рабочем участке (обратной задачи теплопроводности), позволяющих определить температуру нагретой поверхности и количество тепла, поступающего в воду при остывании полусферы. Как видно из рис. 6, в рамках принятых допущений наблюдается удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных значений.

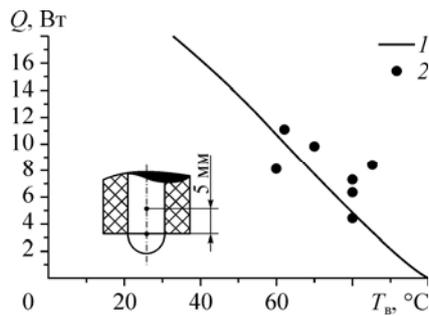


Рис. 6. Зависимость образования колебательного режима паровой полости от мощности нагревателя и температуры охлаждающей воды.

1 — расчет по (1), 2 — эксперимент.

Полученный результат можно трактовать следующим образом. До наступления режима колебаний основная часть тепла, подводимого к поверхности раздела фаз, отводится от нее в объем жидкости естественной конвекцией. С ростом температуры жидкости интенсивность отвода тепла конвекцией снижается, она уже не может целиком снять тепло, подводимое к охладителю, возрастает интенсивность испарения на межфазной поверхности и поток пара от нее в паровую полость. Толщина паровой пленки нарастает, и тепловой поток от горячей поверхности начинает снижаться. Процесс приобретает циклический характер, при котором толщина паровой пленки колеблется вокруг некоторого возросшего значения. При этом оказывается, что несмотря на наличие волн на поверхности раздела фаз, рост средней толщины паровой пленки снижает вероятность контакта жидкости с греющей поверхностью по сравнению со случаем гладкой тонкой пленки, когда случайные флуктуации пленки (гидродинамической природы) приводят к такому контакту (рис. 1). Не исключено, что определенную роль играет и форма возникающих волн — катящиеся ролики, обращенные вглубь жидкости (рис. 3).

Аналогичные оценки тепловых балансов были выполнены для случая движения сильно нагретой жидкометаллической капли в холодной жидкости. Они показали, что и в этом процессе пороговое значение недогрева холодной жидкости до температуры насыщения, ниже которого наблюдается резкое возрастание толщины парового слоя, с возникновением волн на ее поверхности составляет около 20 °С. Это значение совпадает с данными наших экспериментов с каплями жидкого олова.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования по изучению влияния температур горячего тела и охладителя на характеристики пленочного кипения недогретой жидкости показали, что при определенных сочетаниях значений этих параметров наблюдается переход от спокойного к колебательному режиму существования паровой полости около нагретого тела с частотой от нескольких единиц до сотни Герц. При этом средняя толщина пульсирующей паровой пленки оказывается больше, чем толщина гладкой пленки, существующей при больших недогревах холодной воды до температуры насыщения. Пульсирующая паровая пленка (полость) возникает в условиях, когда тепло, поступающее от нагревателя к поверхности раздела фаз, не может быть отведено в охладитель свободной конвекцией. Можно полагать, что отсутствие тонкой фрагментации горячих капель и парового взрыва при малых недогревах холодного теплоносителя может быть обусловлено этим увеличением толщины парового слоя, вызванного интенсификацией испарения с поверхности раздела, резким снижением вероятности прямого контакта горячей и холодной жидкостей, взрывного вскипания холодной жидкости и генерации импульса давления.

Список литературы

1. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва. М. Препринт ИАЭ № 54503/3. 1991. 95 с.
2. Berthoud G. Vapor explosions // Annual Review of Fluid Mechanics. 2000. Vol. 32. P. 573–611.
3. Dullforce T.E., Buchanan D.J., Perckover R.S. Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiments // J. of Physics D: Applied Physics. 1974. Vol. 9. P. 1295–1303.
4. Furuya M., Matsumura K., Kimoshita. I. A linear stability analysis of a vapor film in terms of the triggering of vapor explosions // J. of Nuclear Sci. and Technology. 2002. Vol. 39, No. 10. P. 1025–1032.
5. Matsumura K., Nariari H. Self-triggering mechanism of vapor explosions for molten tin in water // J. of Nuclear Sci. and Technology. 1996. Vol. 33, No. 4. P. 298–306.
6. Matsumura K., Nariari H. Self-triggering mechanism of vapor explosions for large-scale experiments involving fuel simulant melt // J. of Nuclear Sci. and Technology. 1997. Vol. 34, No. 3. P. 248–255.
7. Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А., Белов К.И. Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 6. С. 891–898.
8. Глазков В.В., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Игумнов В.С., Синкевич О.А., Цой В.Р., Швец В.Г. Исследование развития неустойчивости и разрушения парового слоя на твердой нагретой полусферической поверхности // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38, № 6. С. 935–944.
9. Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43, № 1. С. 100–114.
10. Михеев М. А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1977. 344 с.

Статья поступила в редакцию 7 июля 2011 г.