

О.А. Синкевич<sup>1</sup>, Ю.А. Зейгарник<sup>2</sup>, Ю.П. Ивочкин<sup>2</sup>, К.Г. Кубриков<sup>2</sup>

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)

Институт высоких температур РАН Москва, Россия (2)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО И ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМОВ КИПЕНИЯ НА ТВЕРДЫХ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛУСФЕРАХ, ПОГРУЖЕННЫХ В НЕДОГРЕТУЮ ЖИДКОСТЬ

### АННОТАЦИЯ

Исследования позволили обнаружить ряд ранее не описанных в литературе физических эффектов, характерных для пленочного и переходного кипения в жидкости недогретой до температуры насыщения. Среди них: возникновение кумулятивной струи при сходе паровой пленки; колебательный режим существования паровой области при относительно высоких температурах греющей поверхности; образование областей разрежения – сжатия в холодной жидкости.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение характеристик пленочного и переходного кипения на горячих твердых и жидких полусферических поверхностях помимо чисто научного интереса важно с практической точки зрения. Представленная работа направлена на экспериментальное изучение и теоретическое осмысление особенностей этого процесса.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. В опытах применялись твердые и жидкие металлические полусферы, а также нагреватели с плоским торцом [1].

Эксперимент (рис.1а) происходил следующим образом. В исходном состоянии рабочий участок 5 с закрепленным на нем опытным полусферическим образцом нагревался в атмосфере аргона. Затем электрический нагреватель 6 отключался, а рабочий участок с помощью специального координатного устройства со скоростью несколько миллиметров в секунду погружался в заполненную дистиллированной водой ванну 2 на глубину радиуса полусферы. Диаметр твердотельных стальных полусферических поверхностей во всех экспериментах составлял 10 мм. В качестве жидкого металла использовалось олово, применение которого позволило получить устойчивые висающие капли полусферической формы диаметром ~6 мм. Начальное значение температуры полусферы варьировалось в диапазоне 600 – 1200 К. Диапазон изменения температуры охлаждающей жидкости 288 – 368 К.

Помимо опытов с полусферами (рис. 1, б) был поставлен эксперимент с плоскими нагревателями (рис.1, в). Нагреватель – цилиндр диаметром 10 мм нагревался в атмосфере аргона и со скоростью несколько десятков микрометров в секунду прибли-

жался к свободной поверхности охлаждающей жидкости (воды), температура которой менялась от опыта к опыту.

Визуальное наблюдение осуществлялось с использованием микроскопов. Видеосъемка была выполнена с помощью обычной и скоростной видеокамер. Скоростная видеокамера позволяла изучать процесс с максимальной скоростью 1000 кадр/с при времени экспозиции  $10^{-4}$  с.

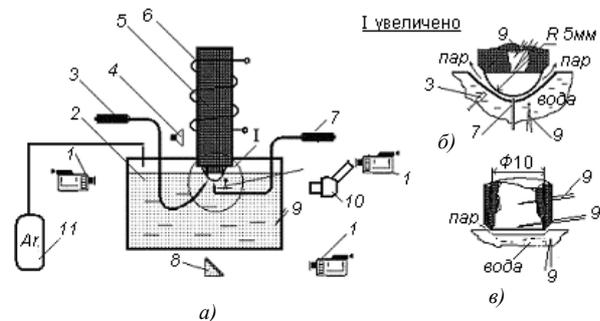


Рис.1. Схема экспериментальной установки и основных измерений (а), полусферический нагреватель (б), плоский нагреватель (в): 1 – видеокамера; 2 – емкость с водой; 3 – датчик давления; 4 – микрофон; 5 – рабочий участок; 6 – нагреватель; 7 – датчик толщины паровой пленки; 8 – зеркало; 9 – термопара; 10 – микроскоп

В опытах измерялись также импульсы давления и звуковые эффекты, сопровождающие сход паровой пленки. В качестве датчиков давления использовались малоинерционные пьезоэлектрические преобразователи фирмы Kistler и волоконно-оптические преобразователи [2].

Для определения характеристик паровой пленки применялись датчики, основанные на волоконной оптике [2], а также использовались видеозаписи процесса, обработанные в Labview Vision.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты опытов на оловянных каплях подтвердили закономерности, полученные ранее [1,3,4] на твердотельных полусферических нагревателях. Эксперименты показали, что процессы схода паровой пленки и перехода от пленочного режима кипения к пузырьковому на оловянной капле, нагретой на воздухе, носят спокойный характер и не сопровождаются взрывным расширением пара и ее дроблением. Это поведение можно объяснить существо-

ванием на нагретой поверхности толстого слоя окисной пленки, образующегося при нагреве жидкого олова на воздухе. Указанный эффект наблюдался нами ранее при проведении экспериментов на твердых медных полусферах, которые были либо специально покрыты толстым (более 100 мкм) слоем окиси алюминия, либо долго (несколько десятков минут) находились в горячем состоянии на воздухе.

Взрывной сход паровой пленки, сопровождающийся дроблением, наблюдался лишь на слабо окисленных оловянных каплях, нагретых в инертной среде аргона.

### 3.1. Результаты видеонаблюдений

На рис. 2 представлены фотографии взрывного схода парового слоя на стальной поверхности с образованием осесимметричной парожидкостной струи. Временной интервал между кадрами 1/1000 с, а время экспозиции 1/2000 с. Кадр №0 – последний со «спокойной» пленкой пара. Эксперименты выполнены при температуре воды и начальной температуре нагретой полусферы соответственно 20 и 600 °С. Во всех экспериментах наблюдалась одинаковая последовательность явлений: – после последнего кадра со «спокойной» пленкой сразу следовал кадр с ее взрывным расширением (разрушением). Никаких волновых эффектов на поверхности раздела фаз не наблюдалось. Процесс схода сопровождался образованием тонкой кумулятивной парой струи, механизм образования которой неизвестен.

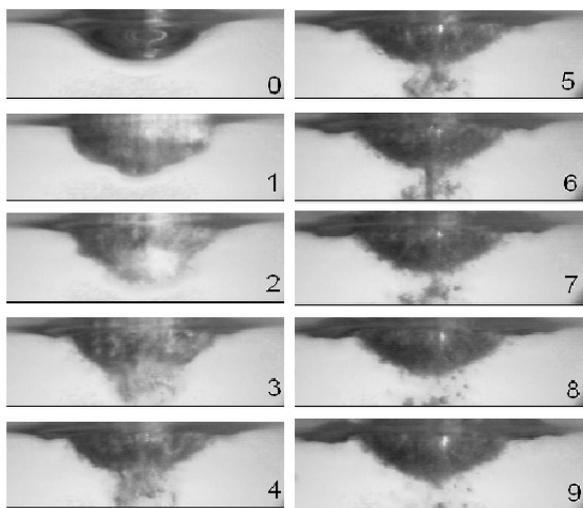


Рис. 2. Взрывной сход паровой пленки с образованием кумулятивной струи

Паровая пленка в зависимости от температуры нагревателя и охлаждающей жидкости может существовать в двух режимах – спокойном и колебательном [2]. Фотографии спокойной паровой пленки показаны на рис. 3. Влияние температуры охлаждающей жидкости на профиль границы раздела фаз проявляется в основном вблизи свободной поверхности воды.

В опытах наблюдался и колебательный режим существования паровой пленки. Форма, частота и амплитуда колебаний определялась температурами

нагревателя и охлаждающей жидкости, а также материалом образца. Для образцов из меди характерны гармонические изменения объема (толщины) паровой оболочки как единого целого с частотой несколько герц. На поверхностях же из стали X18H10T появлялись уединенные волны. Фотографии развития обнаруженных волн показаны на рис.4. Временной интервал между кадрами составляет 1 мс. Волны в форме концентрических окружностей перемещались по поверхности полусферы от ее нижней точки вверх.

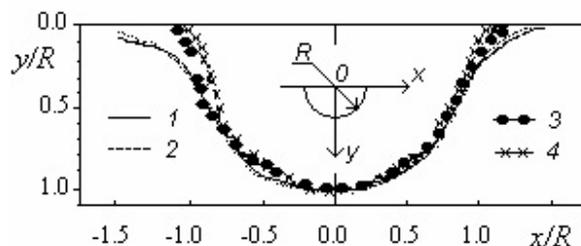
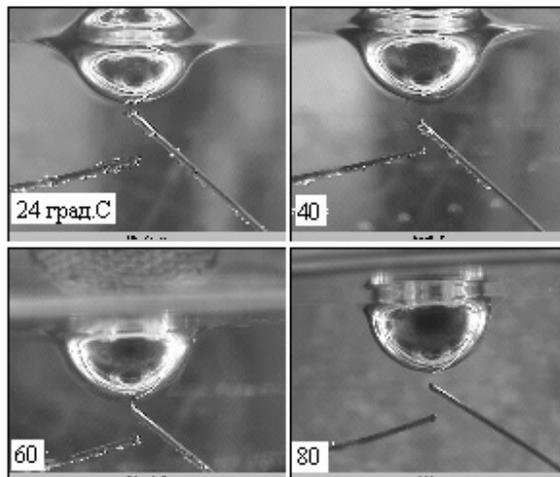


Рис. 3. Фотографии и профиль границы спокойной паровой пленки при различных температурах охлаждающей воды: 1 – температура воды 24 °С; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80, R=5 мм

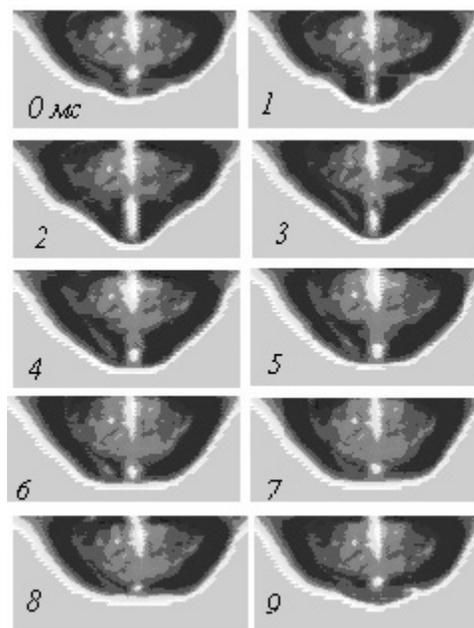


Рис. 4. Видеозапись колебательного режима паровой пленки

Амплитуды и частоты колебаний в нижней точке парового слоя определены по видеозаписи и показаниям волоконно-оптического датчика. Характерный вид осциллограммы и спектра колебаний показаны на рис.5а и рис.5б. Характерные значения амплитуды и частоты пульсаций в нижней части полусферы составляли соответственно  $\sim 140$  мкм и 50–80 Гц. Физическая природа обнаруженных колебаний не ясна. Возможно, волны на поверхности раздела связаны с гидродинамической неустойчивостью типа Кельвина – Гельмгольца, либо вызваны какими-либо другими, например, тепловыми причинами. В целях проверки этих предположений были проведены эксперименты по взаимодействию свободной водной поверхности с нагревателем плоской формы.

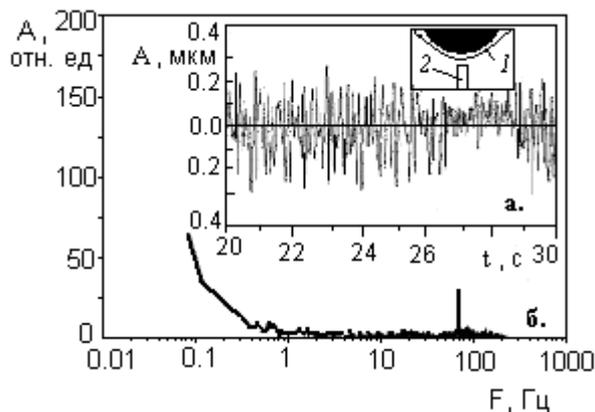


Рис. 5. Форма колебаний границы раздела фаз парожидкость (а) и амплитудный спектр этих колебаний (б): 1 – паровая пленка; 2 – волоконно-оптический датчик

Эксперименты показали, что при медленном приближении нагретой поверхности к водной поверхности между ними всегда существует паровая прослойка. Толщина парового слоя соответствует ее значению, вычисленному по уравнению Фурье в предположении, что температура нагретой водной поверхности равна  $100^\circ\text{C}$ . С повышением температуры воды, начиная с некоторого определенного ее значения (в нашем случае  $\sim 80^\circ\text{C}$ ) вся поверхность раздела в области нагрева начинает колебаться как единое целое с частотой порядка  $\sim 2$  Гц, рис. 6. Механизм возникновения колебаний требует дальнейшего изучения.

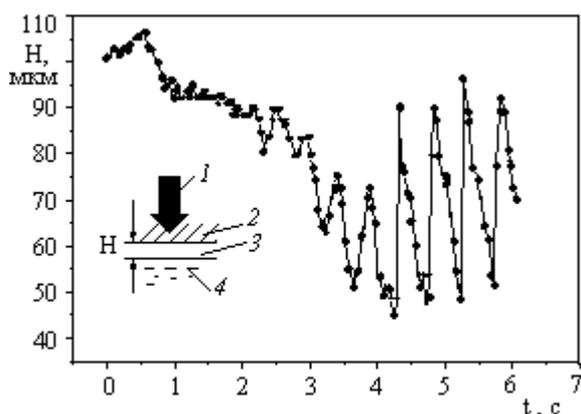


Рис. 6. Осциллограмма колебаний паровой пленки: 1 – тепловой поток; 2 – горячая стенка; 3 – слой пара; 4 – вода

### 3.2. Результаты измерений пульсаций давления

Результаты измерений давления показаны на рис. 7–9. Датчик располагался внизу под полусферой строго на ее оси на различном (3 – 20 мм) расстоянии до края полусферы. Скорость оцифровки в экспериментах составляла 50 000 измерений в секунду.

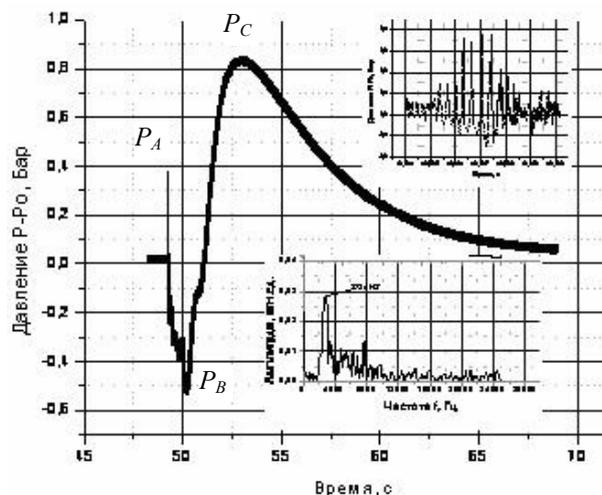


Рис. 7. Осциллограмма давления

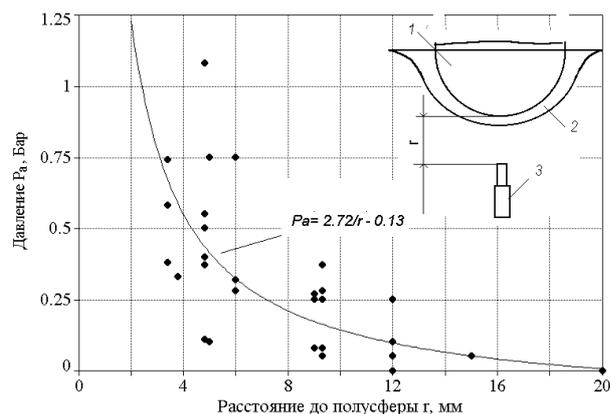


Рис. 8. Зависимость максимального давления начального импульса  $P_A$  от расстояния до нагретой полусферы («беззачелковый» сход паровой пленки): 1 – полусфера; 2 – слой пара; 3 – датчик давления

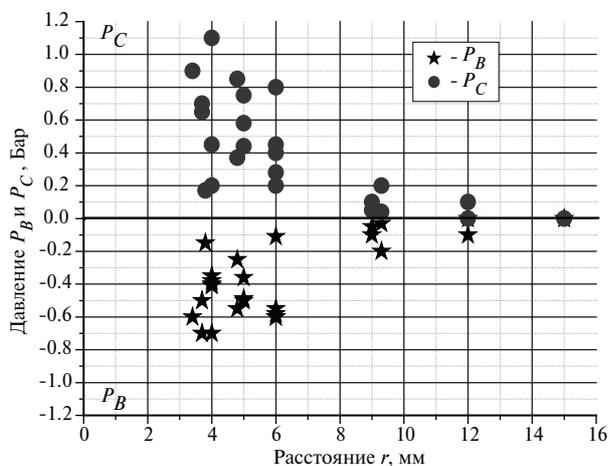


Рис. 9. Зависимость значений давления разряжения  $P_B$  и сжатия  $P_C$  от расстояния до полусферы

На рис. 7 показан характерный вид одной из двух характерных осциллограмм давления для температуры охлаждающей воды 20 °С. Режимы отличаются тем, что процесс, соответствующий рис. 7, сопровождался резким звуковым сигналом – «щелчком» и выбросом осевой парожидкостной струи. Сходу пленки предшествовал пакет импульсов давления с максимальной амплитудой  $P_A$ . Затем датчик показывал отрицательное (относительно атмосферного давления  $P_0$ ) давление – разрежение с максимальным значением  $P_B$ . Сопоставление с кадрами видеопленки, отснятого одновременно, свидетельствует, что в этот момент около датчика находилось множество паровых пузырей. Возможно, отрицательное давление обусловлено конденсацией пузырей. В дальнейшем, давление в жидкости растет в течение нескольких секунд, достигая значения  $P_C$  существенно выше атмосферного, затем медленно спадает до нуля. Характерная частота пульсаций пакета импульсов  $\sim 2700$  Гц со «щелчком» и  $\sim 1400$  Гц без него.

На рис. 8 представлена зависимость максимального давления начального пакета импульсов  $P_A$  от расстояния до нижнего края полусферы. Экспериментальные данные описываются кривой типа  $P_A \sim 1/r$ . Максимальная амплитуда импульсов давления во всех экспериментах не превышала 0.2 МПа. Это меньше, чем амплитуда импульса давления, необходимого для инициирования парового взрыва отдельной капли олова ( $P_{\text{крит}} \sim 0.4$  МПа [6]). На рис. 9 показаны значения давления разрежения  $P_B$  и последующего сжатия  $P_C$  в зависимости от расстояния до полусферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили обнаружить ряд ранее не описанных в литературе физических эффектов, характерных для пленочного и переходного кипения в жидкости недогретой до температуры насыщения и уточнить уже описанные.

Возникновение кумулятивной струи при сходе паровой пленки, колебательный режим существования паровой области при относительно высоких температурах греющей поверхности, образование областей разрежения – сжатия в холодной жидкости, на наш взгляд, должны учитываться при построении моделей естественного инициирования парового взрыва, вызванного фрагментацией жидкометаллической капли.

Авторы благодарны В.Г. Жилину и за помощь в постановке экспериментов и обсуждении полученных результатов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 05-02-17679.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Grigoriev V.S., Ivochkin Yu.P., Kryukov A.P., Zeigarnik Yu.A., Zhilin V.G.** Certain features of film boiling on a solid hemispherical surface // Proc. Third Int. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Paper Ven 23, 2004.
2. **Fiber-optical Pressure Transducers / V.G. Zhilin, Yu.P. Ivochkin, A.A. Oksman and et al** // Teplof. vys. temp. 1996. Vol. 34. No. 5. P. 819–823.
3. **Glazkov V.V., Zhilin V.G., Zeigarnik Yu.A., Ivochkin Yu.P., Sinkevich O.A., Tsoy V.R.** Study of transition from film to nucleate boiling on a solid hemispherical surface // Proc. of the Fifth World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 2001. Vol. 1. P. 337 – 342. Thessalonica, Greece.
4. **Glazkov V.V., Zhilin V.G., Zeigarnik Yu.A., Ivochkin Yu.P., Sinkevich O.A., Tsoy V.R.** Water Boiling on Highly Superheated Hemispherical Samples // Proc. of the Twelfth Int. Heat Transfer Conf. 2002. Vol. 3. P. 545–549. Grenoble, France.
5. **Dullforce T.F., Buchanan D.J., Peckover R.S.** Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiments // J.Phys. D. 1976. Vol. 9. P. 1295–1303.
6. **Nelson L.S., Duda P.M.** Steam explosions experiments with single drops of iron oxide melted with CO<sub>2</sub> –laser // High Temperatures – High Pressures. 1982. Vol. 14. P. 259–281.