

**УДК. 536.423.**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ВСКИПАНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАСТЯЖЕНИИ**

**Виноградов В.Е.**

*Институт теплофизики Уральского отделения РАН, г.Екатеринбург, Россия.*

Экспериментально изучена начальная стадия образования паровой пленки на проволочном нагревателе при импульсном растяжении жидкости. Прослежена динамика роста паровых пузырей на поверхности проволочного нагревателя в этиловом спирте, н-гептане, гексадекане и диэтиловом эфире. Показано, что развитие третьего кризиса кипения в растянутой жидкости лимитируется релаксацией отрицательного давления вблизи растущих паровых пузырей.

В условиях обеднения поверхности нагрева центрами кипения может реализовываться (по терминологии [1]) третий кризис кипения. Третий кризис кипения наблюдается в области температур, примыкающей к границе предельных перегревов жидкости. В этом случае паровая полость, возникшая искусственно или случайным образом на слабом месте, распространяется вдоль нагревателя со скоростью значительно превышающей скорость роста пузырей вследствие теплоподвода. В работе [2] было показано, что быстрый рост паровых каверн на тонких нагревателях обусловлен реакцией отдачи пара. Отмечается, что третий кризис кипения наблюдается преимущественно при пониженных давлениях в жидкости [3]. В этой связи представляется интересным изучить динамику развития паровой полости в области отрицательных давлений.

В данной работе экспериментально изучена начальная стадия образования паровой пленки на проволочном нагревателе при импульсном растяжении жидкости. Использовалась методика импульсного перегрева жидкости на платиновой проволочке диаметром 20 мкм и длиной 1 см в волне отрицательного давления длительностью от 3 до 20 мкс и амплитудой до -10 МПа [4].

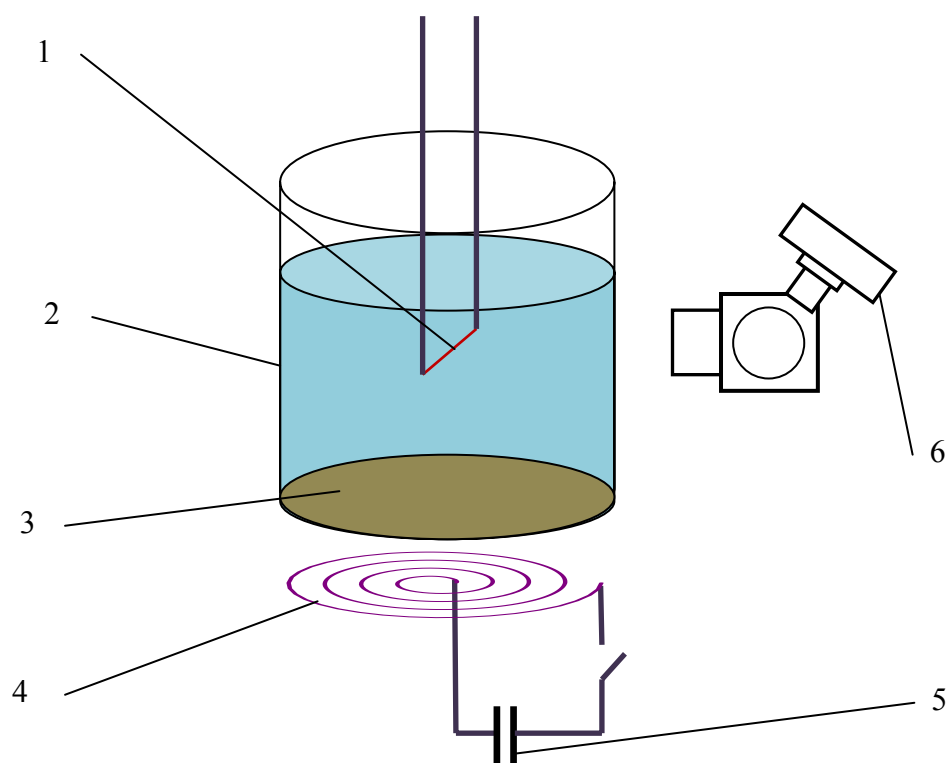


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1 – платиновая проволочка, 2- рабочая камера, 3 – дюралевая мембрана, 4 - спиральная катушка, 5 – высоковольтный конденсатор, 6 – фотоаппарат.

Отрицательное давление в жидкости создавалось методом инверсии короткой волны давления при отражении от свободной поверхности жидкости. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Давление растяжения в отраженной волне определяется выражением:

$$p_- = p_g + p_+ \cdot k, \quad (1)$$

где  $p_g$  - давление газа или пара над поверхностью жидкости,  $p_+$  - давление в падающей волне положительного давления,  $k$  – коэффициент отражения, который определяется выражением:

$$k = \frac{\omega_g - \omega_l}{\omega_g + \omega_l}, \quad (2)$$

где  $\omega_g = \rho_g \cdot c_g$ ,  $\omega_l = \rho_l \cdot c_l$  - акустические импедансы газа и жидкости соответственно. Здесь  $c_g$  и  $c_l$  скорость звука в паре и жидкости. Поскольку  $\omega_l \gg \omega_g$ , то  $k \approx 0$ . При  $|p_+| \geq |p_g / k|$  после отражения вглубь жидкости распространяется волна отрицательного давления. Короткая волна давления (длительностью от 3 до 20 мкс) формировалась дюралевой мембраной(3), которая является дном камеры(2), при разряде высоковольтного конденсатора(5) на плоскую катушку(4). Амплитуда импульса давления измерялась пьезокерамическим датчиком давления. Перед началом опытов проводилась градуировка установки. Погрешность измерения давления составляла  $\sim 3-5\%$ .

Температура проволочного нагревателя, погруженного в жидкость при комнатной температуре измерялась по известной методике[2], с помощью мостовой схемы.

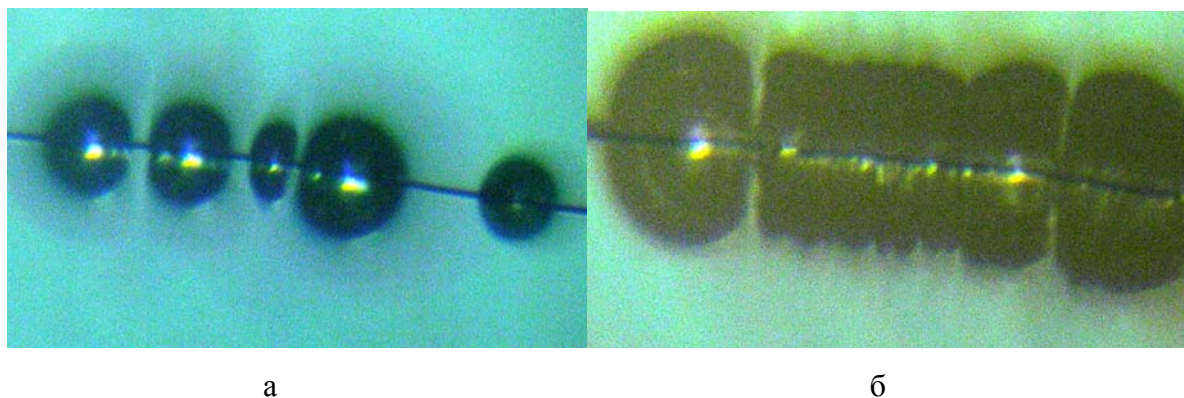


Рис.2. Кризис кипения на платиновой проволочке в н-гептане при отрицательном давлении. Время разогрева проволочки 25 мкс,  $T = 140^\circ\text{C}$ ,  $p = -4$  МПа; а – начальная стадия роста пузырьков, б – слияние растущих пузырьков через 2 мкс.

Процесс образования и роста паровой фазы на проволочке фотографировался через микроскоп фотоаппаратом (б). Время экспозиции задавалось импульсным осветителем, выдающим 2 импульса света длительностью менее 0.5 мкс каждый. Интервал между вспышками изменялся в пределах от 1 до 10 мкс. Это позволяло получать на одном кадре два изображения объекта с заданным интервалом времени. Точность измерения интервала времени между вспышками составляла  $\sim 0.2$  мкс.

Опыты проводились с этиловым спиртом, гептаном, гексадеканом и диэтиловым

эфиром. Прослежена динамика роста, как единичных паровых пузырьков, так и семейства пузырьков на разогреваемой проволочке в волне отрицательного давления. Прежде всего было установлено, что при малых временах разогрева проволочки и соответственно малой толщине прогретого слоя жидкости кризис кипения на проволочке наступает в результате слияния рэлеевских пузырьков (рис.2.)

Для того, чтобы начался преимущественный рост пузырьков вдоль нагревателя (третий кризис кипения) необходимо, чтобы толщина прогретого слоя жидкости была сопоставима с радиусом проволочки. В нашем случае это происходило при временах разогрева проволочки до начала вскипания более 50 мкс. На рис.3 приведена типичная фотография роста парового пузырька на горячей проволочке при времени разогрева  $t = 100 \text{ нс}$  и отрицательном давлении в жидкости -1.2 МПа.

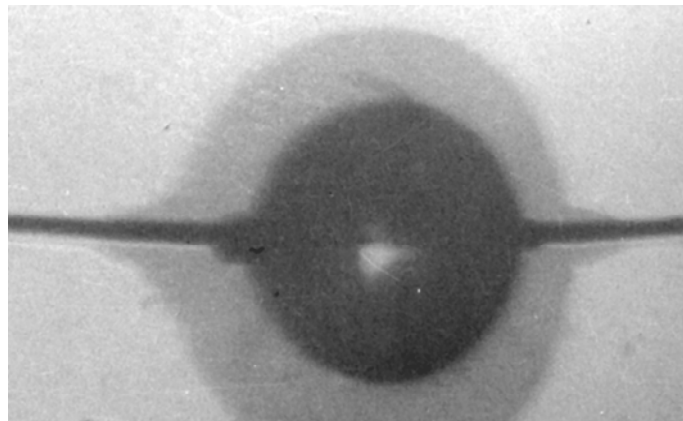


Рис.3. Рост пузыря на платиновой проволочке в растянутом этиловом спирте.  $p = -1.2 \text{ МПа}$ ,  $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ; более темное изображение – начальная стадия роста, светлое изображение – тот же пузырек через  $\Delta t = 3 \text{ нс}$ .

В этом случае наблюдается более быстрый рост паровой полости вдоль нагретой проволочки. На рис.4. приведены результаты измерения размеров паровой полости на горячей проволочке в этиловом спирте от времени роста при времени разогрева проволочки  $\sim 100 \text{ мкс}$  и температуре  $\sim 170 \text{ К}$ . Наблюдается более быстрый рост паровых полостей вдоль проволочки. Скорость роста пузырьков перпендикулярно нагревателю лимитируется действием инерционных сил. Зависимость  $\Delta r(\Delta t)$  имеет практически

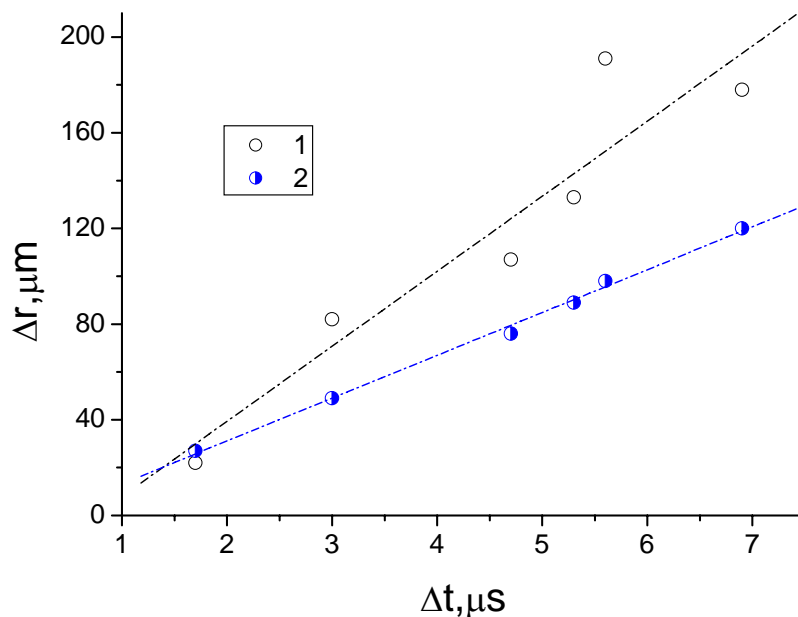


Рис.4. Зависимость линейных размеров пузыря на проволочке в этиловом спирте от времени роста. Температура проволочки  $T = 165^{\circ}\text{C}$ ,  $p = -1.2$  МПа. Точки – эксперимент; штрихпунктирные кривые – линейная интерполяция. 1 – продольный радиус, 2 – поперечный радиус.

линейный вид, что характерно для роста рэлеевских пузырьков. Однако, экспериментальные значения скорости роста пузырьков несколько меньше расчета по формуле Рэлея:

$$\Delta r = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p_g - p_l}{\rho_l} \cdot \Delta t} \quad (3)$$

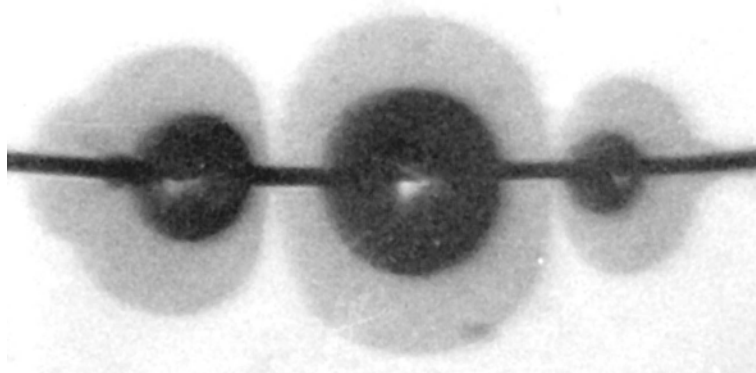


Рис.5. Взаимное влияние растущих на платиновой проволочке пузырьков.  
 $T = 165^{\circ}\text{C}$ ,  $p = -1.2$  МПа, время разогрева до появления пузырьков 100 мкс,  $\Delta t = 3i \hat{e}\tilde{n}$

Ранее было показано[5], что рост пузырьков в перегретой растянутой жидкости происходит настолько быстро, что охлаждается поверхность растущего пузырька. Поэтому не исключено, что в этом случае начинают проявляться силы вязкости, которые уравнение Рэлея не учитывает. Развитие третьего кризиса кипения в случае растянутой жидкости занимает довольно узкие временные рамки. Это обусловлено тем, что от растущих в растянутой жидкости пузырьков со скоростью звука (~1 км/мс) идут волны положительного давления. Поэтому отрицательное давление в их окрестности очень быстро релаксирует, что замедляет скорость роста соседних пузырьков. На рис.5. хорошо видно, что растущие рядом пузырьки начинают вытягиваться в поперечном направлении.

### Заключение

Исследования начальной стадии вскипания перегретых жидкостей при отрицательном давлении показали, что при определенных условиях на тонких проволочных нагревателях возможна реализация третьего кризиса кипения. Однако в случае растянутой жидкости он сильно ограничен по времени в связи с быстрой релаксацией отрицательного давления в окрестности растущих паровых пузырьков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 07-08-00139-а

### Литература

1. Авксентюк Б.П., Кутателадзе С.С. Неустойчивость режима теплообмена на поверхностях обедненных центрами парообразования// Академик С.С.Кутателадзе. Избранные труды. Новосибирск, Наука, 1989. С. 297-302.
2. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 248 с.
3. Авксентюк Б.П., Овчинников В.В., Плотников В.Я. Самоподдерживающийся фронт вскипания.// Известия Сибирского отделения АН СССР, серия технических наук, 1989, вып. 2. С. 17-23.

4. Виноградов В.Е., Павлов П.А. Граница предельных перегревов н-гептана, этанола, бензола и толуола в области отрицательных давлений. Теплофизика высоких температур, 2000, т.38, №3, с. 402-406.
5. Vinogradov V.E., Pavlov P.A. Rate of bubble growth at limiting superheats of a stretched liquid. Heat transfer research. V.38. N.5, p.389-398.