

03

## Оптические исследования начальной стадии спонтанного вскипания

© А.Л. Гурашкин, А.Д. Ямпольский, А.А. Старостин, П.В. Скрипов

Институт теплофизики УРО РАН, Екатеринбург

E-mail: pavel-skripov@bk.ru

Поступило в Редакцию 13 февраля 2013 г.

Для изучения спонтанного вскипания жидкости применена техника оптоволоконной рефлектометрии. Быстродействие методики опытов (10 MS/s) и малые размеры площадки измерения ( $9\ \mu\text{m}$ ) открыли новые возможности для контроля начальной стадии вскипания. При использовании двухзондовой схемы обнаружен факт одновременного измерения сигнала-предвестника двумя чувствительными элементами оптических зондов. На основании результатов опытов сделано предположение о локальном характере возникновения источника возмущения в перегретой жидкости, порождающего наблюдаемый сигнал. Произведена оценка скорости распространения возмущения в широкой области изменения степени перегрева среды.

Классическая теория вскипания жидкостей построена в предположении, что жизнеспособные зародыши новой фазы возникают в результате некоторого случайного процесса, связанного с флуктуациями плотности в гомогенной системе (см. работы [1,2] и библиографию в них). Пространственным масштабом при термодинамическом описании вскипания служит критический радиус пузырька  $r_c(T, p)$ , достижение которого при заданных значениях температуры  $T$  и давления  $p$  в системе делает выгодным его дальнейший рост. Предсказываемые нанометровые значения  $r_c$  и сосредоточенность вскипания в микросекундном интервале времени затрудняют проверку базовой гипотезы в опыте. В этой связи в опытах наблюдается отклик на вскипании, генерируемый макропузырьками [1,2]. Ранее отмечалось [3], что существует противоречие между микроскопическим описанием начальной стадии вскипания и наблюдаемыми в опыте результатами макроскопических измерений. Дальнейшее развитие исследований мы связываем с развитием техники быстродействующих микрооптических измерений свойств жидкостей [4-8]. В опытах при атмосферном давлении выясне-

но [4], что вскипание жидкости в стеклянных капиллярах предваряется характерным ступенчатым сигналом, а характер вскипания (с ростом перегрева относительно температуры равновесия жидкость–пар при заданном давлении) не меняется вплоть до достижимой в наших опытах степени перегрева. Цель данной работы состоит в поиске источника этого сигнала-предвестника и характерных условий его проявления.

Экспериментальная установка представляет собой чистую пузырьковую камеру [1,2]. Ее основной частью является стеклянный капилляр, находящийся в термостате. Капилляр гидравлически отделен сифоном от газовой системы создания, измерения и изменения давления. При заданной температуре перегретое состояние получают сбросом начального давления, превышающего давление насыщения, до некоторого значения ниже давления насыщения. Длительность сброса выбирается из условия релаксации температуры жидкости к моменту установления давления ( $\sim 1$  s). В этот же момент включается измерение времени жизни жидкости в перегретом состоянии. Остановка счета времени производится автоматически по моменту появления границы раздела фаз в капилляре или повышения нем давления. Строгих требований к быстродействию аппаратуры ранее не предъявлялось, поскольку исследуемый диапазон времен жизни составлял 1–100 s. Время реакции на вскипание в применявшихся ранее установках имело порядок величины 0.1 s.

Оптическая схема выделения сигнала о вскипании жидкости показана в работах [8,9]. От источника оптическое излучение по световоду попадает в разветвитель и далее в исследуемую жидкость через оптоволоконный зонд. В зависимости от условий на торце зонда падающий поток частично проходит в исследуемую среду и частично отражается. Отраженное излучение направляется разветвителем на фотоприемник с усилителем. Усиленный электрический сигнал передается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер. Кроме того, сигнал фотоприемника используется для управления лазерной подсветкой для синхронизации кадров видеосъемки с графиком напряжения этого сигнала. Подсветка срабатывает при значительных изменениях напряжения сигнала. Диаметр капилляров в наших опытах составлял 1 mm. Чувствительным элементом служил скол на торце оптического зонда из волокна SMF-28 с внешним диаметром 125  $\mu\text{m}$  и диаметром световедущей жилы 9  $\mu\text{m}$ . Сигнал с быстродействующего фотодиода GAP100 усиливался трансимпедансным усилителем AD8610 (постоянная времени состав-

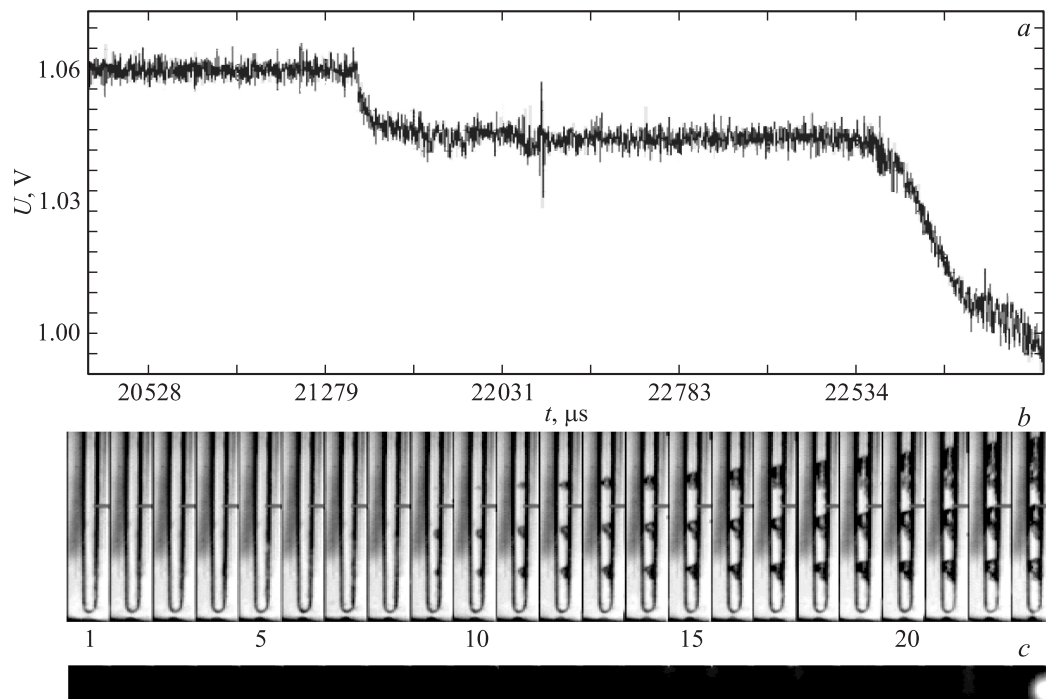
ляет единицы микросекунд) и обрабатывался АЦП с быстродействием в 10 MS/s.

На границе раздела торца световедущей жилы кварцевого зонда и внешней среды соотношение прошедшего и отраженного излучения (т.е. величина сигнала) определяется различием показателей преломления кварцевой жилы и среды [5]. По величине отраженного сигнала можно судить о значении показателя преломления перегретой жидкости в зависимости от давления и температуры. Наше устройство позволяет измерить его с погрешностью  $10^{-4}$ . Существует однозначная связь между показателем преломления и плотностью жидкости [5] или ее структурой [10]. Влияние температуры и давления проявляется через изменения свойств жидкости и приводит к соответствующим изменениям величины сигнала.

Локализация площадки измерения определяется характерным размером световедущей жилы. При появлении на этой площадке пузырька пара доля отраженного излучения резко возрастает, и осциллограмма фиксирует превышение порога, ограничивающего амплитуду сигнала. При превышении порога вырабатывается импульс управления для включения лазерного источника подсветки кадра видеосъемки. Благодаря этому оказывается возможным синхронизировать картину вскипания, полученную с помощью оптического зонда, с видеофильмом, снятым видеокамерой.

Фрагмент массива данных опыта показан на рис. 1. Исключены участки, которые не несут информации о вскипании: участок при исходном давлении, участок понижения давления до атмосферного значения, часть участка, соответствующего пребыванию жидкости в состоянии перегрева. Для синхронизации выбран момент времени, соответствующий первому обнаружению зонда в паровой фазе и включению подсветки капилляра (кадр 23 на рис. 1). Синхронизирующая подсветка позволяет отметить те кадры, на которых зонд находился в паровой фазе. На осциллограмме в этих местах появляются разрывы. Сплошные участки осциллограммы соответствуют пребыванию зонда в жидкой фазе.

Начало перехода системы в двухфазное состояние предваряется характерным ступенчатым снижением амплитуды сигнала (кадр 7 на рис. 1). Вслед за этим снижением начинается развитие процессов уже в двухфазной системе. На кадрах 9–19 наблюдается сравнительно медленный рост трех зародышей, который практически не изменяет



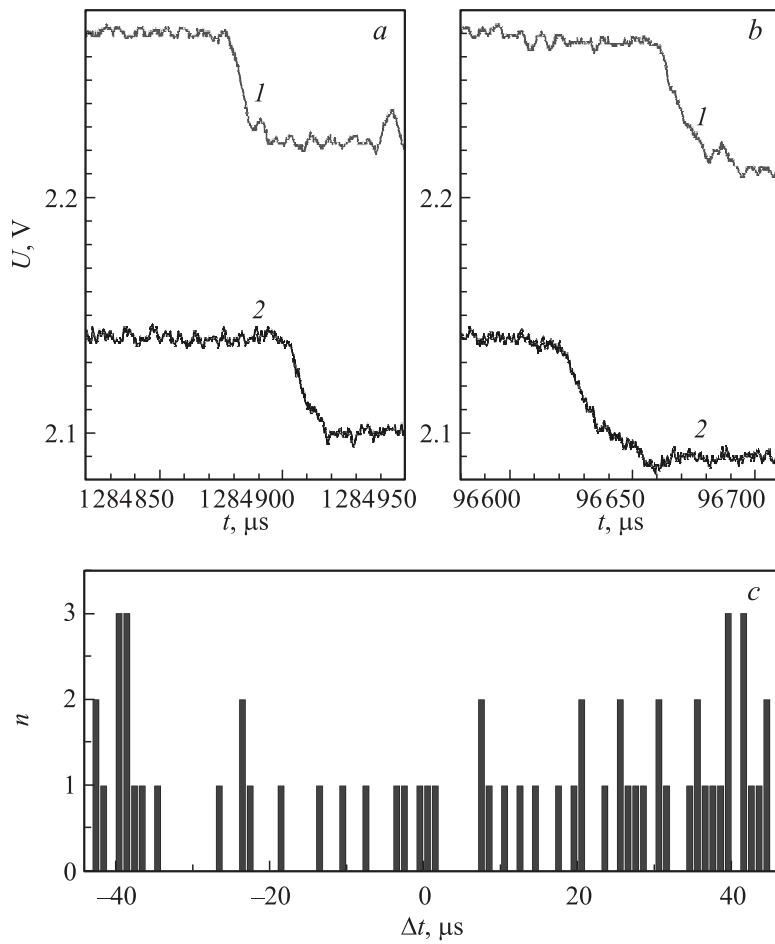
**Рис. 1.** Зависимость сигнала с оптоволоконного зонда от времени (*a*), совмещенная с видеорядом параллельной киносъемки (*b*), на участке перехода системы (перегретый *n*-гексан) в двухфазную область. На видеокдрах штрихами показано положение торца световода. Область (*c*) — синхронизирующая подсветка, позволяющая отметить кадры, на которых зонд находился в паровой фазе.

температуру среды. На кадрах 20–23 видно, что парообразование интенсифицируется, и температура жидкости заметно падает. На 23 кадре торец зонда оказывается в паре, и сигнал уходит за ограничивающий уровень. Полная осциллограмма вскипания приведена в работе [4].

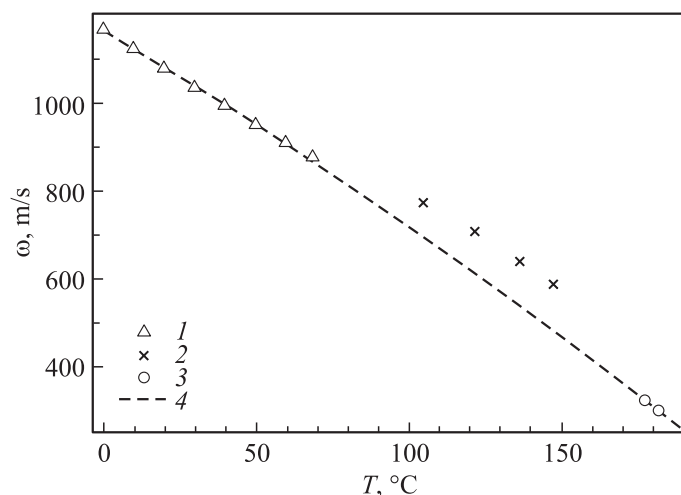
Для формирования более полной картины процесса были проведены опыты с двумя оптическими зондами и системой измерения величины отраженного сигнала на двух каналах со скоростью 5 MS/s. Расстояние между торцами зондов измерено катетометром и составляло  $14.60 \pm 0.01$  mm. Всего были проведены около ста опытов при разных температурах в области 170–182°C. По каждому каналу записывались сигналы, аналогичные представленному на рис. 1. Обнаружен факт одновременного изменения сигнала на оптических зондах (рис. 2). Ступенчатое изменение сигнала в начале вскипания поступало на оба зонда с разной задержкой, меняющейся от опыта к опыту.

Получены осциллограммы с различными задержками сигналов относительно друг друга при постоянстве максимальной величины задержки. Можно предположить, что отмечаемый процесс порождается локальным источником, от которого в жидкости распространяется скачкообразное возмущение с переходным временем 5–10  $\mu$ s. Максимальная задержка в этом случае соответствует расположению источника за пределами области, находящейся между торцами зондов. Меньшие значения задержек соответствуют локализации источника возмущения в указанной области. Зная расстояние между зондами и величину максимальной задержки, можно найти скорость распространения возмущения в перегретой жидкости. Найденные значения в первом приближении соответствуют значениям скорости звука, полученным экстраполяцией известных значений для *n*-гексана в стабильной области. На рис. 3 приведены оценки скорости распространения возмущения для температур 177.0 и 181.6°C.

Предположение о локализации источника начального возмущения позволяет проверить гипотезу о равновероятном появлении зародыша в любом месте контролируемой области. С этой целью построена гистограмма времен задержек сигнала (рис. 2, *с*). Приведенное распределение времен задержек действительно свидетельствует о равновероятности появления источника возмущения в области между торцами двух зондов. Большое число реализаций с максимальным временем задержки может быть объяснено тем, что учитываются все возможные случаи возникновения источника вне области контроля.



**Рис. 2.** Изменение сигналов с двух оптических зондов в начале вскипания. Опыт (a) показывает опережение сигнала на первом зонде, опыт (b) — запаздывание сигнала на первом зонде. Значения времени даны в микросекундах, шаг деления составляет  $10 \mu\text{s}$ ; (c) — гистограмма времен задержек между сигналами. Знак + соответствует опережению появления возмущения на сигнале первого канала.



**Рис. 3.** Зависимость рассчитанной скорости распространения возмущения в начале вскипания от температуры в предположении о локальном характере источника возмущения: 1 — данные [11], 2 — данные [2], 3 — данные наших опытов, 4 — аппроксимационная линия. Значения скорости приведены для  $p_{exp} = 0.1$  МПа.

Таким образом, предложен высокоскоростной способ изучения начальной стадии вскипания жидкостей в стеклянных капиллярах с помощью оптоволоконного зонда до границы достижимого перегрева.

Применение техники измерений по двухзондовой схеме позволило получить дополнительную информацию об особенностях проявления возмущения, предваряющего вскипание, на регистрируемых сигналах. Сделано предположение о локальном характере возникновения источника возмущения в перегретой жидкости. Исходя из этого предположения, рассчитаны скорости распространения наблюдаемого возмущения для достижимых в опыте температур перегрева *n*-гексана. На полученной опытным путем зависимости времен задержек сигнала между каналами измерения не найдено особенностей, противоречащих предположению о равновероятном механизме образования локального источника, порождающего распространяющееся в перегретой жидкости возмущение. Вместе с тем остается открытым вопрос о природе ис-

точника возмущения и о механизме развития последующего вскипания жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-31031) и пилотного проекта совместных исследований УрО РАН–CRDF (RUE1-7033-EK-11).

## Список литературы

- [1] *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
- [2] *Ермаков Г.В.* Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002.
- [3] *Ермаков Г.В., Гурашкин А.Л., Липнягов Е.В., Перминов С.А.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 23. С. 70.
- [4] *Gurashkin A.L., Starostin A.A., Ermakov G.V., Skripov P.V.* // J. Chem. Phys. 2012. V. 136. P. 021 102.
- [5] *Авдеев М.В., Баграташвили В.Н., Коновалов А.Н., Попов В.К., Цыпина С.И., Соколова М.В., Ке Дж., Полиакофф М., Ву В.З., Ванг Б., Хан Б.Х.* // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2007. Т. 2. С. 28.
- [6] *Davitt K., Arvengas A., Caupin F.* // Eur. Phys. Lett. 2010. V. 90. P. 16 02.
- [7] *Davitt K., Rolley E., Caupin F., Arvengas A., Balibar S.* // J. Phys. Chem. 2010. V. 133. P. 174 507.
- [8] *Волосников Д.В., Гурашкин А.Л., Смотрицкий А.А., Старостин А.А., Ямпольский А.Д., Скрипов П.В.* // Вестник ТГТУ. 2012. Т. 18. № 3. С. 538.
- [9] *Гурашкин А.Л., Старостин А.А., Уймин А.А., Ямпольский А.Д., Ермаков Г.В., Скрипов П.В.* // J. Eng. Thermophys. 2013. V. 22. N 3.
- [10] *Tawfik A. El-Dessouki, Mohammed Roushdy, Nabil I. Hendawy, Magdi M. Naoum, Ayman A. Zaki* // J. Modern Phys. 2013. V. 4. P. 39.
- [11] <http://webook.nist.gov/cgi/fluid.cgi>