

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

УДК 536.248.2

**Вскипание недогретой воды на микронагревателе  
в условиях импульсного тепловыделения\***

**А.С. Суртаев<sup>1,2</sup>, В.С. Сердюков<sup>1,2</sup>, И.П. Малахов<sup>1,2</sup>,  
М.В. Тимошевский<sup>1,2</sup>, А.С. Сафаров<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

E-mail: surtaev@itp.nsc.ru

Статья посвящена экспериментальному исследованию процесса вскипания недогретой жидкости на прозрачном микронагревателе при импульсном тепловыделении. Получены зависимости максимального диаметра пузырей, скоростей их роста и времен ожидания вскипания от плотности теплового потока и степени недогрева жидкости в диапазонах  $11\div 32$  МВт/м<sup>2</sup> и  $50\div 75$  К соответственно. Проведен расчет температуры вскипания жидкости для исследованных режимов с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics.

**Ключевые слова:** импульсный нагрев, кипение, недогретая жидкость, эволюция пузыря, высокоскоростная визуализация, микронагреватель.

Проблема вскипания жидкости при импульсном нагреве привлекает исследователей уже на протяжении нескольких десятилетий, что обусловлено использованием данного эффекта в различных практических приложениях, включая технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1–3]. Еще одним нетрадиционным приложением, в котором реализуется эффект вскипания недогретой жидкости, является технология разрушения различных патологических образований путем лазеро-индуцированного нагрева биологической жидкости, что является важной и актуальной проблемой в медицине [4]. Суть данной технологии заключается в следующем: оптоволокну диаметром  $0,3\div 2$  мм, по которому с заданной длительностью передается лазерное излучение, вводится в нужную биологическую среду. Под действием лазерного излучения торец оптоволокну нагревается и при контакте с жидкостью на его поверхности происходит гетерогенное вскипание, сопровождающееся при определенных условиях образованием двухфазных струй [5]. Такие направленные струйные потоки могут обеспечить эффективное тепловое воздействие на биоткани, например, кистозной оболочки через объем кистозной жидкости или внутренней оболочки вен через объем крови, их заполняющий. В результате такого воздействия температура патологической ткани повышается, что

---

\* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 19-19-00122).

может приводить к ее тепловому разрушению. Несмотря на то, что данная технология уже находит применение в медицинской практике, возможность ее широкого использования ограничивается недостаточным пониманием условий и режимов вскипания биологической жидкости в зависимости от длительности импульса и мощности тепловыделения (скорости нагрева  $dT/dt$ ), а также их влиянием на генерацию струйных течений при импульсном лазерном нагреве. С учетом этого целью настоящей работы стало экспериментальное исследование динамики роста и конденсации паровых пузырей на прозрачном микронагревателе, моделирующем торец оптоволокна, при вскипании недогретой жидкости при импульсном тепловыделении.

Для моделирования процесса вскипания жидкости при лазеро-индуцированном нагреве на первом этапе было проведено экспериментальное исследование вскипания воды, недогретой до температуры насыщения, на поверхности микронагревателя. Эксперименты выполнялись в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении с использованием экспериментального стенда, подробное описание которого представлено в работе [6]. В опытах использовалась специальная конструкция прозрачного тепловыделяющего элемента с тонкопленочным микронагревателем на основе оксида индия-олова (ITO) размером  $0,8 \times 1$  мм и толщиной 1 мкм, осажденным на сапфировую подложку толщиной 400 мкм. Такая конструкция нагревателя позволяет с высокой точностью визуально регистрировать эволюцию паровых пузырей с нижней стороны сапфировой подложки с использованием высокоскоростной видеокамеры [6]. Тепловыделение осуществлялось пропусканием через ITO-микронагреватель импульса постоянного тока заданной мощности и длительности. Для нагрева применялся программируемый импульсный источник питания ГОРН-К-600/12 с фронтом нарастания тока не более 5 мс. Плотность теплового потока вычислялась по показаниям величины тока, пропускаемого через тонкопленочный нагреватель, и разности потенциалов между серебряными токоподводящими площадками. Визуализация вскипания жидкости проводилась с использованием высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM SA5 с частотой съемки до 50 кГц и пространственным разрешением 16 мкм/пикс. Запись текущих значений напряжения и тока на микронагревателе, а также высокоскоростная видеосъемка были синхронизированы с моментом подачи тепловой нагрузки с помощью платы АЦП NI 6251 и программного пакета LabView.

На первой стадии был проведен анализ видеоданных динамики роста и конденсации паровых пузырей. На рис. 1 представлены кадры высокоскоростной визуализации

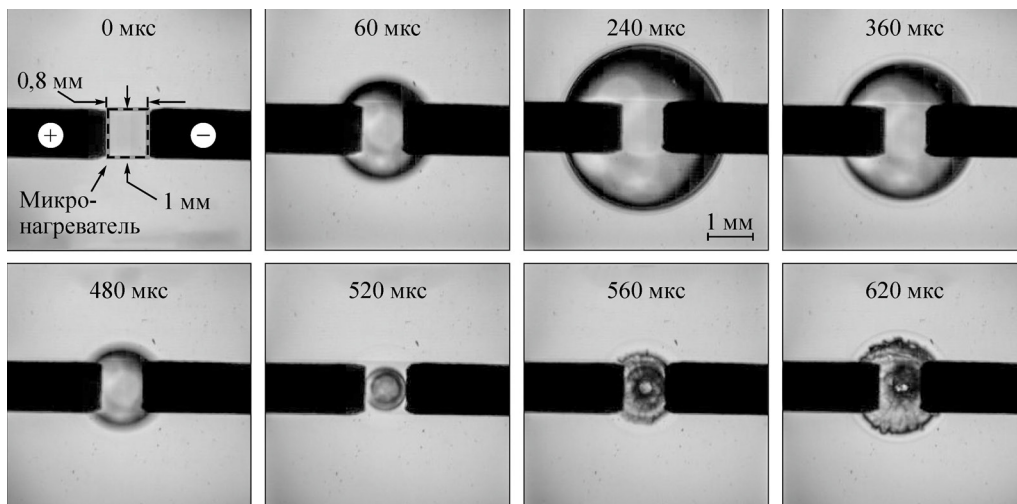


Рис. 1. Эволюция парового пузыря при вскипании недогретой воды ( $\Delta T_{\text{нед}} = 63$  К) в условиях импульсного нагрева ( $q = 22,8$  МВт/м<sup>2</sup>,  $t_{\text{имп}} = 150$  мс).

с нижней стороны прозрачного нагревателя эволюции пузыря в недогретой воде ( $\Delta T_{\text{нед}} = 63 \text{ K}$ ) при плотности подводимого теплового потока  $q = 22,8 \text{ МВт/м}^2$  ( $t_{\text{имп}} = 150 \text{ мс}$ ). Как видно из кадров, данный формат видеосъемки позволяет определять размеры парового пузыря, скорость его роста и конденсации, а также измерить время жизни. В частности, видно, что время жизни пузыря составляет  $\sim 0,5 \text{ мс}$ , а его максимальный диаметр (соответствует 240 мкс) достигает 3 мм для данных режимов. После достижения максимального размера пузыря в момент времени  $t = 240 \text{ мкс}$  начинается стадия его конденсации, продолжающаяся до момента полного схлопывания. После коллапса первого пузыря на поверхности сапфира некоторое время наблюдается периодическое формирование и конденсация крупных паровых образований меньшего размера, после чего формируется квазистационарный режим микропузырькового кипения недогретой жидкости.

С использованием полученных видеоданных был проведен анализ влияния плотности теплового потока и степени недогрева на динамику паровых пузырей (рис. 2). Результаты показали, что с увеличением подводимой мощности (скорости нагрева) происходит заметное уменьшение максимального диаметра парового пузыря и времени его жизни. Увеличение степени недогрева жидкости в исследованном диапазоне приводит лишь к незначительному уменьшению максимального размера паровых пузырей. При этом изменение ключевых параметров ( $q, \Delta T_{\text{нед}}$ ) практически не влияет на скорость роста паровых пузырей на начальной инерционной стадии роста, которая достигает 22,5 м/с.

Также на основе видеоданных были измерены времена ожидания вскипания для различных тепловых потоков и начальных температур жидкости (рис. 3а). Анализ результатов показал, что время ожидания вскипания заметно снижается с увеличением плотности теплового потока и в диапазоне  $q > 15 \text{ МВт/м}^2$  слабо зависит от начальной температуры жидкости. В то же время в области тепловых потоков до  $12 \text{ МВт/м}^2$  наблюдается сильная зависимость времени вскипания от степени недогрева. Более того, при малых скоростях нагрева ( $q < 12 \text{ МВт/м}^2$ ) продолжительность стадии однофазного теплообмена значительно возрастает (более 300 мс), что связано с развитием конвекции в данном временном интервале. Формирование конвективных токов в рассматриваемых условиях приводит к увеличению теплоотдачи, уменьшению скорости роста температуры поверхности и соответствующему увеличению времени вскипания жидкости.

Для определения температур вскипания проведены расчеты эволюции температуры поверхности при различных значениях мощности тепловыделения в импульсе и начальной температуры жидкости с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics (рис. 3б). Точками на рис. 3б обозначены экспериментальные данные по временам вскипания жидкости для соответствующих расчетных кривых. Как показало сопоставление экспериментальных данных и расчетных зависимостей, для исследованных в работе режимов температура вскипания незначительно увеличивается с ростом скорости нагрева

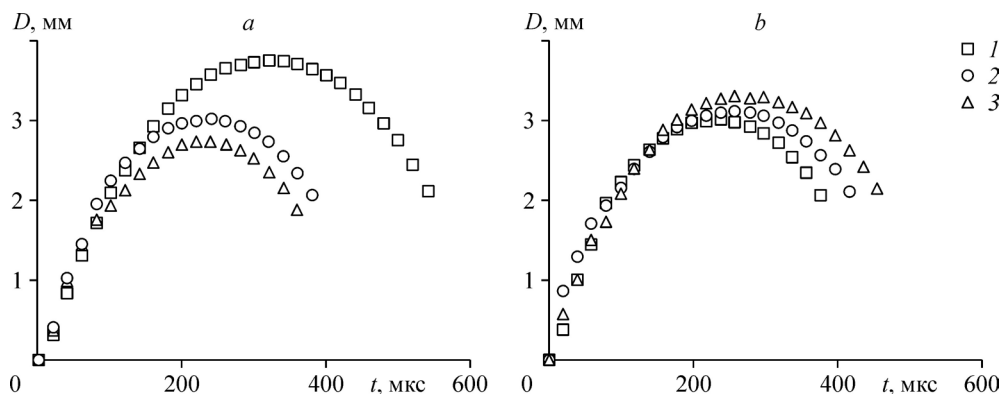


Рис. 2. Влияние плотности теплового потока (а) и степени недогрева жидкости (б) на динамику паровых пузырей в условиях импульсного нагрева.

а:  $\Delta T_{\text{нед}} = 75 \text{ K}$ ,  $q = 15,6$  (1), 22,8 (2), 33,8 (3)  $\text{МВт/м}^2$ ; б:  $q = 22,8 \text{ МВт/м}^2$ ,  $\Delta T_{\text{нед}} = 75$  (1), 63 (2), 50 (3)  $\text{K}$ .

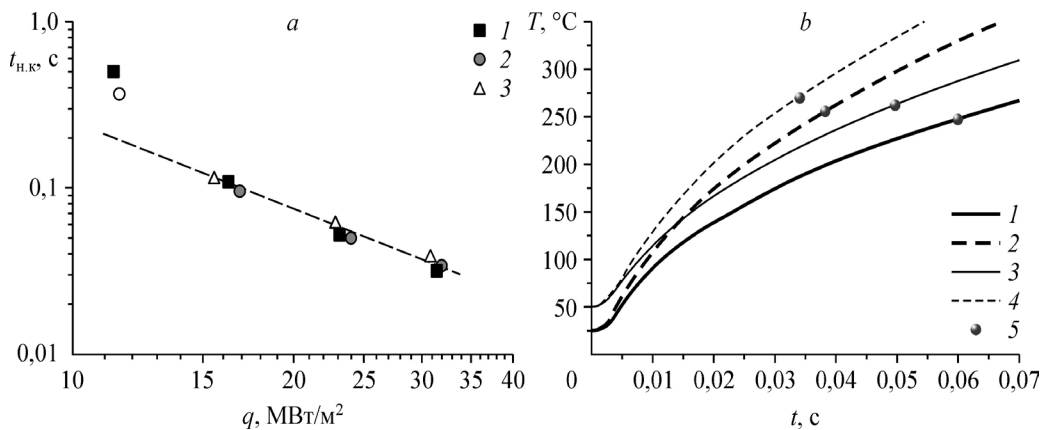


Рис. 3. Времена ожидания вскипания (а) и расчет эволюции температуры поверхности с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics (б) при импульсном тепловыделении.

а:  $\Delta T_{нед} = 50$  (1), 63 (2), 75 (3) К; б:  $\Delta T_{нед} = 75$  (1, 2), 50 (3, 4) К

и  $q = 22,8$  (1), 30,8 (2), 24 (3), 32 (4) MW/m<sup>2</sup>, опытные данные  $t_{н.к}$  (5).

и изменяется в диапазоне  $T_{н.к} = 245\text{--}271$  °С. Также можно отметить, что для минимальной степени недогрева ( $\Delta T_{нед} = 50$  К) температура вскипания воды на 5–10 градусов выше по сравнению с условиями с более низкой начальной температурой жидкости  $T_0$ . Сравнение показывает, что полученные расчетные величины температуры вскипания заметно меньше температуры, соответствующей спиноподобному распаду воды ( $T_{сп} \sim 330$  °С), а также несколько меньше величин температуры взрывного вскипания, наблюдаемых в экспериментах [2] при импульсном тепловыделении на микронагревателе, разработанном для технологий струйной печати. Некоторое расхождение между данными, полученными в настоящей работе, и данными работы [2] связано с тем, что в проведенных авторами экспериментах максимальная скорость нагрева ( $dT/dt$ ) значительно меньше, чем в экспериментальных исследованиях [2].

Результаты показали, что плотность теплового потока в исследованном диапазоне оказывает существенное влияние на эволюцию пузырей и время ожидания вскипания. С использованием численных расчетов определены температуры вскипания. Полученный массив опытных данных планируется в дальнейшем использовать для проведения сравнительного анализа с результатами опытов при лазеро-индуцированном нагреве биологических жидкостей.

### Список литературы

1. Варламов Ю.Д., Мещеряков Ю.П., Предтеченский М.Р., Лежнин С.И., Ульянов С.Н. Особенности взрывного вскипания жидкостей на пленочном микронагревателе // Прикл. механика и техн. физика. 2007. Т. 48, № 2. С. 81–89.
2. Kuznetsov V.V., Kozulin I.A. Explosive vaporization of a water layer on a flat microheater // J. Engng Thermophysics. 2010. Vol. 19, No. 2. P. 102–109.
3. Levin A.A., Khan P.V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2018. Vol. 124. P. 876–883.
4. Чудновский В.М., Майор А.Ю., Юсупов В.И., Жуков С.А. Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей // Теплофиз. высоких температур. 2019. Т. 57, № 4. С. 578–587.
5. Chudnovskii V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P. 119286-1–119286-6.
6. Surtaev A., Serdyukov V., Zhou J., Pavlenko A., Tumanov V. An experimental study of vapor bubbles dynamics at water and ethanol pool boiling at low and high heat fluxes // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2018. Vol. 126. P. 297–311.

Статья поступила в редакцию 24 марта 2020 г.,  
после доработки — 24 марта 2020 г.,  
принята к публикации 28 апреля 2020 г.