

Экспериментальное исследование эволюции паровых пузырей при кипении недогретой воды в канале

Н. В. Васильев^{1,2}, С. Н. Вавилов¹, И. А. Новиков^{1,2}, П. С. Иванов² и
М. И. Гаспирович^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва 105005, Россия

E-mail: nikvikvas@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2026 г.

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования динамики паровых пузырей при кипении недогретой воды в малоизученной области параметров — при высокой плотности теплового потока $q = 1.9 \text{ МВт/м}^2$ и величине недогрева до температуры насыщения — 27°C . В результате статистической обработки кадров скоростной видеосъемки получены средние максимальные размеры и времена жизни пузырей, их распределение по размерам. Получены данные по эволюции размеров и формы пузырей во времени. Произведено сравнение с данными при других значениях режимных параметров. Показано, что с уменьшением недогрева и увеличением плотности теплового потока увеличиваются максимальные размеры пузырей и время их существования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кипение недогретой до температуры насыщения жидкости представляет собой процесс, обеспечивающий отвод экстремально высоких плотностей тепловых потоков (q) в различных системах охлаждения современной техники и оборудования [1, 2]. Например, в ракетных соплах, пучковых мишенях термоядерных реакторов, импульсных МГД-установках, современной электронной технике и др. При этом проектирование подобных систем охлаждения основано на чисто эмпирических корреляциях. Развитие теории и методов математического описания процесса сдерживается ограниченной экспериментальной базой данных, в частности по характеристикам паровых пузырей, таким как максимальные размеры, время жизни, эволюция формы и размеров и т.д. На сегодня для кипения недогретой воды имеется набор данных по статистическим характеристикам паровых пузырей [3–7] (в основном в области давлений, близких к атмосферному). Однако подавляющая часть данных получена для области низких плотностей тепловых потоков ($q < 1 \text{ МВт/м}^2$).

В качестве основного экспериментального метода исследования характеристик паровых пузырей при кипении используется скоростная видеосъемка процесса. В случае насыщенной жидкости, когда пузыри после отрыва от греющей поверхности всплывают в объеме (в отличие от кипения недогретой жидкости), реализация данного метода представляет собой достаточно нетривиальный процесс. Например, в работах [8–11] был успешно применен оригинальный подход к визуализации через тонкий прозрачный нагреватель (толщиной до десятых долей мкм) на основе ИТО-пленки, позволяющий одновременно регистрировать динамику пузырей и температурное поле поверхности.

К тому же в большинстве работ исследования характеристик паровых пузырей проводились с использованием визуализации процесса кипения по нормали к поверхности нагрева. В то время как более детальную информацию об эволюции пузырей можно получить при видеосъемке в профиль. Так, при визуализа-

ции под прямым углом к поверхности нагрева возможно регистрировать только размер b (рисунок 1(а)), который при этом принимается за диаметр. В то время как паровой пузырь в процессе эволюции зачастую (особенно при невысоких давлениях, например, близких к атмосферному) имеет несферическую форму (рисунок 1(б)).

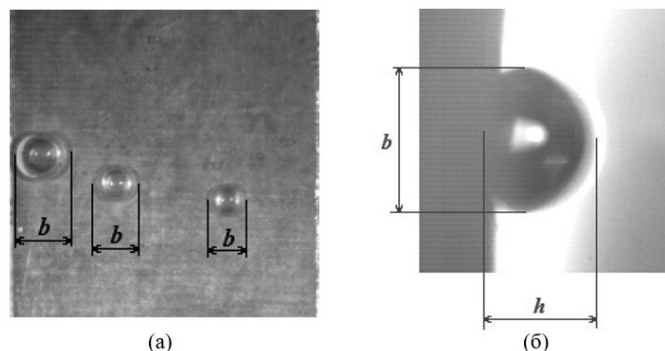


Рисунок 1. Кадры видеосъемки паровых пузырей при кипении недогретой воды: (а) — по нормали к греющей поверхности, размер кадра $3 \times 3 \text{ мм}$; (б) — параллельно греющей поверхности (в профиль), размер кадра $0.8 \times 0.8 \text{ мм}$. b — ширина; h — высота пузыря.

В настоящей работе проводилось исследование изменения размеров паровых пузырей во времени в малоизученной области параметров — при высокой плотности теплового потока $q = 1.9 \text{ МВт/м}^2$, величине недогрева до температуры насыщения $\Delta t_{\text{нед}} = 27^\circ\text{C}$ и массовой скорости воды $\rho w = 25 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ с использованием скоростной видеосъемки в профиль.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на экспериментальной установке, представляющей собой замкнутый циркуляционный контур, подробное описание которой представлено в [12]. Циркуляция воды в контуре установки

осуществлялась насосом ARGAL TMB 35. Расход теплоносителя измерялся расходомером типа Flow-X3 с точностью 0.5%. Для поддержания и изменения температуры жидкости в контуре использовались электрический подогреватель максимальной мощностью 1 кВт с регулируемым напряжением питания и охладитель в виде теплообменного аппарата “труба в трубе” с холодным теплоносителем — водопроводной водой. Температура воды на входе в участок и выходе из него измерялась термометрами сопротивления TCM-0979 с неопределенностью не более 0.5 °C.

Рабочий участок имел прямоугольное поперечное сечение шириной 21, высотой 5 и длиной 70 мм. Схема и фото основных элементов экспериментальной установки представлены на рисунке 2. По сравнению с [12] была произведена модификация установки — рабочий участок был расположен горизонтально для обеспечения возможности нагрева поверхности кипения с помощью теплового клина, по методике, описанной в [13]. Поверхность кипения представляла собой торец медного образца цилиндрической формы с диаметром 18 мм и высотой 20 мм (поз. 2 на рисунке 2), который для более надежного термического контакта крепился с помощью затвердевшего расплава олова к массивному медному нагревательному блоку (поз. 3 на рисунке 2), теплоизолированному кварцевой стеклотканью. Медный блок обогревался патронным нагревателем с максимальной мощностью 350 Вт, регулируемой с помощью лабораторного автотрансформатора. Для измерения q в образцы были заделаны три предварительно протарированные хромель-копелевые термопары с диаметром спая 0.2 мм (с точностью измерения 0.5 °C), расположенные на расстоянии 4 мм друг от друга на его оси. Верхняя термопара, с помощью показаний которой можно было рассчитать температуру поверхности кипения, располагалась на расстоянии 1 мм от нее.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная, дегазированная 4-х часовым кипячением вода при атмосферном давлении. Для визуализации процесса кипения использовалась скоростная видеосъемка с частотой кадров 2 кГц на камеру Видео-Спринт/С/G4 (поз. 5 на рисунке 2) через специальное окно из кварцевого стекла в рабочем участке. Разрешение кадров составляло 30 мкм на пиксель.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

По сравнению с нашей предшествующей работой по изучению эволюции одиночных паровых пузырей [7] исследования проводились при низких степенях $\Delta t_{нед}$, вследствие чего ожидалось получение пузырей больших размеров и времени жизни. Поэтому для первой серии экспериментов была выбрана относительно низкая скорость видеосъемки (2 кГц или 500 мкс между кадрами). Такая скорость съемки позволяла получать данные о максимальных размерах и времени жизни пузырей, а также первичную информацию об эволюции размеров и формы.

После получения видеосъемок в результате проведения эксперимента производилась их покадровая статистическая обработка. Была произведена обработка 70-ти пузырей. Одной из основных характеристик паровых пузырей является их максимальный диаметр.

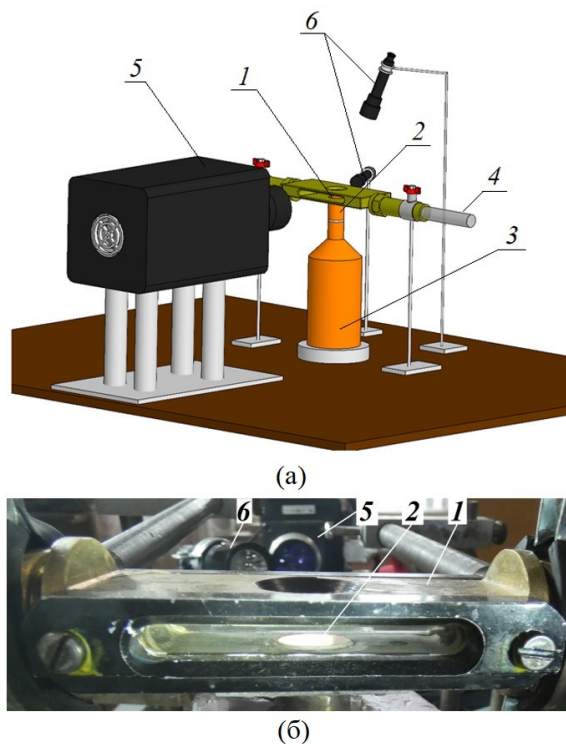


Рисунок 2. Рабочий участок и основные элементы экспериментальной установки, (а) — схема, (б) — фото: 1 — рабочий участок с окнами из кварцевого стекла; 2 — медный цилиндрический образец; 3 — медный нагревательный блок (теплоизоляция не показана); 4 — элемент циркуляционного контура; 5 — скоростная видеокамера; 6 — фонари подсветки.

На рисунке 3 представлено полученное распределение максимальных средних диаметров ($d_{ср\ max}$) по размерам. Средний диаметр пузыря на каждом кадре рассчитывался по формуле:

$$d_{ср} = \sqrt[3]{b^2 \cdot h}, \quad (1)$$

где b — ширина, а h — высота пузыря (рисунок 1(б)).

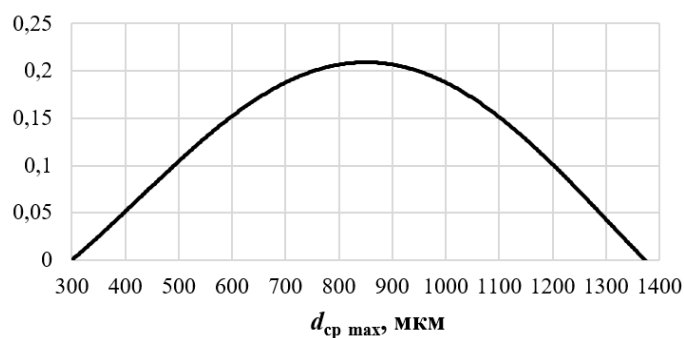


Рисунок 3. Распределение максимальных средних диаметров паровых пузырей по размерам при кипении недогретой воды: $p = 0.1$ МПа, $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{нед} = 27$ °C, $\rho_w = 25$ кг/(м³ с).

По рисунку 3 видно, что средний максимальный диаметр для исследованного режима составил $d_{ср\ max} \approx 850$ мкм. Виден разброс в максимальных диаметрах пузырей в диапазоне от 300 до 1370 мкм.

При анализе изменения размеров и формы паровых пузырей во времени за начало отсчета принимался момент, предшествующий появлению кадра с видимым пузырем. За окончание существования пузыря принималось время первого кадра, на котором отсутствовало его изображение. На рисунке 4 для наглядной качественной оценки разброса основных характеристик представлены графики изменения средних диаметров отдельных выбранных паровых пузырей примерных низкого, среднего и высокого максимального диаметра. Среднее время жизни пузырей ($\tau_{ж}$) составило от 2 до 2.5 мс. Время жизни мелких пузырей с $d_{ср\ max} < 600$ мкм составляло $\tau_{ж} \approx 2$ мс, а более крупных с $d_{ср\ max} > 600$ мкм — в 2.5 мс, иногда доходя до 3 мс.

На рисунках 5 и 6 соответственно представлены кадры видеосъемки и график изменения размеров во времени парового пузыря среднего максимального размера ($d_{ср\ max} \approx 850$ мкм). Масштаб кадров составлял 30 мкм в 1 пикселе, что составляет 3.5% от максимального диаметра (850 мкм) пузыря среднего размера выборки. Качественно поведение пузыря было похоже на случай с более высокими $\Delta t_{нед}$ [7]. Вплоть до отрыва от греющей поверхности (рисунок 5(г)) он имел несферическую форму. Все наблюдавшиеся паровые пузыри коллапсировали (схлопывались) сразу после отрыва непосредственно у поверхности нагрева. После полной конденсации (схлопывания), несмотря на предварительную деаэрацию воды, также оставался воздушный пузырь с размерами в несколько десятков мкм (рисунок 5(д)).

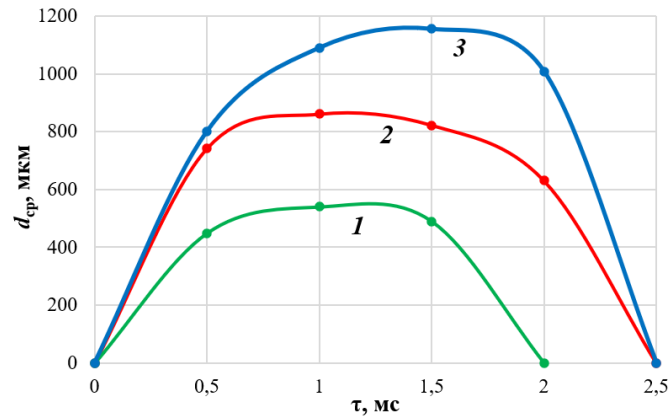


Рисунок 4. Изменение среднего диаметра паровых пузырей при кипении недогретой воды: $p = 0.1$ МПа, $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{нед} = 27$ °С, $\rho_w = 25$ кг/(м²с): 1 — пузырь с $d_{ср\ max} = 570$ мкм; 2 — пузырь с $d_{ср\ max} = 850$ мкм; 3 — пузырь с $d_{ср\ max} = 1180$ мкм.

Количественно максимальный диаметр среднего пузыря превосходил на 40–50% таковые для случаев $\Delta t_{нед} = 42$ °С и 59 °С (рисунок 7), а время его жизни увеличилось примерно в 3 и 4.5 раза соответственно. При этом время жизни даже мелких пузырей (график 3 на рисунке 7) с $d_{ср\ max}$, близкими к случаям $\Delta t_{нед} = 42$ °С и 59 °С (графики 2 и 1 на рисунке 7 соответственно), также в несколько раз было выше. Данный эффект обусловлен совместным действием двух факторов: уменьшением недогрева и ростом плотности теплового потока (от $q = 1.4$ МВт/м² до 1.9 МВт/м²). Однако, по всей видимости, доминирующее влияние оказы-

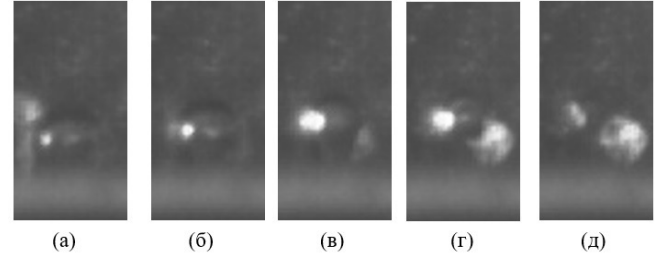


Рисунок 5. Кадры видеосъемки эволюции парового пузыря при кипении недогретой воды: $p = 0.1$ МПа, $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{нед} = 27$ °С, $\rho_w = 25$ кг/(м²с). Период между кадрами — 0.5 мс. На кадрах (г) и (д) в правом нижнем углу видно изображение еще одного пузыря не в фокусе съемки.

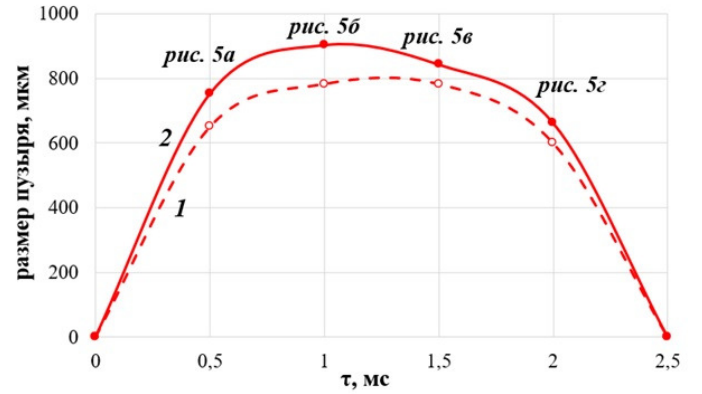


Рисунок 6. График изменения размеров парового пузыря во времени с $d_{ср\ max} \approx 850$ мкм при $p = 0.1$ МПа, $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{нед} = 27$ °С, $\rho_w = 25$ кг/(м²с): 1 — размер h , 2 — размер b .

вает уменьшение интенсивности отвода тепла конденсации от пузыря в толщу холодной жидкости нестационарной теплопроводностью при увеличении ее температуры (уменьшении $\Delta t_{нед}$) [14]. Незначительная величина массовой скорости потока не должна оказывать существенного влияния.

Недогрев жидкости до температуры насыщения может иметь различную степень влияния на разных стадиях жизни пузыря [15]. На стадии индукции (локального нагрева жидкости до момента зарождения пузыря) его уменьшение, по всей видимости, должно приводить к сокращению времени ожидания (между схлопыванием предыдущего и появлением следующего пузыря). В то же время уменьшение недогрева способствует продлению стадии роста и замедлению стадии схлопывания ввиду ослабления интенсивности конденсации, обусловленной температурным напором между паром в пузыре и жидкостью в объеме. В совокупности уменьшение недогрева на этих двух стадиях, по всей видимости, обуславливает увеличение времени жизни и размеров пузырей, что наблюдалось в экспериментах (рисунок 7).

В то же время низкая скорость видеосъемки (2 кГц) не позволяла получать подробных данных о важном этапе роста пузырей по сравнению с работой [7], в которой съемка производилась с частотой кадров 50 кГц. Среднее время роста для случаев $\Delta t_{нед} = 59$ °С и 42 °С составляло примерно 120–180 мкс соответственно,

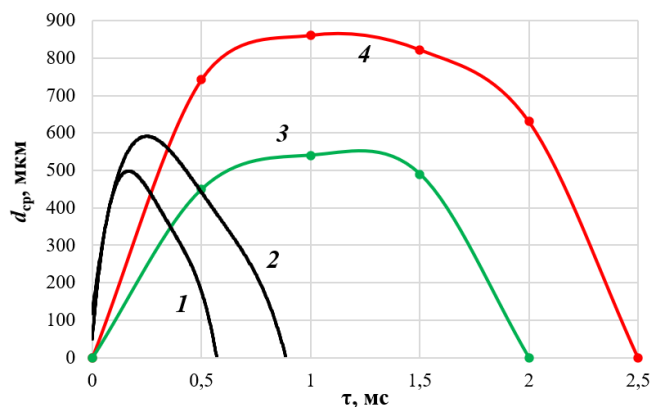


Рисунок 7. Изменение среднего диаметра паровых пузырей при кипении недогретой воды при $p = 0.1$ МПа: 1 — $q = 1.4$ МВт/м², $\Delta t_{\text{нед}} = 59$ °С; 2 — $q = 1.4$ МВт/м², $\Delta t_{\text{нед}} = 42$ °С; 3 — $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{\text{нед}} = 27$ °С пузырь с $d_{\text{ср max}} = 570$ мкм; 4 — $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{\text{нед}} = 27$ °С пузырь с $d_{\text{ср max}} = 850$ мкм. 1, 2 — данные из [7]; 3, 4 — данные, полученные в настоящей работе.

а скорость увеличения размеров пузырей доходила до 4–5 м/с. Это связано с чрезвычайно быстрым испарением перегретого выше температуры насыщения микрослоя жидкости под пузырем на начальном этапе его жизни. По всей видимости, близкие скорости роста пузырей на начальном этапе должны иметь место и для случая менее высокого недогрева. Однако для проверки данной гипотезы требуется более высокая скорость видеосъемки процесса, что планируется реализовать на следующих этапах работы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате выполненного экспериментального исследования кипения недогретой воды в канале при $p = 0.1$ МПа, $q = 1.9$ МВт/м², $\Delta t_{\text{нед}} = 27$ °С получены новые данные об эволюции паровых пузырей с использованием скоростной видеосъемки в профиль. Установлено, что средний максимальный диаметр пузырей составляет примерно 850 мкм, а их время жизни лежит в диапазоне 2–2.5 мс, достигая 3 мс для наиболее крупных пузырей. Для пузырей наблюдалась визуально различимая несферичность.

Сравнение с результатами для более высоких недогревов ($\Delta t_{\text{нед}} = 42$ °С и 59 °С) показало, что уменьше-

ние $\Delta t_{\text{нед}}$ приводит к существенному увеличению средних максимальных размеров пузырей (на 40–50%) и времени их существования (в 3–4.5 раза). Данный эффект, по всей видимости, объясняется снижением интенсивности отвода тепла конденсации от пузыря в объем жидкости при повышении ее температуры. В то же время предложенное объяснение является качественным и требует дальнейшего экспериментального и теоретического изучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-26-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mudawar I and Bowers M 1999 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **42** 1405
2. Васильев Н В, Зейгарник Ю А и Ходаков К А 2022 *Теплоэнергетика* **5** 3–17
3. Васильев Н В, Зейгарник Ю А, Ходаков К А и Маслакова И В 2022 *Теплоэнергетика* **4** 3–21
4. Prodanovic V, Fraser D and Salcudean M 2002 *International Journal of Multiphase Flow* **28** 1–19
5. Situ R, Hibiki T, Ishii M and Mori M 2005 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **48** 5536–5548
6. Cao Y, Kawara Z, Yokomine T and Kunugi T 2016 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **93** 839–852
7. Vasiliev N V, Zeigarnik Y A and Khodakov K A 2018 *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC 2018* 963–970
8. Gerardi C, Buongiorno J, Hu L W and McKrell T 2010 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **53** 4185–4192
9. Jung S and Kim H 2014 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **73** 365–375
10. Surtaev A, Serdyukov V, Malakhov I and Safarov A 2021 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **169** 120911
11. Tecchio C et al 2024 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **231** 125860
12. Васильев Н В, Зейгарник Ю А, Ходаков К А и Маслакова И В 2019 *Теплоэнергетика* **5** 69–81
13. Васильев Н В, Леньков В А и Зейгарник Ю А 2024 *Письма в Журнал технической физики* **50** 34–36
14. Васильев Н В, Зейгарник Ю А и Вавилов С Н 2023 *Теплоэнергетика* **2** 90–94
15. Chernov A A, Pil'nik A A, Levin A A, Safarov A S, Adamova T P and Elistratov D S 2022 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **184** 122298