

Эволюция и характеристики одиночных пузырей при кипении жидкости, недогретой до температуры насыщения: итоги экспериментального исследования

Н. В. Васильев^{1,2}, Ю. А. Зейгарник¹, С. Н. Вавилов¹ и Е. А. Лиджиев^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, 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 3 октября 2023 г.

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование эволюции и характеристик одиночных пузырей, полученных с помощью локализованного лазерного нагрева поверхности, при кипении двух недогретых жидкостей, сильно отличающихся по свойствам: воды и хладагента R113. Для получения наиболее полной и детализированной информации использована методика синхронизированных высокоскоростных видеосъемок процесса в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с частотой кадров до 150 кГц и временем экспозиции до 1 мкс. Показаны принципиальные отличия в поведении одиночных паровых пузырей воды и хладагента R113, связанные с существенными различиями в приведенном давлении, разности плотностей жидкой и паровой фаз, теплопроводности, что усложняет развитие общего универсального феноменологического описания процесса кипения недогретой жидкости. <https://doi.org/10.33849/2023104>

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря возможности отвода предельно высоких плотностей теплового потока и высоким коэффициентам теплоотдачи кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения, рассматривается как эффективная технология охлаждения устройств и аппаратов, работающих в экстремальных тепловых условиях (ядерная энергетика, металлургия, силовая электроника и других областях) [1, 2].

Если говорить о физической стороне процесса, то по сравнению с кипением насыщенной жидкости (нагретой до температуры насыщения) кипение недогретой жидкости включает в себя существенно большее число физических явлений [3]. Соответственно, возрастает и число технических задач, которые приходится решать при конструировании и эксплуатации систем охлаждения. Действительно, если процесс развитого стационарного кипения насыщенной жидкости включает в себя стадию теплового роста паровых пузырей на постоянно функционирующих, одних и тех же центрах парообразования (нуклеации), и их отрыв в объеме кипящей жидкости, то при кипении недогретой жидкости каждый паровой пузырь возникает на новом месте (новом центре парообразования), проходит инерционную (рэлеевскую) стадию роста, отрывается в поток по завершении стадии теплового роста и конденсируется (схлопывается) в нем. Эволюция формы пузыря в процессе его развития зависит от приведенного давления $p_{пр} = p/p_{кр}$ (где p – рабочее, а $p_{кр}$ – критическое давление) и рода жидкости, ее теплофизических свойств. Эти же факторы существенно влияют на поведение пузырей в потоке после их отрыва от греющей поверхности и формирование паровых структур в каналах системы охлаждения, что зачастую оказывает определяющее влияние на принимаемые инженерные решения. Многие физические стороны явления становятся ясными уже при экспериментальных исследованиях кипения одиночных пузырей при варьировании рода жидкости и приведенного давления. Это предопределило тему проведенных исследований.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты были выполнены на установке, основные элементы которой представлены на рисунке 1. Она представляла собой замкнутый циркуляционный контур с рабочим участком прямоугольного поперечного сечения шириной 21 мм, высотой 5 мм и длиной 70 мм. Греющую поверхность для формирования одиночных пузырей образовывала пластина из нержавеющей стали марки 1X18H10T диаметром 13 мм и толщиной 0.1 мм, приклеенная к наружной стенке корпуса рабочего участка. Эта пластина обогревалась лазерным пучком, сфокусированным на площади диаметром 1–2 мм. Лазерный диод (JOLD-100-CPXF-2P) с максимальной выходной мощностью 100 Вт использовался как источник лазерного излучения. Мощность лазерного луча регулировалась током накачки в сочетании с диодной схемой питания. Для увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения на наружную поверхность греющей пластины был нанесен аэрозоль Graphit 33 с измеренной специальной тарировкой на длине волны излучения степенью черноты, которая составила 0.92. Более детальное описание установки можно почерпнуть из [4, 5].

Для получения наиболее полной и детальной информации относительно динамики и характеристик одиночных пузырей при кипении недогретой жидкости использовалась система синхронизированной видеосъемки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (вдоль и по нормали к греющей поверхности) (см. рисунок 2). Схема синхронизации была собрана на TTL-элементах и генераторе Г5-54 с регулируемой задержкой импульса. Использовались две высокоскоростные видеокамеры — Phantom VEO 410s и Photron Fastcam SA4. Применение камеры Phantom VEO 410s позволило увеличить скорость съемки до 150 кГц и уменьшить время экспозиции до 1 мкс (продолжительность полного цикла от момента зарождения до схлопывания парового пузыря составляет доли мс). Размер облученной поверхности и распределение температуры на ней определялись

с помощью тепловизора SDS hotfind-D. Пример такого распределения представлен на рисунке 3.

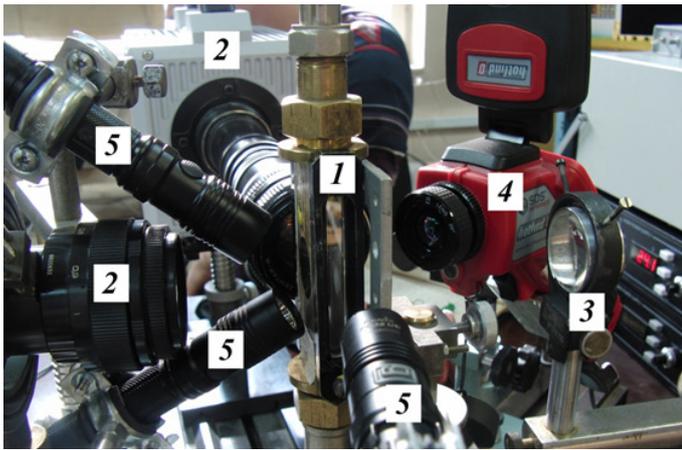
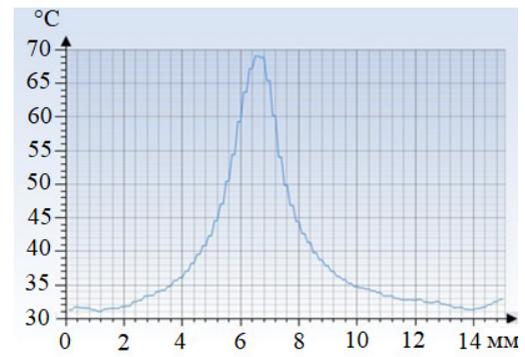
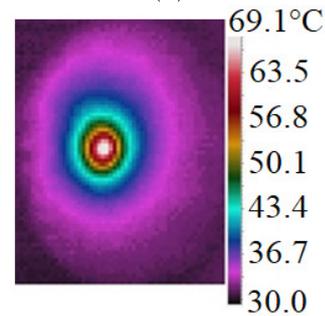


Рисунок 1. Основные элементы экспериментальной установки: 1 — рабочий участок; 2 — высокоскоростные видеокамеры; 3 — линза для фокусировки лазерного излучения; 4 — тепловизор; 5 — фонари подсветки.

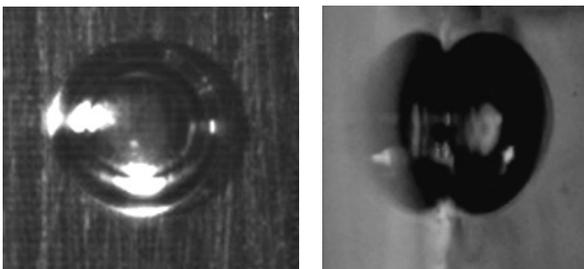


(a)



(б)

Рисунок 3. Распределение температуры на внешней поверхности греющей пластины при кипении недогретого хладона R113 ((a) — по диаметру). Размер кадра (б): 14 × 18 мм.



(a)

(б)

Рисунок 2. Кадры синхронизированных видеосъемок одиночного парового пузыря: Размер кадров: 1.8 × 1.8 мм. (a) — вид по нормали к греющей поверхности (в фас); (б) — вид параллельно греющей поверхности (в профиль).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В опытах использовалась дистиллированная деаэрированная вода и диэлектрический хладон R113. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и массовой скорости потока $\rho w = 0-300$ кг/(м²с). Недогревы жидкости до температуры насыщения $\Delta t_{\text{нед}}$ составляли 40–70 °C в опытах с водой и 20–40 °C в опытах с хладоном R113.

На рисунке 4 показаны типичные кадры эволюции во времени одиночного пузыря воды. Рисунок 5 иллюстрирует соответствующий процесс для хладона R113. На рисунке 6 и рисунке 7 представлены графики зависимостей диаметров пузырей пара от времени для воды и хладона R113 соответственно.

Анализ видеосъемок позволил выделить следующие характерные черты циклического процесса для пузыря водяного пара. Он начинается с взрывного вскипания воды. Возникший пузырь имеет близкую к полусферической форму (рисунок 4(б)). Эта стадия длится 100–150 мкс. Затем пузырь медленно дорастает до максимальных размеров в 600–1000 мкм (рисунок 4(в)).

В последующем размеры пузыря уменьшаются вплоть до его схлопывания. Взрывной характер возникновения пузыря вызывает появление в его основании клинообразного микрослоя воды. Эта зона так называемой “тройной линии” (линия контакта воды, пара и твердого тела) служит областью максимального отвода тепла от греющей поверхности в процессе кипения недогретой жидкости. В ходе эволюции пузыря размер микрослоя уменьшается, а сам он приобретает очертания, типичные для сидящего на стенке сферического пузырька. Достигнув диаметра, равного примерно 0.6–0.7 от максимального (рисунок 4(д)), паровой пузырь отрывается от центра парообразования и схлопывается в потоке холодной жидкости (рисунок 4(е)).

Картина эволюции пузыря хладона R113 заметно отличается (рисунок 5). Его форма более близка к сферической, а возникающий у основания микрослой жидкости имеет заметно большую толщину. Оторвавшись от центра парообразования, пузырь хладона продолжает существовать в потоке жидкости, его схлопывание происходит за пределами поля наблюдений.

Анализ показывает, что наблюдаемые отличия в поведении пузырей пара воды и хладона, по-видимому, связаны, прежде всего, с двумя обстоятельствами. Первое — почти на порядок величины более высокое значение приведенного давления хладона R113 при одинаковом рабочем давлении (одна атмосфера) и существенно меньшее (на порядок) различие плотностей жидкой и паровой фаз, вследствие чего имеет место более медленный рост пузыря и меньшее влияние инерции жидкости на его форму (пузырь слабее “приплюсчивается” к стенке). И второе — почти на порядок величины более

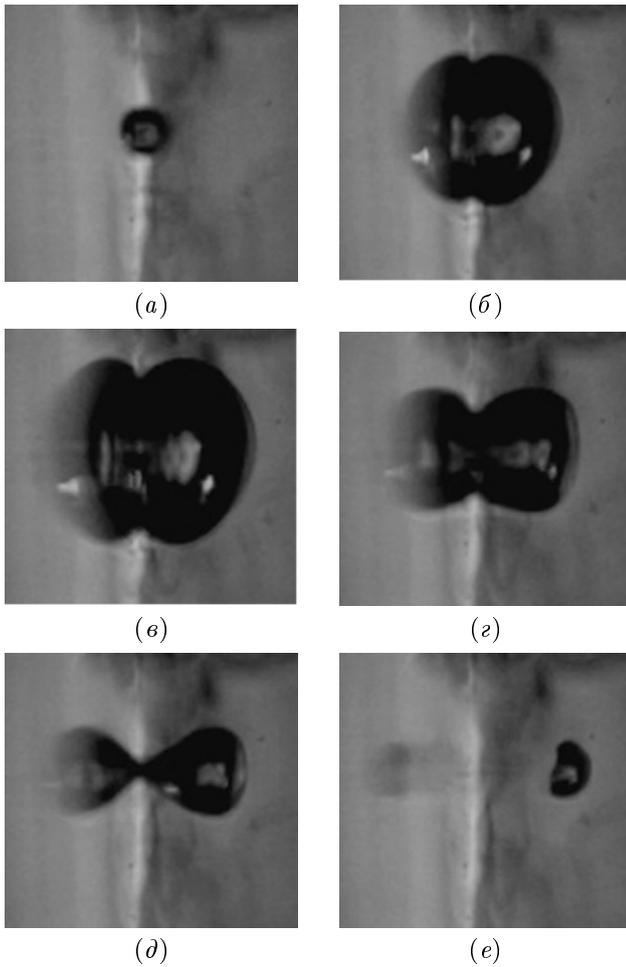


Рисунок 4. Эволюция пузыря водяного пара. Время от зарождения пузыря, мс: (а) – 0.02; (б) – 0.14; (в) – 0.40; (г) – 0.77; (д) – 0.97; (е) – 1.13. Время экспозиции – 6.7 мкс; $\Delta t_{нед} = 40\text{ }^\circ\text{C}$; плотность теплового потока $q = 1\text{ МВт/м}^2$; приведенное давление $p_{пр} = 4.5 \cdot 10^{-3}$. Размер кадров: $1.8 \times 1.8\text{ мм}$.

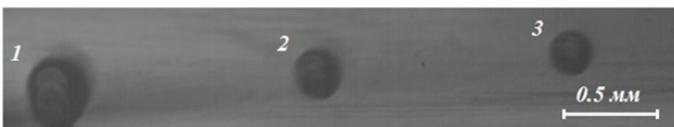


Рисунок 5. Пузыри пара хладона R113 на различных этапах жизни. Время от момента зарождения пузырей, мс: 1 – 10; 2 – 46.5; 3 – 82.5. Экспозиция – 0.5 мс; $\Delta t_{нед} = 21.5\text{ }^\circ\text{C}$; $\rho w = 300\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$; $q = 100\text{ кВт/м}^2$; приведенное давление $p_{пр} = 3 \cdot 10^{-2}$. Видеосъемка в профиль, движение жидкости слева направо.

низкая теплопроводность жидкости, снижающая интенсивность отвода теплоты от конденсирующегося пузыря R113. Это усложняет развитие феноменологической модели изучаемого процесса.

При этом важно еще раз отметить неполную конденсацию пузырей хладона R113 после отрыва от стенки (рисунок 5), как это наблюдалось в случае пузырей водяного пара, когда они поступали в ядро потока. Данное нежелательное явление может привести к накоплению в потоке паровой фазы и увеличению гидравлическо-

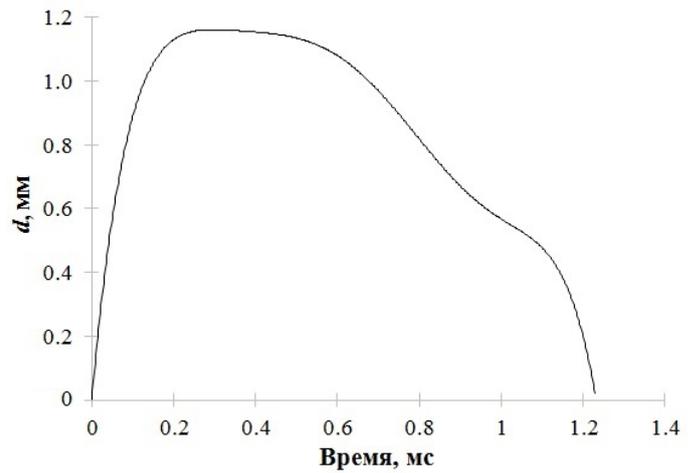


Рисунок 6. График зависимости диаметра пузыря водяного пара от времени: $\Delta t_{нед} = 40\text{ }^\circ\text{C}$; $q = 1\text{ МВт/м}^2$; $p_{пр} = 4.5 \cdot 10^{-3}$.

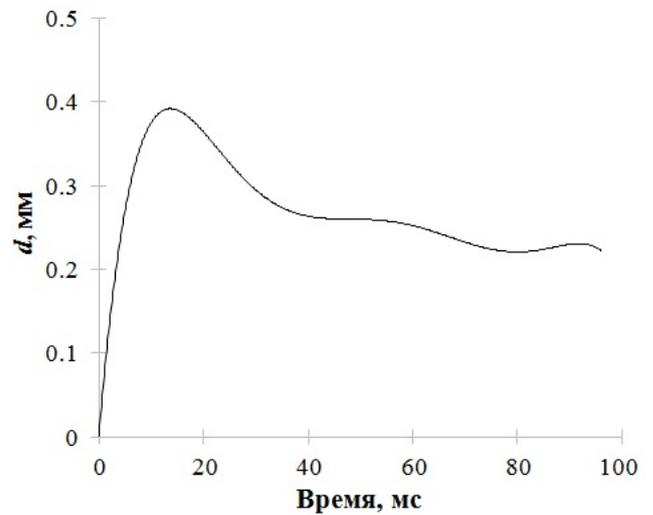


Рисунок 7. График зависимости диаметра пузыря пара хладона R113 от времени: $\Delta t_{нед} = 21.5\text{ }^\circ\text{C}$; $\rho w = 300\text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$; $q = 100\text{ кВт/м}^2$; $p_{пр} = 3 \cdot 10^{-2}$.

го сопротивления, что следует учитывать при проектировании систем охлаждения на основе кипения хладонов R113, а также близких к ним по теплофизическим свойствам диэлектрических жидкостей семейства Novac фирмы 3М [6, 7].

Также несомненно, что для построения достаточно обоснованной феноменологической модели экспериментальные исследования одиночных пузырей должны быть дополнены опытным изучением с привлечением современных инструментальных средств поведения ансамбля пузырей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием высокоскоростной видеосъемки получены данные по характеристикам одиночных пузырей при кипении недогретых до температуры насыщения воды и хладона R113 при атмосферном давлении. Показаны принципиальные отличия в поведении одиночных паровых пузырей этих двух жидкостей, связанные с существенными различиями в физических свой-

ствах. Для построения достаточно обоснованной феноменологической модели экспериментальные исследования одиночных пузырей должны быть дополнены опытным изучением с привлечением современных инструментальных средств поведения ансамбля пузырей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liang G and Mudawar I 2020 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **146** 118864
2. Lee J, O'Neill L E and Mudawar I 2020 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **161** 120262
3. Васильев Н В, Зейгарник Ю А и Ходаков К А 2022 *Теплоэнергетика* **4** 3–21
4. Васильев Н В, Зейгарник Ю А, Ходаков К А и Маслакова И В 2019 *Теплоэнергетика* **5** 69–81
5. Васильев Н В, Вараксин А Ю, Зейгарник Ю А, Ходаков К А и Эпельфельд А В 2017 *Теплофизика высоких температур* **55** 712–719
6. Васильев Н В, Зейгарник Ю А и Ходаков К А 2022 *Теплоэнергетика* **5** 3–17
7. Васильев А Ю, Зейгарник Ю А, Ходаков К А и Вавилов С Н 2021 *Теплофизика высоких температур* **59** 373–383