

УДК 536.248.2

## **Исследование особенностей динамики парообразования при кипении жидкости в области субатмосферных давлений\***

**В.С. Сердюков, И.П. Малахов, А.С. Суртаев**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет*

E-mail: vsserd@gmail.com

В статье представлены результаты экспериментального исследования особенностей динамики парообразования при кипении воды при субатмосферных давлениях до 8,8 кПа. Использование в работе прозрачного нагревателя и высокоскоростных видеосъемки и ИК-термографии позволило проанализировать влияние давления на динамику паровых пузырей, эволюцию сухих пятен, а также на температурный напор закипания. Показано, что уменьшение давления при заданной плотности теплового потока приводит к существенному увеличению числа Якоба в момент активации центра парообразования и скорости роста паровых пузырей. Обнаружено, что кривая скорости роста сухих пятен имеет нелинейную зависимость от давления в диапазоне 8,8–103 кПа. При этом минимальное значение скорости роста сухих пятен наблюдается при давлении 42 кПа.

**Ключевые слова:** кипение, субатмосферные давления, динамика парообразования, сухие пятна, высокоскоростная визуализация, ИК-термография.

Давление является ключевым режимным параметром, оказывающим комплексное влияние на процесс парообразования, интенсивность теплоотдачи и развитие кризисных явлений при кипении жидкости. В частности, при понижении давления изменяется плотность пара и поверхностное натяжение, что приводит к увеличению критического радиуса парового пузыря, увеличению числа Якоба, снижению интенсивности теплообмена и уменьшению критических тепловых потоков [1]. Изменение первых двух параметров приводит к значительному изменению локальных характеристик процесса кипения, таких как скорость роста, отрывной диаметр, частота отрыва пузырей и т.д. [2]. Режимы теплообмена при парообразовании в условиях субатмосферных давлений реализуются на практике, в частности в абсорбционных холодильных машинах. Таким образом, исследование особенностей кипения жидкости при пониженном давлении является не только актуальной фундаментальной, но и важной прикладной задачей.

---

\* Исследование выполнено в ИТ СО РАН при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-38-00086 и за счет средств, полученных от ФАНО России по Программе ФНИ ГАН на 2013–2020 годы (тема Ш.18.2.3, АААА-17-117030310025-3).

Известно, что испарение жидкого микрослоя в основании паровых пузырей существенно влияет на процесс роста пузырей и локальный теплообмен в области активного центра парообразования [3]. Современные экспериментальные методы, получившие развитие в последние два десятилетия, позволяют сегодня получать принципиально новую информацию о локальных нестационарных характеристиках процесса кипения, включая динамику микрослоя жидкости и эволюцию сухих пятен. Однако в настоящий момент в литературе отсутствуют исследования, посвященные изучению характеристик микрослоя жидкости и его эволюции при изменении давления. Цель настоящей работы заключается в проведении экспериментального исследования эволюции паровых пузырей, области микрослоя, а также динамики сухих пятен, ограниченных контактной линией, при кипении воды при субатмосферных давлениях.

Эксперименты проводились с использованием установки, подробное описание и схематический вид которой были представлены в работе [4]. Для проведения экспериментов по кипению жидкости при субатмосферных давлениях экспериментальный стенд был вакуумирован и снабжен дополнительными элементами: замкнутым конденсатором водяного пара, вакуумным насосом, вакуумметром и т.д. Опыты проводились при кипении воды в условиях насыщения в диапазоне изменения давлений от 8,8 до 103 кПа. В качестве нагревателя использовалась сапфировая подложка толщиной 3 мм с напыленным прозрачным тонкопленочным нагревателем из оксида индия-олова. Тепловыделение на нагревателе осуществлялось путем пропускания электрического тока, плотность теплового потока в экспериментах составила  $40 \pm 3 \text{ кВт/м}^2$ . Визуализация процесса кипения жидкости с нижней стороны нагревательной поверхности была проведена с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom v.7,0 с частотой съемки до 4 кГц и пространственным разрешением 38 мкм/пикс. Для определения локального перегрева поверхности в момент активации пузырей  $\Delta T$  и соответствующих чисел Якоба ( $Ja = C_p \Delta T \rho_{ж} / r \rho_n$ ) в работе использовался тепловизор Titanium HD 570M с частотой записи 1 кГц. Абсолютная погрешность измерения температуры с использованием данной камеры после проведения калибровочных экспериментов и с учетом перепада температур на стенке не превышала  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис. 1 представлены кадры высокоскоростной визуализации появления и роста парового пузыря при заданной плотности теплового потока и давлениях  $p_s = 7$  и 101 кПа. Как было отмечено в работах [4, 5], такой формат съемки позволяет проанализировать как зависимость размера паровых пузырей от времени  $R(t)$ , так и эволюцию сухих пятен

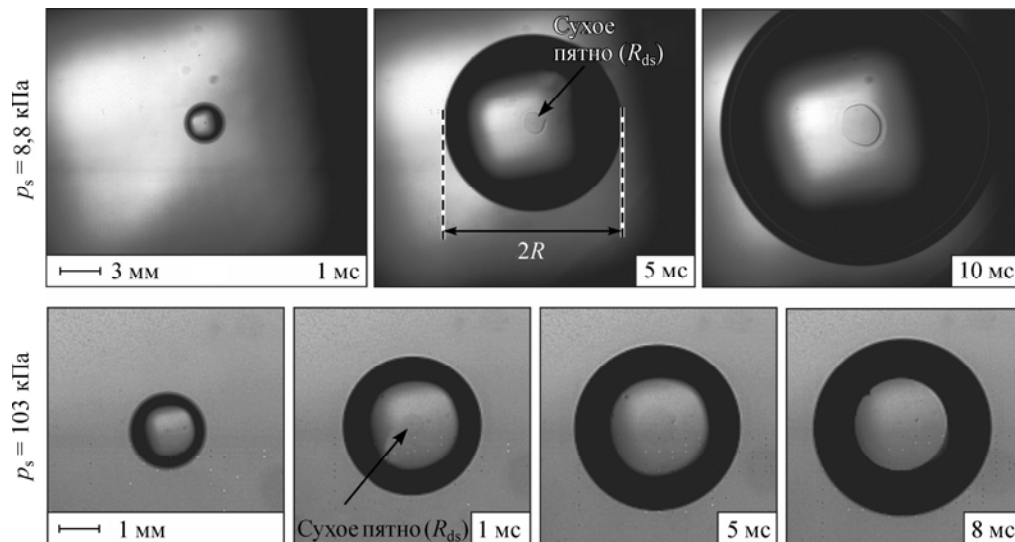
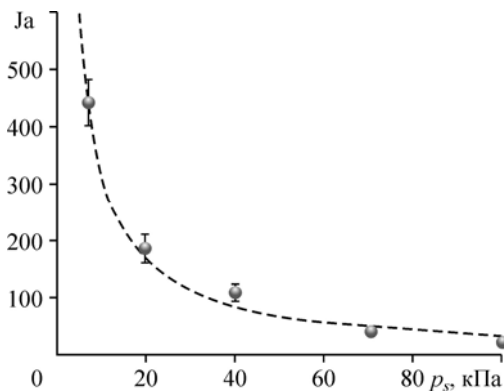
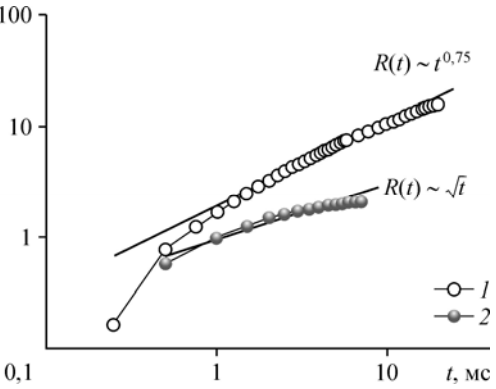


Рис. 1. Кадры высокоскоростной визуализации динамики одиночного парового пузыря при кипении воды при различных давлениях ( $q = 40 \text{ кВт/м}^2$ ).

Рис. 2. Кривые роста паровых пузырей при кипении воды при различных приведенных давлениях. 1 —  $p_s = 8,8$  кПа ( $Ja = 442$ ), 2 —  $p_s = 101$  кПа ( $Ja = 33$ ).

в основании пузырей  $R_{ds}(t)$ . С использованием полученных данных визуализации был проведен анализ эволюции диаметра паровых пузырей при различных давлениях. Измерения проводились для ансамбля из 10–20 паровых пузырей. На рис. 2 представлены характерные зависимости радиуса паровых пузырей от времени при кипении воды при давлениях  $p_s = 8,8$  и 103 кПа. Видно, что при понижении давления скорость роста паровых пузырей значительно увеличивается. Это связано с существенным увеличением числа Якоба при понижении давления (рис. 3). Характер зависимостей  $R(t)$  при этом для различных приведенных давлений существенно отличается. Для случая кипения при атмосферном давлении экспериментальные данные по скорости роста парового пузыря практически на всей стадии роста описываются зависимостью вида  $R(t) \sim t^{0,5}$ . При давлении  $p_s = 8,8$  кПа, как видно из рис. 2, наблюдаются два различных участка кривых роста пузыря. На продолжительной стадии роста пузыря данные могут быть аппроксимированы зависимостью вида  $R(t) \sim t^{0,75}$ , при этом также имеется начальный участок кривой до 2 мс, для которого показатель степени при  $t$  заметно больше.

Для объяснения наблюдаемого различия в характере эволюции паровых пузырей при изменении давления представляется удобным рассмотреть различные предельные схемы роста парового пузыря, предложенные в монографии [6]. Согласно этому подходу в случае кипения воды при атмосферном давлении реализуется так называемая тепловая энергетическая схема роста, для которой рост парового пузыря определяется скоростью подвода тепла к межфазной поверхности. Предлагаемые разными авторами теоретические решения задачи о скорости роста пузыря рассматривались в [6], они дают соотношение общего вида:  $R(t) \sim t^{0,5}$ , что согласуется с результатами настоящей работы. В случае достаточно низких давлений и, соответственно, высоких значений чисел Якоба ( $Ja > 200$ ), существенную роль начинают играть инерционные эффекты. Скорость роста пузыря при этом лимитируется силой инерции окружающей жидкости. Особенно явно динамическая инерционная схема проявляется на начальной, так называемой рэлеевской, стадии роста пузыря (см. рис. 2), когда перепад давлений внутри пузыря и в окружающей жидкости максимален. С увеличением объема пузыря в процессе роста  $\Delta p$  убывает, что приводит к уменьшению показателя степени  $n$  в зависимости  $R(t) \sim t^n$  до значений  $0,5 < n < 1$  [6].



Стоит отметить, что для детального анализа эволюции пузыря на начальной стадии кипения при субатмосферных давлениях необходимо проведение дальнейших опытов с использованием видеосъемки с более высокой частотой записи.

В исследовании также получены новые опытные данные по скорости роста сухих пятен под паровыми пузырями при кипении воды в широком диапазоне

Рис. 3. Зависимость числа Якоба от давления.

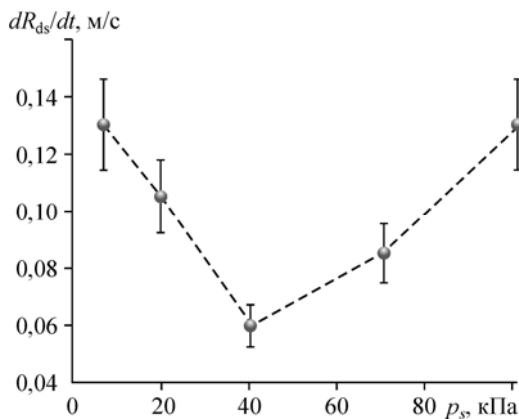


Рис. 4. Зависимость скорости роста сухого пятна от давления при кипении воды.

изменения давления. Анализ данных показал, что радиус контактной линии для всех измеренных давлений растет со временем линейно, что говорит о том, что скорость роста сухих пятен постоянна. Этот результат противоречит теоретическим выкладкам, представленным в работе [7], в которой зависимость  $R_{ds}(t)$  имеет вид  $R_{ds}(t) \sim t^{0,5}$  и рассчитывается на основе соотношения Купера–Ллойда для толщины микрослоя [8] и предположения, что скорость испарения микрослоя жидкости определяется тепловым потоком, передаваемым за счет теплопроводности через жидкий микрослой. На рис. 4 представлена зависимость скорости роста сухих пятен ( $dR_{ds}/dt$ ) от давления  $p_s$  для заданного теплового потока. Из графика видно, что кривая зависимости роста сухих пятен от давления имеет нелинейный вид с явно выраженным минимумом величины скорости при  $p_s = 42$  кПа. Таким образом, увеличение скорости роста сухих пятен наблюдается как при уменьшении давления в диапазоне 8,8–42 кПа, так и при его повышении в диапазоне 42–103 кПа. Для описания полученной зависимости требуется проведение дальнейшего теоретического анализа с учетом одновременно изменения толщины микрослоя жидкости вследствие изменения вязкости и закона роста паровых пузырей при изменении давления, а также молекулярно-кинетических эффектов, связанных с интенсивным испарением жидкости с поверхности микрослоя [9].

### Список литературы

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
2. Мамонтова Н.Н. Кипение некоторых жидкостей при пониженных давлениях // Прикладная механика и техническая физика. 1966. № 3. С. 140–144.
3. Kim J. Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms // Int. J. Multiphase Flow. 2009. Vol. 35, No. 12. P. 1067–1076.
4. 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 // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 126. P. 297–311.
5. Суртаев А.С., Сердюков В.С. Исследование динамики контактной линии под паровым пузырем при кипении жидкости на поверхности прозрачного нагревателя // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1. С. 71–77.
6. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Издательский дом МЭИ, 2000. 386 с.
7. Zhao Y.H., Masuoka T., Tsuruta T. Unified theoretical prediction of fully developed nucleate boiling and critical heat flux based on a dynamic microlayer model // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2002. Vol. 45, No. 15. P. 3189–3197.
8. Cooper M.G., Lloyd A.J.P. The microlayer in nucleate pool boiling // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1969. Vol. 12, No. 8. P. 895–913.
9. Giustini G., Jung S., Kim H., Walker S.P. Evaporative thermal resistance and its influence on microscopic bubble growth // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 101. P. 733–741.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2019 г.,  
после доработки — 19 апреля 2019 г.,  
принята к публикации 26 апреля 2019 г.