

Экспериментальное исследование образования поверхности раздела фаз при кипении воды на цилиндрических поверхностях различного диаметра

Н.В. Кукшинов, А.А. Дмитриева, Л.И. Метелешко, Д.Н. Морской

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: kukshinov@bmstu.ru

Проведены экспериментальные исследования образования поверхности раздела фаз при кипении дистиллированной воды на цилиндрических поверхностях диаметрами 1 и 3 мм. В процессе эксперимента обеспечивался пузырьковый режим кипения, характеристики пузырей определялись с помощью высокоскоростной съемки методом PSV (Particle Shadow Velocimetry) с частотой до 8000 кадров в секунду. Получены статистические распределения размеров пузырей, определены зависимости среднего отрывного диаметра и скорости роста пузыря от тепловой нагрузки, проведена оценка влияния радиуса кривизны поверхности на характеристики кипения.

Ключевые слова: пузырьковое кипение, отрывной диаметр, скорость роста пузыря, высокоскоростная съемка, статистические распределения.

Введение

Исследования гидродинамики и теплообмена в парожидкостных средах ведутся давно и имеют несомненную практическую значимость. В работе многих энергетических установок и приборов фазовые превращения играют ключевую роль, например, в парогенераторах электростанций, ректификационных колоннах, пузырьковых камерах. В последнее время повышенный интерес к исследованию кипения наблюдается в сфере информационных технологий [1]. Это связано с тем, что использование низкокипящих диэлектрических жидкостей позволяет отводить от процессоров большие тепловые потоки, чем в случае воздушного или однофазного жидкостного охлаждения. Важными характеристиками процесса кипения являются отрывной диаметр, скорость роста паровых пузырей и частота их отрыва. Определение этих характеристик кипения возможно путем экспериментальных исследований с помощью высокоскоростной съемки.

Исследование кипения на одиночной цилиндрической поверхности является фундаментом для рассмотрения процессов кипения в более сложных геометрических конфигурациях и для многих практически важных задач. В пионерских экспериментальных работах [2, 3] были получены эмпирические зависимости для коэффициента теплоотдачи в случае пленочного режима кипения. Из более поздних исследований следует отметить

большую экспериментальную работу [4], где на цилиндрах разного диаметра изучалось кипение различных теплоносителей. В работе [5] в части пузырькового кипения был представлен анализ и обобщение большого количества экспериментальных данных по кипению на одиночных цилиндрах и в пучках труб воды, углеводородов и криогенных жидкостей, а также описана модель пузырькового кипения на цилиндре (модель Корнвелла–Хьюстона) и предложена обобщающая зависимость $Nu(Re, Pr)$.

В работе [6] было проведено исследование пузырькового кипения на платиновой проволоке в широком диапазоне плотностей тепловых потоков и показано, что отрывной диаметр и частота отрыва медленно увеличиваются с ростом плотности теплового потока.

В работе [7] рассматривалось кипение на цилиндрической поверхности перфторгексана (C_6F_{14}) — диэлектрической жидкости, которая может быть интересна для охлаждения электроники. Были получены зависимости отрывного диаметра и частоты отрыва пузырей от плотности теплового потока. Из недавних публикаций можно отметить работу [8], в которой проводилось экспериментальное исследование характеристик пузырькового режима кипения дистиллированной воды на пучке труб при его поперечном обтекании.

Развитие компьютерных технологий и численных методов позволило проводить математическое моделирование кипения, в частности, на цилиндрических поверхностях. Так, в работе [9] были получены результаты численного моделирования с применением метода объемной жидкости VOF (Volume of Fluid) и моделью фазового перехода Танасава [10] кипения воды на одиночной трубе и пучке труб. В работе [11] посредством численного моделирования исследовалось влияние диаметра цилиндрической поверхности и гравитации на характеристики кипения воды, было выполнено сравнение с экспериментальными данными и показано соответствие в пределах 10 %.

Таким образом, задача получения зависимостей для характеристик кипения различных теплоносителей на сегодня является актуальной. Современные оптические методы и компьютерные технологии позволяют получать и анализировать большие объемы данных, что важно для процесса кипения, учитывая нестационарность и неоднородность процесса. Для правильной интерпретации этих результатов необходимо применять методы математической статистики.

Целью настоящей работы является получение отрывных диаметров и скорости роста пузырей при кипении дистиллированной воды на цилиндрических поверхностях диаметрами 1 и 3 мм, а также оценка влияния радиуса кривизны поверхности на характеристики кипения с учетом оригинальной статистической обработки данных.

Экспериментальная установка и параметры исследования

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она включает в себя герметичную емкость, заполненную теплоносителем, в которой устанавливается экспериментальный объект. Экспериментальный объект представляет собой стальной цилиндр. По нему проходит электрический ток, подающийся через лабораторный автоматический трансформатор. Таким образом, могут быть обеспечены различные плотности тепловых потоков. Также в емкости находится дополнительный нагреватель, отделенный экраном от экспериментального объекта, использующийся для поддержания температуры насыщения на протяжении всего эксперимента. Контроль за температурой воды осуществляется с помощью термопары. Кипение происходит на поверхности цилиндра,

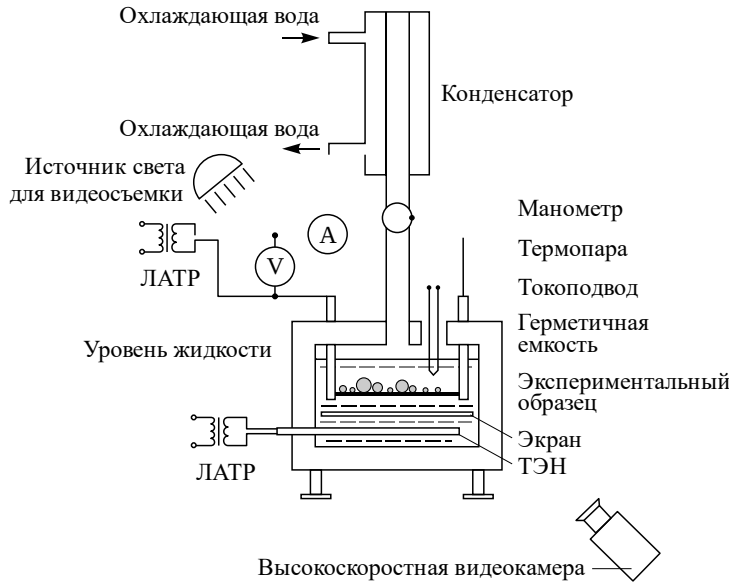


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

далее паровая фаза попадает в проточный тракт конденсатора, откуда в виде жидкости поступает обратно в емкость. На внешней поверхности цилиндра располагаются две термопары, по среднему показанию которых определяется температура стенки.

Определение размеров пузырей осуществлялось с помощью теневого метода PSV (Particle Shadow Velocimetry). Метод основан на получении изображений высокого разрешения с фоновой подсветкой. Свет от источника излучения попадает напрямую в объектив камеры, и изображения получают путем отбрасывания тени пузырями на ярком фоне. В данной серии экспериментов использовалась высокоскоростная камера, позволяющая выполнять съемку изображений со скоростью до 8000 к/с, а также LED-осветитель, работающий в постоянном режиме.

Предварительно была выполнена процедура масштабирования изображений, необходимая для определения соотношения между реальными размерами пузырей и пикселями на изображении. В результате рассчитывались масштабировующие коэффициенты для каждой оптической схемы экспериментов, выраженные отношением мкм/пиксель. Затем проводилась бинаризация полученных изображений и определение размеров частиц с помощью порогового алгоритма.

Для каждого режима тепловой нагрузки проводилась съемка двух наборов данных. Съемка первого набора выполнялась на низкой скорости работы камеры (5 к/с) с целью накопления большой выборки пузырей и определения статистически верного размера пузыря. Второй набор регистрировался при высокой скорости съемки (8000 к/с) для того, чтобы оценить скорость роста пузыря на поверхности с высоким временным разрешением.

Исследования характеристик поверхностей раздела фаз при кипении воды на одиночном цилиндре диаметром 3 мм были выполнены для диапазона температурных напоров $\Delta T = 7 - 12$ К, что соответствует плотностям теплового потока $q = 30 - 160$ кВт/м². Для диаметра цилиндра 1 мм диапазон температурных напоров составлял $\Delta T = 7,5 - 16$ К, что соответствует плотностям теплового потока $q = 30 - 330$ кВт/м². Выбор нижней

границы диапазона обусловлен необходимостью наличия достаточного количества пузырей для статистической обработки, выбор верхней границы обусловлен началом коалесценции пузырей при превышении указанных значений.

Результаты экспериментов и их анализ

Полученные экспериментально отрывные диаметры пузыря сравнивались с определяемыми по формуле, предложенной в [11]:

$$d_0 = a_1 \cdot \sqrt{1 + b \cdot K}, \quad (1)$$

где d_0 — безразмерное значение отрывного диаметра пузыря, a_1 и b — коэффициенты, значения которых определялись на основании опытных данных (по [11] $a_1 = 0,25$, $b = 10^5$), K — критерий подобия, который может быть выражен следующим соотношением:

$$K = (Ja/Pr)^2 / Ar, \quad (2)$$

где $Ja = \frac{c_p \cdot \Delta T}{r} \frac{\rho'}{\rho''}$ — число Якоба (c_p — удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)], $\Delta T = t_{ст} - t_n$ — температурный напор [К], $t_{ст}$ — температура поверхности [К], t_n — температура насыщения [К], r — удельная теплота парообразования [Дж/кг], ρ' — плотность жидкости в состоянии насыщения [кг/м³], ρ'' — плотность пара в состоянии насыщения [кг/м³], $Pr = (\mu \cdot c_p) / \lambda$ — число Прандтля (μ — коэффициент динамической вязкости [Па·с], λ — теплопроводность [Вт/(м·К)]); $Ar = (g/\nu^2) [\sigma/(g\rho')]^{3/2}$ — число Архимеда [11] (g — ускорение свободного падения [м/с²], ν — кинематическая вязкость жидкой фазы [м²/с], σ — коэффициент поверхностного натяжения [Н/м]).

Безразмерный диаметр связан с отрывным диаметром соотношением $d = d_0 \cdot \sqrt{\sigma/(g \cdot \rho')}$.

Теоретическая зависимость для скорости роста пузыря, предложенная в [12], имеет вид:

$$R = \sqrt{a \cdot \tau} \cdot \left[\gamma \cdot Ja + \sqrt{\gamma^2 \cdot Ja^2 + 2\beta \cdot Ja} \right], \quad (3)$$

где R — радиус пузыря [м], $a = \lambda/(\rho \cdot c_p)$ — температуропроводность жидкости [м²/с], τ — время [с], γ — эмпирический коэффициент, учитывающий изменение краевого угла, β — эмпирический коэффициент, зависящий от геометрии пузыря и свойств жидкости. В работе [12] для кипения воды было рекомендовано принимать значения $\gamma = 0,3$, $\beta = 6$.

Как видно из зависимостей (1)–(3), определяющим критерием является число Якоба, которое, в свою очередь, зависит от температурного напора, поэтому все приведенные ниже экспериментальные результаты представлены как зависимости от температурного напора ΔT .

На рис. 2 приведен кадр высокоскоростной съемки кипения воды на цилиндрической поверхности диаметром $d_c = 3$ мм при температурном напоре $\Delta T = 9,3$ К. Для получения статистически верного отрывного диаметра были определены размеры более 20000 тысяч отдельных пузырей для каждого исследуемого режима. На рис. 3 представлено нормализованное статистическое распределение для того же режима тепловой нагрузки $\Delta T = 9,3$ К. Необходимо отметить, что при увеличении температурного напора максимум распределения смещается вправо (происходит увеличение среднего

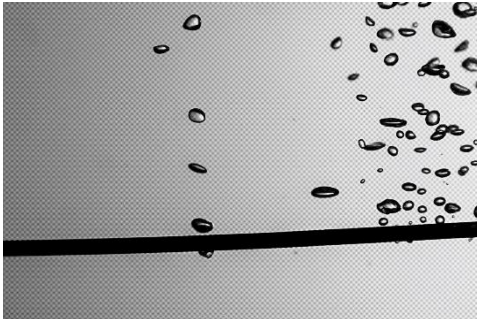


Рис. 2. Кадр высокоскоростной съемки для $d_c = 3$ мм при $\Delta T = 9,3$ К.

отрывного диаметра), и в то же время начинает проявляться бимодальность, что может быть связано с началом коалесценции пузырей вблизи поверхности кипения. На рис. 4, 5 представлены зависимости отрывного диаметра от температурного напора для $d_c = 3$ мм и $d_c = 1$ мм соответственно (доверительный интервал ± 70 мкм). Теоретическая зависимость на рис. 4 построена по (1) с рекомендуемыми в [11] эмпирическими коэффициентами a_1 и b . В то же время для $d_c = 1$ мм зависимость (1) обнаруживает существенные отклонения от экспериментальных данных. Теоретическая кривая на рис. 5 построена при $a_1 = 0,157$. Отметим, что зависимость (1) предложена для определения отрывного диаметра при кипении на плоскости. Из экспериментов видно, что при кипении на цилиндре с $d_c = 1$ мм проявляется эффект кривизны, тогда как при $d_c = 3$ мм эффект кривизны отсутствует и отрывные диаметры соответствуют диаметрам при кипении на плоскости. Среднее отклонение для всех режимов от кривой, построенной при $a_1 = 0,157$, составило для $d_c = 3$ мм 8,4 %, для $d_c = 1$ мм — 7,5 %.

На рис. 6 представлены теневые изображения роста пузыря на поверхности, на рис. 7 приведена соответствующая этим изображениям зависимость диаметра пузыря на поверхности нагрева от времени (доверительный интервал ± 28 мкм). Видно, что функция (3) удовлетворительно описывает экспериментальные данные. Среднее отклонение по всем режимам для $d_c = 1$ мм составило 18,3 %, а для $d_c = 3$ мм — 12,4 %.

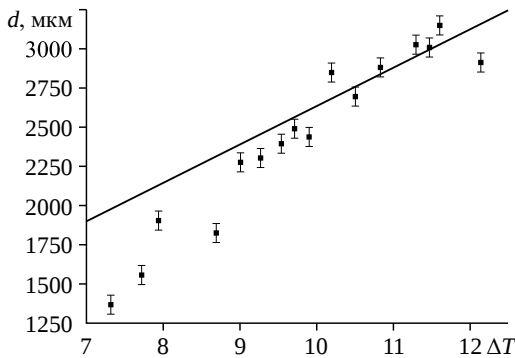


Рис. 4. Зависимость отрывного диаметра от температурного напора для $d_c = 3$ мм.

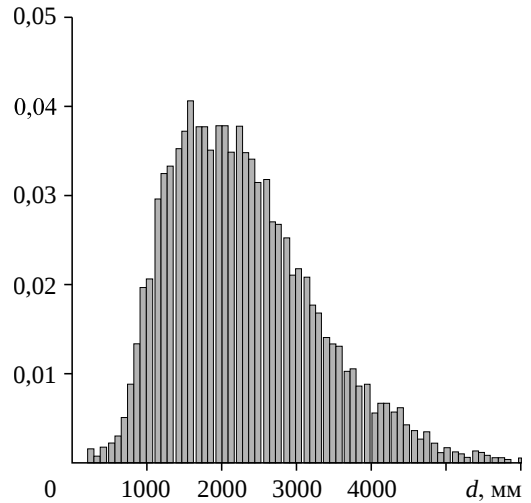


Рис. 3. Распределение количества пузырей по диаметрам (отнесено к общему количеству пузырей) для $d_c = 3$ мм при $\Delta T = 9,3$ К.

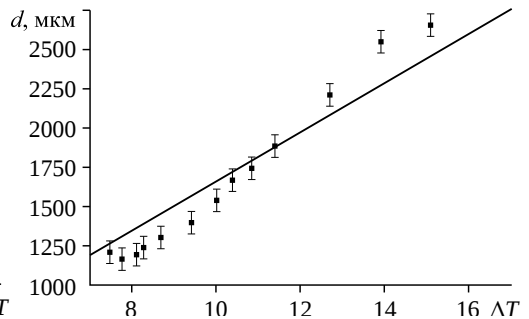


Рис. 5. Зависимость отрывного диаметра от температурного напора для $d_c = 1$ мм.

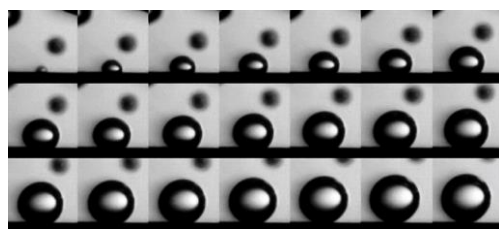


Рис. 6. Теневые изображения роста пузыря на поверхности ($d_c = 3$ мм, $\Delta T = 10,2$ К).

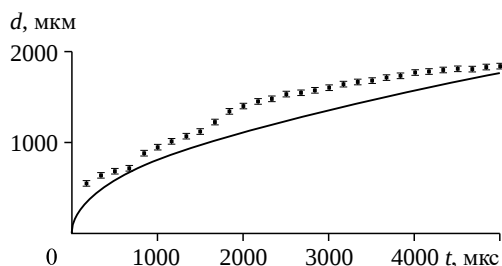


Рис. 7. Зависимость диаметра пузыря, находящегося на поверхности нагрева, от времени при $d_c = 3$ мм, $\Delta T = 10,2$ К.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование методом PSV кипения воды на одностороннем цилиндре диаметром 3 мм для температурных напоров $\Delta T = 7–12$ К, что соответствует плотностям теплового потока $q = 30–160$ кВт/м², и на цилиндре диаметром 1 мм для $\Delta T = 7,5–16$ К, что соответствует $q = 30–330$ кВт/м².

На основании статистической обработки получены зависимости отрывного диаметра пузыря от температурного напора, выполнено сравнение с зависимостью, предложенной в работе [11], показано удовлетворительное соответствие для $d_c = 3$ мм, при этом для $d_c = 1$ мм подобран эмпирический коэффициент, учитывающий существенное влияние кривизны поверхности.

Установлены зависимости скорости роста пузырей на поверхности нагрева, проведено сравнение с зависимостью, предложенной в исследовании [12], и показано, что формула (3) удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные.

Список литературы

1. Liu C., Yu H. Evaluation and optimization of a two-phase liquid-immersion cooling system for data centers // *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 5. P. 1395-1–1395-21.
2. Bromley L.A. Heat transfer in stable film boiling // *Chem. Eng. Progr.* 1950. Vol. 46. P. 221–227.
3. Breen B.P., Westwater J.W. Effect of diameter of horizontal tubes on film boiling heat transfer // *Chem. Engng. Progr.* 1962. Vol. 58, Iss. 7. P. 67–72.
4. Sakurai A., Shiotsu A., Hata K. A general correlation for pool film boiling heat transfer from a horizontal cylinder to subcooled liquid. Pt 2. Experimental data for various liquids and its correlation // *J. Heat Transfer*. 1990. Vol. 112. P. 441–450.
5. Cornwell K., Houston S.D. Nucleate pool boiling on horizontal tubes: A convection-based correlation // *J. Heat and Mass Transfer*. 1994. Vol. 37, Iss. 1. P. 303–309.
6. Paul D.D., Abdel Khalik S.I. A statistical analysis of saturated nucleate boiling along a heated wire // *Intern. J. Heat Mass Transf.* 1992. Vol. 26, No. 4. P. 509–519.
7. Ammerman C.N., You S.M., Hong Y.S. Identification of pool boiling heat transfer mechanisms from a wire immersed in saturated FC-72 using a single photo/LDA method // *J. Heat Transfer*. 1996. Vol. 118, No. 1. P. 117–123.
8. Goel P., Nayak A., Das M., Joshi J. Bubble departure characteristics in a horizontal tube bundle under cross flow conditions // *Intern. J. Multiphase Flow*. 2017. Vol. 100. P. 143–154.
9. Silvi L., Chandraker D.K., Ghosh S., Das A. Saturated nucleate flow boiling over a horizontal single and multi-cylinder under cross-flow condition // *Applied Thermal Eng.* 2023. Vol. 234, No. 121252. P. 1–20.
10. Tanasawa I. Advances in condensation heat transfer // *Adv. Heat Transf.* 1991. Vol. 21. P. 55–139.
11. Кутателадзе С.С., Гогонин И.И. Скорость роста и отрывной диаметр парового пузыря при кипении насыщенной жидкости в условиях свободной конвекции // *Теплофизика высоких температур*. 1979. Т. 17, № 4. С. 792–797.
12. Лабунцов Д.А., Кольчугин Б.А., Головин В.С., Захарова Э.А., Владимирова Л.Н. Исследование при помощи скоростной киносъемки роста пузырьков при кипении насыщенной воды в широком диапазоне изменения давлений // *Теплофизика высоких температур*. 1964. Т. 2, № 3. С. 446–453.

Статья поступила в редакцию 24 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.