

Визуализация эволюции одиночного пузыря при кипении недогретой жидкости: опыт автоматизации обработки результатов скоростной видеосъемки

Н.В. Васильев^{1,A,B}, С.Н. Вавилов^{2,A}, Ю.А. Зейгарник^{3,A}, Н.А. Азаров^{4,B}

^A Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^B Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@oivtran.ru

⁴ ORCID: 0009-0007-2256-704X, k.azarov@bk.ru

Аннотация

Кипение недогретой жидкости позволяет отводить предельно высокие плотности тепловых потоков (десятки, а при определенных условиях и сотни МВт/м²). Этот метод используется для охлаждения ракетных сопел, в металлургии, в термоядерных энергетических и специальных установках (охлаждение пучковых мишеней), импульсных магнитогидродинамических (МГД) установках. Однако расчеты строятся на чисто эмпирических корреляциях. Недостаток экспериментальных данных по характеристикам пузырей (эволюции размеров, продолжительности жизни, частоте образования) сдерживает развитие математических моделей и расчетных методик.

В работе представлена разработанная в среде разработки Python (версия 3.10) программа автоматизированной обработки высокоскоростных видеосъемок процесса эволюции одиночного пузыря при кипении недогретой жидкости. Сравнение обработок кадров, проводимой «вручную» и с помощью написанной программы, показало достаточно высокое совпадение результатов. Разработанный метод позволил значительно сократить затраты времени на обработку опытного материала и включить в анализ существенно больший массив экспериментальных данных.

Ключевые слова: кипение, недогретая вода, одиночный пузырь, лазерный нагрев, высокоскоростная видеосъемка, компьютерная обработка видеок кадров.

1. Введение

Кипение потока сильно недогретой жидкости (в основном воды) активно и широко используется в системах охлаждения аппаратов и установок, требующих отвода предельно высоких плотностей тепловых потоков (q). Рекордные отводимые q , зафиксированные в [1] в условиях высоких массовых скоростей, недогрева и давлений, имеют значения выше 200 МВт/м². Дополнительную привлекательность данному способу охлаждения придает то обстоятельство, что сам процесс кипения концентрируется в тонком поверхностном слое. Вследствие чего при q , далеких от критических, гидравлическое сопротивление потока слабо отличается от такового в случае однофазного течения [2].

Изучению кипения потока сильно недогретой жидкости было посвящено большое количество работ, однако в основном их цели сводились к исследованию интегральных характеристик процесса (критической плотности теплового потока и коэффициентов теплоотдачи). Статистическим характеристикам паровых пузырей (распределению по диаметрам, эволюции размеров и формы, средним временам жизни и др.) уделялось

меньше внимания [3]. Однако для развития теории и моделей процесса является достаточно важным наличие объема достоверных экспериментальных данных по таким характеристикам. В классических работах [4, 5], наряду с современной [6], основным способом получения статистических данных была видеосъемка эволюции пузырей в направлении, перпендикулярном поверхности кипения. Данный метод не позволял отследить эволюцию формы пузыря, информацию о которой можно получить при визуализации пузыря в профиль.

В работах [7–9] исследовались характеристики паровых пузырей с помощью видеосъемки в профиль при кипении недогретой воды. Нагрев поверхности кипения большой площади (по сравнению с размером пузыря) осуществлялся электрическим током. Работы [7, 8] были посвящены исследованию отрывных диаметров пузырей. В работе [9] изучалась эволюция формы и размеров паровых пузырей. Описанные в данных статьях исследования проводились в диапазоне низких q , соответствующих режиму «изолированных» пузырей при кипении недогретой воды. В экспериментах [7, 8] значения плотности теплового потока составляли до 200 кВт/м², а в [9] до 500 кВт/м². При переходе к более высоким q при электрическом нагреве поверхности большой площади невозможно с помощью видеосъемки в профиль проследить эволюцию отдельного парового пузыря из-за затенения пузырями друг друга. Решение данной проблемы представляется возможным при использовании локализованного нагрева поверхности малой площади (сравнимой с размером пузыря) для получения и исследования одиночного пузыря. В настоящей работе локализация нагрева поверхности осуществлялась с помощью лазерного луча. В качестве теплоносителя использовалась вода с высокой степенью недогрева $\Delta t_{\text{нед}} > 40^\circ\text{C}$. Эксперименты проводились в диапазоне плотностей тепловых потоков, соответствующих развитому пузырьковому режиму кипения ($q = 1,0\text{--}1,6$ МВт/м²).

Для получения детализированной информации об изменении размеров и формы пузырей на разных этапах его эволюции (роста, постоянного размера, схлопывания) требуется высокая скорость видеосъемки. Например, продолжительность этапа роста до максимального размера обычно составляет 100–150 мкс. Чтобы в этот отрезок времени уложились хотя бы 5 кадров, требуется скорость съемки с частотой не ниже 50 кГц (20 мкс между кадрами). Среднее время жизни пузыря в исследуемом диапазоне параметров составляло 500–900 мкс. Следовательно, каждый пузырь при частоте съемки 50 кГц фиксировался как минимум на 25 кадрах. Для получения статистики нужна информация об эволюции нескольких пузырей, что требует обработку большого количества кадров. С целью автоматизации обработки кадров видеосъемок одиночных пузырей была написана программа в интегрированной среде разработки PyCharm с интерпретатором Python 3.10, результаты обработки в которой показали высокую эффективность. Разработанная программа позволит обрабатывать большие массивы опытных данных при приемлемых временных и трудовых затратах.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из замкнутого контура с водой, температура которой варьировалась с помощью двух теплообменных аппаратов (подогревателя и охладителя). Расход и температура жидкости измерялись турбинным расходомером и термометрами сопротивления соответственно.

Длина рабочего участка установки составляла 70 мм, его поперечное сечение было выполнено прямоугольным 21 x 5 мм. На двух боковых и передней стенках рабочего участка устанавливались стеклянные окна для возможности видеосъемки процесса кипения в разных направлениях. Греющая пластина, толщина которой была 0,1 мм, изготовлялась из стали X18H9T. Пластина монтировалась на единственной стенке рабочего участка, не имеющей стеклянного смотрового окна. Ее диаметр составлял 13 мм. Для нагрева внешней поверхности пластины использовалось лазерное излучение.



Рис. 1. Общий вид установки, измерительной и вспомогательной аппаратуры. Цифрами обозначены: 1 – рабочий участок; 2 – камера для высокоскоростной видеосъемки; 3 – тепловизионная камера; 4 – линза для фокусировки лазерного излучения; 5 – фонари подсветки.

Для получения сфокусированного пучка лазерного излучения на площадке диаметром 1–2 мм (в качестве его источника использовался лазерный диод фирмы Jenoptik мощностью до 100 Вт) применялась система из двух линз. Первая линза преобразовывала в параллельный пучок лучи, выходящие из световода лазера, а вторая (позиция 4 на рис. 1) фокусировала его на внешней поверхности греющей пластины. Для увеличения степени поглощения лазерного излучения на поверхность пластины наносился тонкий слой специального аэрозоля на основе графита. На соответствующей длине волны используемого лазерного диода (808 ± 3 нм) была измерена степень черноты такого покрытия, которая составила $\sim 0,9$.

С помощью высокоскоростной видеокамеры (позиция 2 на рис. 1) через боковые окна осуществлялась визуализация эволюции одиночных паровых пузырей на греющей пластине. Частота видеосъемки составляла 50 кГц со временем экспозиции до 3 мкс. Для измерения температуры внешней поверхности пластины использовалась тепловизионная камера (позиция 3 на рис. 1), по которой затем пересчитывалась температура поверхности кипения.

3. Результаты автоматизированной обработки видеосъемки процесса

Для автоматизации обработки кадров, полученных в результате высокоскоростных видеосъемок, была написана программа в интегрированной среде разработки PyCharm с интерпретатором Python 3.10 с использованием специализированной библиотеки алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений OpenCV.

В качестве исходных данных принималось видео в формате .avi, полученное в результате эксперимента, которое нарезалось на кадры с помощью первого модуля

программы. Кадры сохранялись в специальную директорию. Далее при помощи второго модуля программы, написанного на основе алгоритма J. Canny [10], создавалась черно-белая версия каждого кадра, где белыми контурами выделялись границы объектов. На рис. 2 представлены кадры из видеосъемки одиночного пузыря, а на рис. 3 их версия после обработки.

Полученная таким образом черно-белая версия кадров позволяла достаточно точно определять размеры пузырей. Диаметр пузыря обозначен как d на рис. 2а и рис. 3а. Для определения размеров пузырей с помощью полученных черно-белых версий кадров использовался алгоритм третьего модуля программы, в котором запускался цикл по матрице пикселей и находилось их максимальное и минимальное значение по оси ординат. Вычитанием из максимального значения минимального определялась величина диаметра пузыря в пикселях, которая потом пересчитывалась в мкм с использованием известного масштаба кадра.

После получения размера пузыря на каждом кадре, программа позволяла построить график изменения диаметра от времени. На рис. 4 показано сравнение графиков изменения размеров пузыря (кадры видеосъемки которого представлены на рис. 2) от времени, полученных при обработке каждого кадра «вручную» и с помощью разработанной программы. Красным цветом на графиках выделены точки, соответствующие размерам пузырей на соответствующих кадрах до (рис. 2) и после обработки в программе (рис. 3). По рис. 4 можно видеть, что обработка кадров, проводимая «вручную» и с помощью программы показали достаточно высокое совпадение результатов.

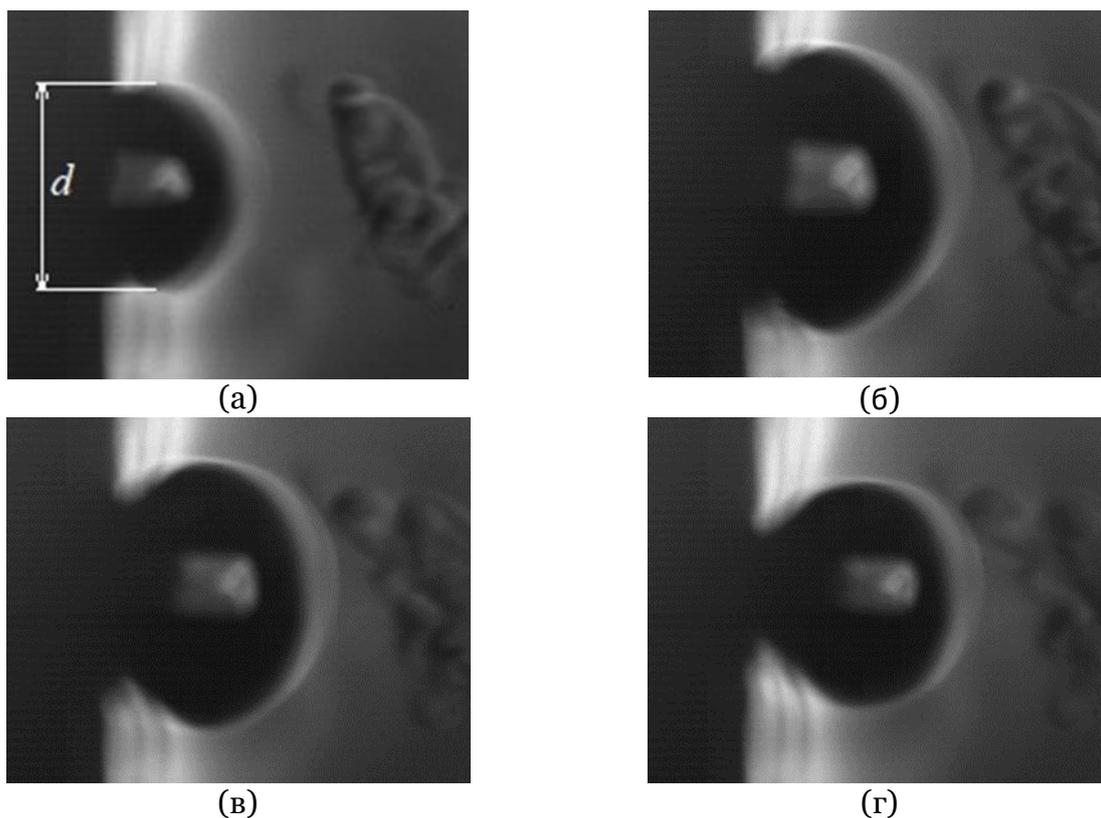


Рис. 2. Кадры видеосъемки эволюции одиночного парового пузыря: $\Delta t_{\text{нед}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho w = 0 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 1,4 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Время от зарождения пузыря: (а) – 60 мкс; (б) – 200 мкс; (в) – 340 мкс; (г) – 460 мкс. Размер кадров 0,8 x 1,0 мм. Время экспозиции – 3 мкс.

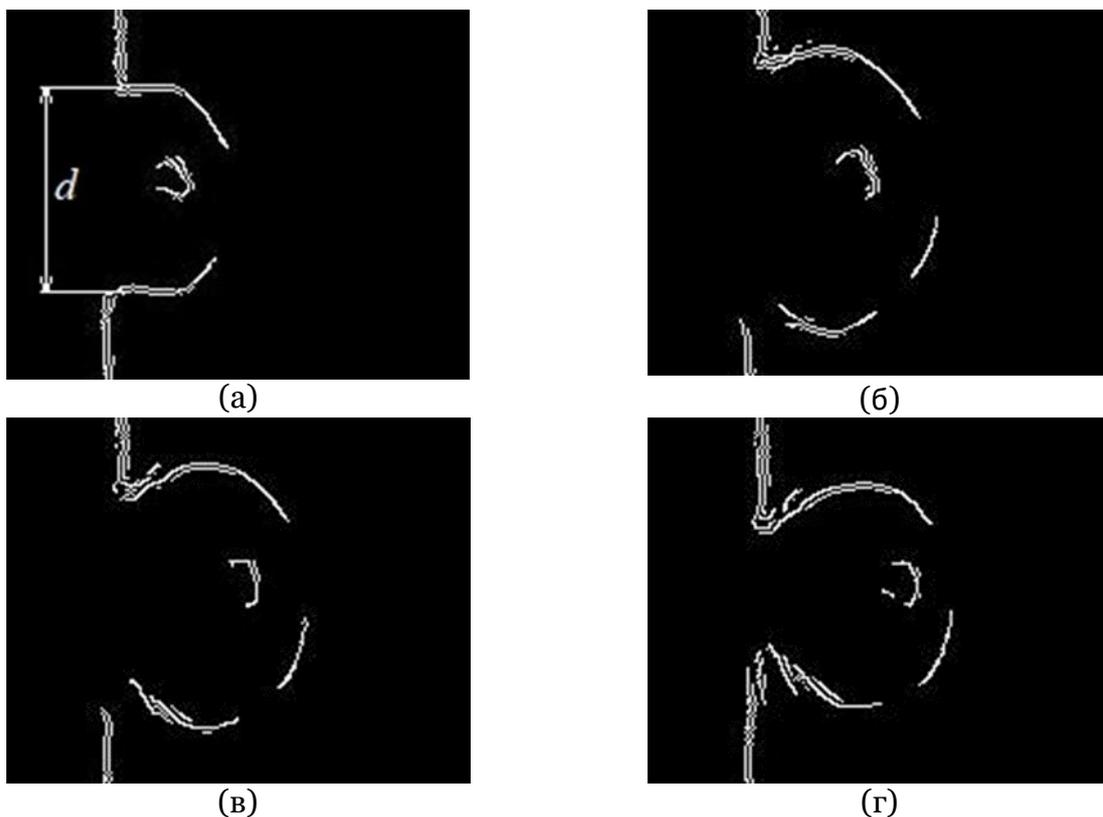
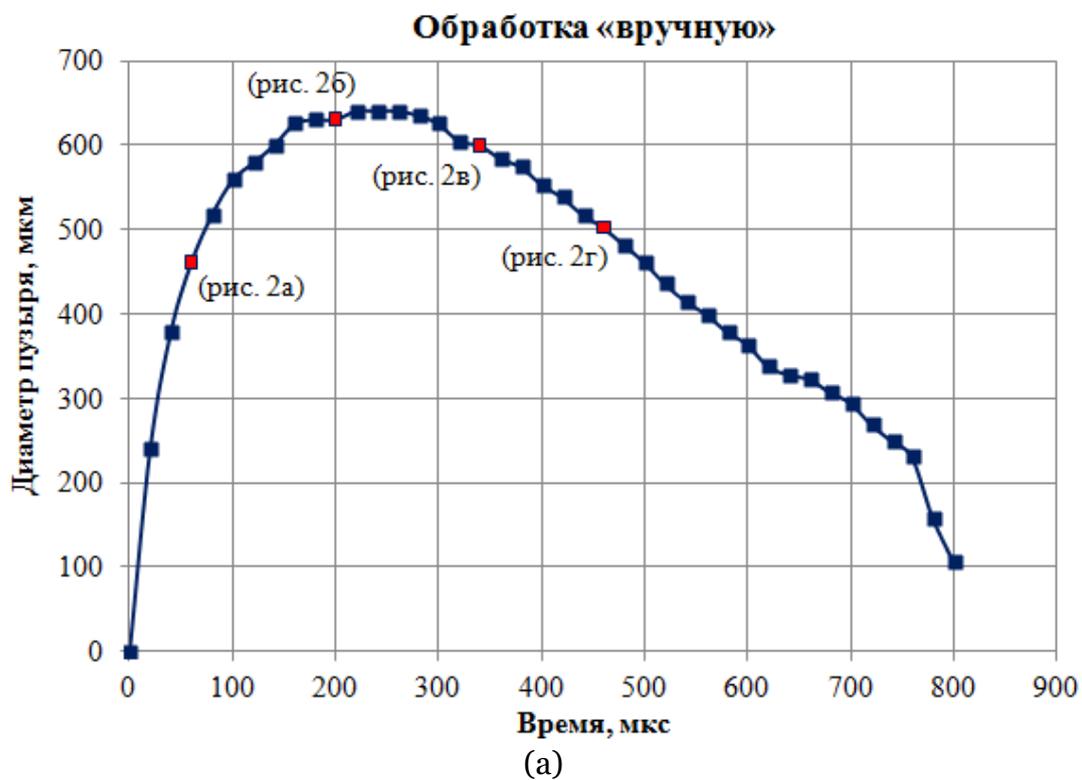


Рис. 3. Кадры эволюции одиночного парового пузыря после обработки в разработанной программе: $\Delta t_{\text{нед}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho w = 0 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 1,4 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Время от зарождения пузыря: (а) – 60 мкс; (б) – 200 мкс; (в) – 340 мкс; (г) – 460 мкс. Размер кадров $0,8 \times 1,0 \text{ мм}$.



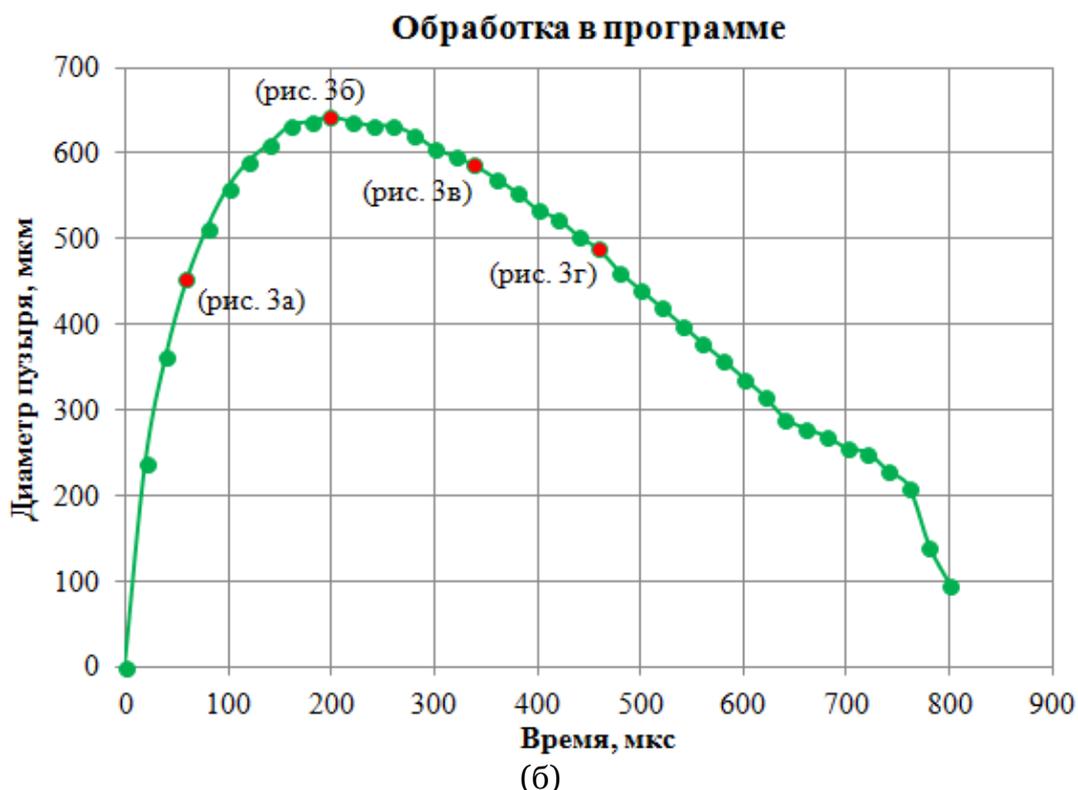


Рис. 4. График изменения диаметра одиночного парового пузыря во времени ($\Delta t_{\text{нед}} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho w = 0 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $q = 1,4 \text{ МВт}/\text{м}^2$): (а) – полученный при обработке «вручную»; (б) – полученный при обработке в разработанной программе.

4. Заключение

С помощью разработанной в интегрированной среде разработки PyCharm с интерпретатором Python 3.10 программы реализована методика автоматизированной обработки результатов высокоскоростной видеосъемки процесса эволюции одиночного парового пузыря при кипении недогретой жидкости. Разработанный метод значительно сокращает временные и трудовые затраты на обработку опытного материала и позволяет включить в анализ существенно больший массив экспериментальных данных.

Благодарности

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

Список литературы

1. Mudawar I., Bowers M. B. Ultra-high critical heat flux (CHF) for subcooled water flow boiling – I: CHF data and parametric effects for small diameter tubes // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1999. V. 42. № 8. P. 1405–1428.
2. Зейгарник Ю.А., Кириллова И.В., Климов А.И., Смирнова Е.Г. Некоторые результаты измерения гидравлического сопротивления при кипении воды, недогретой до температуры насыщения // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. № 2. С. 234–239.
3. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение при вынужденном течении недогретой жидкости как метод отвода высоких тепловых потоков (обзор). Ч. 1. Характеристики, механизм и модель процесса, теплоотдача и гидравлическое сопротивление // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 3–21.

4. Gunther F.C. Photographic study of surface boiling heat transfer to water with forced convection // Transactions of the ASME, J. Heat Transfer. 1951. V. 73. P. 115–123.
5. Трещов Г.Г. Экспериментальное исследование механизма теплообмена при поверхностном кипении воды // Теплоэнергетика. 1957. № 5. С. 44–48.
6. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Маслакова И.В. Кипение жидкости, недогретой до температуры насыщения в каналах, как метод отвода предельных тепловых потоков // Теплоэнергетика. 2019. № 5. С. 69–81.
7. Sugrue R., Buongiorno J., McKrell T. An experimental study of bubble departure diameter in subcooled flow boiling including the effects of orientation angle, subcooling, mass flux, heat flux, and pressure // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 279. P. 182–188.
8. Xu J.J., Chen B.D., Xie T.Z. Experimental and theoretical analysis of bubble departure behavior in narrow rectangular channel // Progress in Nuclear Energy. 2014. V. 77. P. 1–10.
9. Cao Y., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T. Visualization study on bubble dynamical behavior in subcooled flow boiling under various subcooling degree and flowrates // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 93. P. 839–852.
10. Canny J. F. A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. P. 678–698.

Visualization of the Evolution of a Single Vapor Bubble During Boiling of a Subcooled Liquid: Experience in Automating the Processing of High-Speed Video Recording Results

N.V. Vasil'ev^{1,A,B}, S.N. Vavilov^{2,A}, Yu.A. Zeigarnik^{3,A}, N.A. Azarov^{4,B}

^A Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^B Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@oivtran.ru

⁴ ORCID: 0009-0007-2256-704X, k.azarov@bk.ru

Abstract

Subcooled liquid boiling makes it possible to remove extremely high heat flux densities (tens, and under certain conditions even hundreds of MW/m²). This method is used for cooling rocket nozzles, in metallurgy, in thermonuclear power and special installations (cooling of beam targets), pulsed magnetohydrodynamic (MHD) installations. However, the calculations of this process are based on purely empirical correlations. The lack of experimental data on the characteristics of bubbles (size evolution, life time, formation frequency) hinders the development of mathematical models and calculation methods.

The paper presents a program developed in the Python 3.10 environment for automated processing of high-speed video recordings of the evolution of a single bubble during boiling of a subcooled liquid. Comparison of frame processing, carried out «manually» and with the help of the developed program, showed a fairly high agreement between the results. The developed method makes it possible to significantly reduce the time spent on processing the experimental material and to include a significantly larger array of experimental data in the analysis.

Keywords: boiling, subcooled water, single bubble, laser heating, high-speed video recording, computerized frame processing.

References

1. Mudawar I., Bowers M. B. Ultra-high critical heat flux (CHF) for subcooled water flow boiling – I: CHF data and parametric effects for small diameter tubes // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1999. V. 42. № 8. P. 1405–1428.
2. Zeigarnik Yu.A., Kirillova I.V., Klimov A.I., Smirnova E.G. Some measurements of hydraulic resistance in boiling heated to below the saturation temperature // High Temperature. 1983. V. 21. № 2. P. 234–239.
3. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A. Boiling in Forced Convection of Subcooled Liquid as a Method for Removing High Heat Fluxes (Review): Part 1. Characteristics, Mechanism, and Model of the Process, Heat Transfer, and Hydraulic Resistance // Thermal Engineering. 2022. V. 69. № 4. P. 235–251.
4. Gunther F.C. Photographic study of surface boiling heat transfer to water with forced convection // Transactions of the ASME, J. Heat Transfer. 1951. V. 73. P. 115–123.
5. Treshchev G.G. Experimental study of the mechanism of heat transfer in the surface boiling of water // Thermal Engineering. 1957. № 5. P. 44–48.
6. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A., Maslakova I.V. Boiling of liquid subcooled to saturation temperature in channels as a method for removal of ultimate heat fluxes // Thermal Engineering. 2019. V. 66. P. 350–360.

7. Sugrue R., Buongiorno J., McKrell T. An experimental study of bubble departure diameter in subcooled flow boiling including the effects of orientation angle, subcooling, mass flux, heat flux, and pressure // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 279. P. 182–188.
8. Xu J.J., Chen B.D., Xie T.Z. Experimental and theoretical analysis of bubble departure behavior in narrow rectangular channel // Progress in Nuclear Energy. 2014. V. 77. P. 1–10.
9. Cao Y., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T. Visualization study on bubble dynamical behavior in subcooled flow boiling under various subcooling degree and flowrates // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2016. V. 93. P. 839–852.
10. Canny J. F. A computational approach to edge detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. 8. P. 678–698.