

УДК 536.242

Исследование структуры микрослоя при кипении жидкости с помощью светодиодной интерферометрии*

В.С. Сердюков^{1,2}, И.А. Косовских^{1,2}, И.П. Малахов¹, А.С. Суртаев^{1,2}

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: vsserd@gmail.com

Статья посвящена экспериментальному исследованию структуры жидкого микрослоя в основании паровых пузырей при кипении воды в условиях свободной конвекции с использованием метода светодиодной (LED) интерферометрии и прозрачной конструкции тепловыделяющей поверхности. Получены профили микрослоя в различные моменты времени и проанализировано влияние плотности теплового потока на его характеристики. Показано, что использованная методика позволяет с помощью достаточно простой оптической схемы получить актуальную информацию о структуре и динамике микрослоя под паровыми пузырями при кипении жидкости.

Ключевые слова: кипение, микрослой, LED-интерферометрия.

Кипение жидкости является сложным нестационарным процессом, при описании которого необходимо учитывать эффекты, проявляющиеся на различных пространственных и временных масштабах. На сегодняшний день общепризнано, что при кипении в процессе роста парового пузыря в его основании образуется тонкий слой жидкости, вследствие малой толщины именуемый в литературе микрослоем. Помимо того, что процесс формирования и испарения микрослоя является неотъемлемой частью динамики паровых пузырей, он также играет важную роль в теплообмене при кипении жидкости. Так, многими авторами был отмечен существенный вклад испарения микрослоя в общую интенсивность теплоотдачи при кипении жидкости (до 50 – 70 %) [1, 2]. Однако для четкого понимания механизмов, отвечающих за динамику микрослоя, и построения моделей теплообмена при кипении, учитывающих это явление, необходима подробная экспериментальная информация о профиле микрослоя и его эволюции при кипении различных жидкостей в разных условиях.

В настоящее время для экспериментального исследования структуры и динамики микрослоя при кипении, а также динамики испарения капель, как правило, используются различные методы интерферометрии [3–8]. Однако эти методы достаточно трудозатратные,

* Исследование выполнено при финансировании РНФ (проект № 22-79-00174). Экспериментальный стенд для исследования теплообмена и динамики парообразования при кипении жидкостей разработан и изготовлен в рамках бюджетного проекта ИТ СО РАН (рег. № НИОКТР 121031800216-1).

требуют наличия лазера и системы его позиционирования, что ограничивает их широкое применение. Относительно недавно авторами работы [9] была предложена методика светодиодной (LED) интерферометрии как альтернатива лазерной интерферометрии в изучении особенностей структуры микрослоя при кипении. На примере кипения воды в условиях вынужденной конвекции авторы показали, что этот относительно простой в реализации метод позволяет получить отчетливые интерференционные картины при образовании и росте пузырей, что дает возможность провести в дальнейшем анализ толщины микрослоя. В настоящей работе метод LED-интерферометрии был реализован для условий кипения при свободной конвекции, что позволяет сопоставить его результаты с данными других авторов.

Эксперименты были проведены с использованием установки, схематический вид которой представлен на рис. 1. Установка состоит из двух герметичных частей — для поддержания постоянной температуры рабочей жидкости внутренний объем помещен во внешнюю термостатирующую камеру. Для устранения эффекта повышения давления в рабочей области при кипении жидкости внутренний объем оснащен конденсатором пара с водяным охлаждением. Подробное описание экспериментального стенда приведено в [10]. В качестве рабочей жидкости в экспериментах была использована деионизированная вода на линии насыщения, подготовленная на установке MDirect Q3UV. Эксперименты проводились при атмосферном давлении. Для получения интерференционных картин был использован красный светодиод (Wayllshine SK-68, $\lambda_{LED} = 630 \text{ нм}$, 200 лм), расположенный под углом 20° к поверхности нагрева. Светодиод крепился с помощью штатива и редукторной головы, позволяющей с высокой точностью задать его положение относительно нагревательной поверхности. Запись интерференционных картин была выполнена с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom VEO 410 с частотой съемки 7500 кадр/с. Пространственное разрешение видеосъемки при использовании объектива AF Micro-Nikkor 200 mm f/4D IF-ED составило 26 мкм/пиксел.

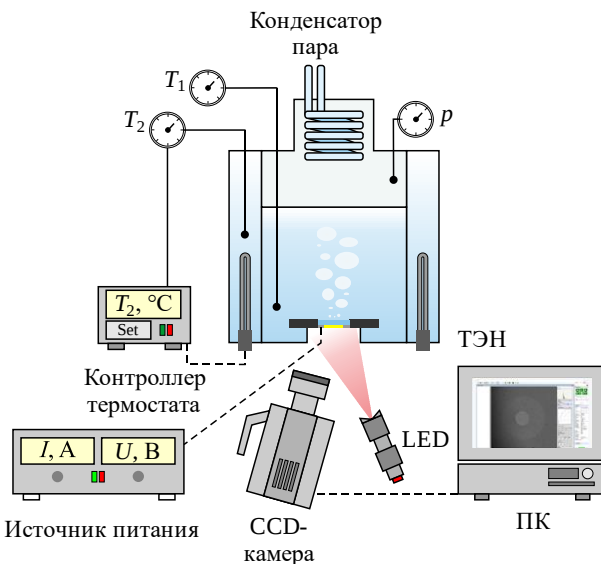


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования структуры микрослоя при кипении жидкости с помощью LED-интерферометрии.

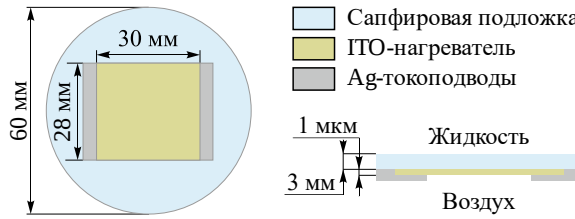


Рис. 2. Схема прозрачной нагревательной поверхности, использованной в работе.

Проводящая пленка из оксида индия – олова (ИТО) толщиной 1 мкм, размером 30 × 28 мм, напыленная методом ионно-плазменного распыления на сапфировую подложку толщиной 3 мм и диаметром 60 мм, была использована в качестве нагревателя. Серебряные площадки толщиной 1 мкм, напыленные термовакuumным методом по краям ИТО-пленки, использовались в качестве токоподводов для тепловыделения путем пропускания постоянного электрического тока (джоулево тепло). Плотность теплового потока q измерялась по показаниям величины тока, пропускаемого через нагреватель, и разности потенциалов между напыленными по краям нагревателя токоподводами. Схема нагревательной поверхности, использованной в работе, представлена на рис. 2.

На рис. 3 приведены кадры видеосъемки образования и роста отдельного парового пузыря при плотности теплового потока $q = 60 \text{ кВт/м}^2$, на которых отчетливо видны так называемые кольца Ньютона (интерференционные максимумы и минимумы). Для лучшего распознавания интерференционных колец также был применен алгоритм вычитания фона из каждого кадра. Отсчет времени проводился от момента появления парового пузыря на поверхности нагревателя. На рис. 3 также представлена линия R , вдоль которой восстанавливалась толщина микрослоя. На полученных кадрах область микрослоя соответствует области, заполненной интерференционными кольцами, светлая область в центре пузыря соответствует сухому пятну, растущему за счет испарения микрослоя. После полного испарения микрослоя начинается стадия отрыва парового пузыря, на которой происходит замывание сухого пятна окружающей жидкостью. Полученные интерференционные картины позволяют рассчитать толщину микрослоя жидкости на протяжении его роста и испарения. Кроме того, с использованием полученных результатов становится возможным проанализировать динамику тройной контактной линии под паровым пузырем.

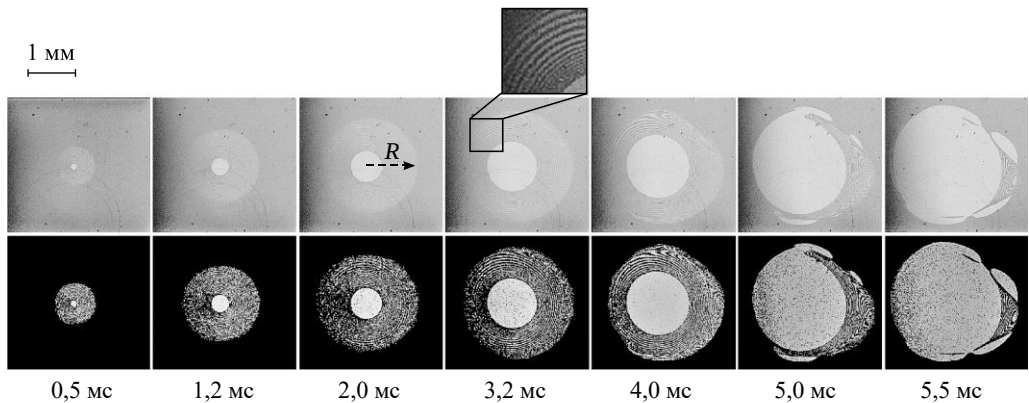


Рис. 3. Полученные с помощью LED-интерферометрии кадры роста парового пузыря при кипении воды (без вычитания (верхний ряд) и с вычитанием (нижний ряд) фона), $q = 60 \text{ кВт/м}^2$.

Толщина микрослоя рассчитывалась по следующему выражению:

$$\delta_{\text{мс}} = \frac{\lambda_{\text{LED}}(2k+1)}{4\sqrt{n_{\text{ж}}^2 - n_{\text{с}}^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (1)$$

где λ_{LED} — длина волны света источника, $k = 1, 2, \dots$ — порядковый номер интерференционного кольца, $n_{\text{ж}}$, $n_{\text{с}}$ — коэффициенты преломления рабочей жидкости и поверхности нагревателя (сапфира) соответственно, α — угол, под которым расположен источник света к поверхности. Погрешность в определении толщины микрослоя может быть определена из выражения (1) как разница $\Delta\delta_{\text{мс}}$, рассчитанная для двух соседних интерференционных колец. В работе величина $\Delta\delta_{\text{мс}}$ составила 248 нм.

На рис. 4 приведены полученные в результате расчета по выражению (1) профили микрослоя $\delta_{\text{мс}}(R)$, где R — расстояние от центра парового пузыря в различные моменты времени для плотностей теплового потока $q = 30$ и 90 кВт/м^2 . Результаты показывают, что для обоих случаев форма микрослоя с течением времени становится все более криволинейной. С ростом теплового потока происходит увеличение размеров области микрослоя и его толщины, а также наблюдается рост скорости испарения микрослоя, что объясняется повышением локального перегрева тепловыделяющей поверхности на момент образования парового пузыря (числа Якоба).

Также на рис. 4 видно, что при разных тепловых потоках динамика микрослоя несколько различается. Так, при $q = 30 \text{ кВт/м}^2$ максимальная толщина микрослоя ($\approx 3,4 \text{ мкм}$) наблюдается на начальной стадии его роста ($t = 0,5 \text{ мс}$). В то же время при большем тепловом потоке ($q = 90 \text{ кВт/м}^2$) микрослой достигает своей максимальной толщины ($\approx 4,7 \text{ мкм}$) только при $t = 3 \text{ мс}$, после чего происходит уменьшение его толщины. Такое различие может быть связано с увеличением скорости роста парового пузыря при повышении входной тепловой мощности, вследствие чего сила инерции, действующая на растущий пузырь со стороны окружающей жидкости, изменяется [11]. Как было показано в [12], изменение соотношения между силами инерции и поверхностного натяжения может заметно влиять на форму парового пузыря и, соответственно, на профиль микрослоя в его основании.

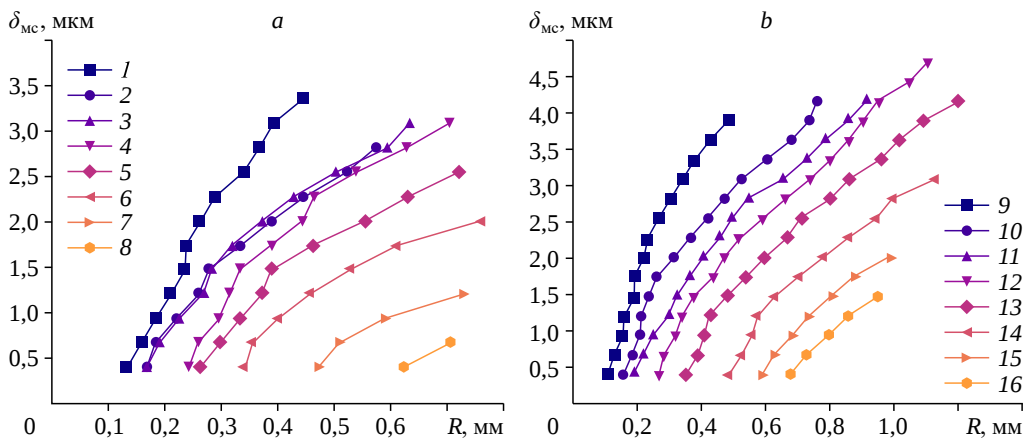
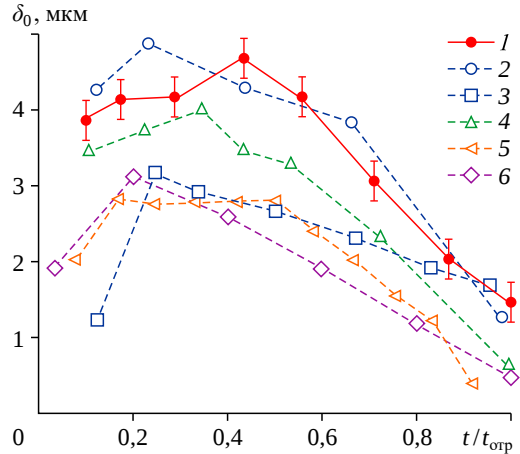


Рис. 4. Профили микрослоя в различные моменты времени t при $q = 30$ (a) и $q = 90 \text{ кВт/м}^2$ (b).
 $t = 0,53$ (1), $0,8$ (2), $1,06$ (3), $1,6$ (4), $2,0$ (5), $2,66$ (6), $3,46$ (7), $4,4$ (8),
 $0,67$ (9), $1,2$ (10), $2,0$ (11), $3,0$ (12), $3,86$ (13), $4,9$ (14), $6,6$ (15), $6,92 \text{ мс}$ (16).

Рис. 5. Обобщение опытных данных различных авторов по эволюции начальной толщины микрослоя при кипении воды в условиях большого объема.
1 — настоящая работа, 2 — данные [13], 3 — [14], 4 — [15], 5 — [16], 6 — [17].



Сравнительный анализ показал, что полученные в настоящей работе данные по толщине микрослоя согласуются с результатами, полученными ранее другими авторами с помощью лазерной интерферометрии. На рис. 5 приведено сопоставление результатов настоящей работы с данными работ [13–17], в которых была изучена эволюция начальной толщины микрослоя при кипении воды в условиях большого объема. На рис. 5 время представлено в безразмерном виде $t/t_{\text{отр}}$, где $t_{\text{отр}}$ — время от образования пузыря до начала стадии его отрыва парового пузыря от поверхности. Видно, что полученные в настоящей работе данные согласуются с представленными в литературе как в качественном, так и в количественном плане. Разброс данных разных авторов связан, по-видимому, с различием в температуре активации анализируемых паровых пузырей, а также с различной величиной входной плотности теплового потока, что влияет на скорость роста паровых пузырей и, следовательно, на скорость испарения и толщину микрослоя.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтверждают, что методика LED-интерферометрии позволяет с использованием достаточно простой оптической схемы получить важную и актуальную информацию о структуре и динамике микрослоя под паровыми пузырями при кипении жидкости. В дальнейшем авторы планируют использовать предложенный метод для исследования влияния понижения давления на толщину микрослоя, что позволит лучше понять механизмы теплообмена при кипении жидкости в различных условиях.

Список литературы

1. Yabuki T., Nakabeppu O. Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 76. P. 286–297.
2. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M., Chen Z. Heat transfer characteristics based on microlayer structure in nucleate pool boiling for water and ethanol // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 68. P. 479–488.
3. Utaka Y., Kashiwabara Y., Ozaki M. Microlayer structure in nucleate boiling of water and ethanol at atmospheric pressure // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 57, No. 1. P. 222–230.
4. Jung S., Kim H. An experimental study on heat transfer mechanisms in the microlayer using integrated total reflection, laser interferometry and infrared thermometry technique // Heat Transfer Engng. 2015. Vol. 36, No. 12. P. 1002–1012.
5. Chen Z., Haginiwa A., Utaka Y. Detailed structure of microlayer in nucleate pool boiling for water measured by laser interferometric method // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 108. P. 1285–1291.
6. Chen Z., Hu X., Hu K., Utaka Y., Mori S. Measurement of the microlayer characteristics in the whole range of nucleate boiling for water by laser interferometry // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 146. P. 118856–118856-6.
7. Gatapova E.Y., Shonina A.M., Safonov A.I., Sulyaeva V.S., Kabov O.A. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation // Soft Matter. 2018. Vol. 14, No. 10. P. 1811–1821.
8. Sun P., Zhong L., Luo C., Niu W., Lu X. Visual measurement of the evaporation process of a sessile droplet by dual-channel simultaneous phase-shifting interferometry // Sci. Reports. 2015. Vol. 5, No. 1. P. 12053–12053-10.

9. **Kossolapov A., Phillips B., Bucci M.** Can LED lights replace lasers for detailed investigations of boiling phenomena? // *Int. J. Multiphase Flow*. 2021. Vol. 135. P. 103522-1–103522-13.
10. **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.
11. **Yoon H.Y., Koshizuka S., Oka Y.** Direct calculation of bubble growth, departure, and rise in nucleate pool boiling // *Int. J. Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27, No. 2. P. 277–298.
12. **Johnson Jr.M.A., De La Peña J., Mesler R.B.** Bubble shapes in nucleate boiling // *AIChE J.* 1966. Vol. 12, No. 2. P. 344–348.
13. **Jawurek H.H.** Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1969. Vol. 12, No. 8. P. 843–848.
14. **Koffman L.D., Plesset M.S.** Experimental observations of the microlayer in vapor bubble growth on a heated solid // *J. Heat Transfer*. 1983. Vol. 105. P. 625–632.
15. **Gao M., Zhang L., Cheng P., Quan X.** An investigation of microlayer beneath nucleation bubble by laser interferometric method // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 57, 1. P. 183–189.
16. **Jung S., Kim H.** An experimental method to simultaneously measure the dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 73. P. 365–375.
17. **Narayan L.S., Srivastava A.** Non-contact experiments to quantify the microlayer evaporation heat transfer coefficient during isolated nucleate boiling regime // *Int. Commun. Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 122. P. 105191-1–105191-10.

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2023 г.,
после доработки — 25 января 2024 г.,
принята к публикации 11 апреля 2024 г.*