

УДК 536.248.2

Исследование динамики контактной линии под паровым пузырьём при кипении жидкости на поверхности прозрачного нагревателя*

А.С. Суртаев, В.С. Сердюков

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

E-mail: surtaev@itp.nsc.ru

В статье представлены результаты экспериментального исследования динамики роста и отрыва паровых пузырей при кипении жидкости, полученные с использованием высокоскоростных видеосъемки и ИК-термографии. Исследования проводились при кипении воды на линии насыщения при атмосферном давлении в диапазоне тепловых потоков 30–150 кВт/м². Для визуализации процесса и определения скоростей роста внешнего диаметра пузыря, области микрослоя и области сухого пятна в опытах использовался прозрачный тонкопленочный нагреватель толщиной 1 мкм, осажденный на подложку из сапфира, а видеосъемка осуществлялась с нижней стороны поверхности участка. Для исследования интегрального теплообмена, а также локальных нестационарных тепловых характеристик использовалась высокоскоростная ИК-термография с частотой до 1 кГц. Высокоскоростная видеосъемка показала, что после образования парового пузыря и формирования области микрослоя в короткий промежуток времени (до 1 мс) под паровым пузырьем возникает сухое пятно. Были обнаружены различные стадии распространения границы контактной линии. Показано, что на начальной стадии до развития мелкомасштабных возмущений на границе сухого пятна скорость распространения постоянна. Также выявлено, что стадия отрыва пузыря начинается после полного испарения жидкости в области микрослоя.

Ключевые слова: кипение, микрослой, высокоскоростная визуализация, ИК-термография, фазовые переходы.

Кипение является одним из наиболее эффективных режимов теплообмена, поэтому часто используется в различных технологических процессах. Несмотря на огромное количество работ, посвященных исследованию различных аспектов процесса кипения, на сегодняшний момент нет общепринятой теории, описывающей этот процесс [1]. Связано это с тем, что кипение является мультимасштабным процессом, и для его описания необходимо учитывать эффекты, проявляющиеся на различных масштабах. В частности, многими исследователями, начиная с авторов работ [2, 3], было показано значительное влияние испарения микрослоя на процесс роста парового пузыря и локальный теплообмен в области активного центра парообразования. В то же время детальная картина, основанная на экспериментальной информации о динамике микрослоя, его характеристиках,

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-01342).

включая данные по толщине, скорости испарения и т.д., до настоящего времени отсутствовала. Сложность таких исследований заключается в том, что характерная толщина микрослоя составляет несколько микрон, а процесс его формирования и развития не превышает 10 мс. Ранее для изучения динамики роста и отрыва паровых пузырей в основном использовалась высокоскоростная видеосъемка процесса, проводимая сбоку от нагревателя [4, 5]. Этот вид съемки позволяет регистрировать внешнюю форму пузыря, измерять его диаметр и определять частоты зародышеобразования. Основными недостатками такого формата съемки является невозможность наблюдения за размером области микрослоевого испарения и сухого пятна, формирующегося на стадии роста пузыря в центре области активации зародыша, определения толщины микрослоя, а также сложность проведения анализа в широкой области тепловых потоков. Последнее связано с тем, что уже при относительно небольших тепловых потоках происходит активация значительного числа центров зародышеобразования, что затрудняет идентификацию отдельных паровых пузырей. Развитие современных экспериментальных методов в последние два десятилетия позволяет получить принципиально новую информацию о локальных нестационарных характеристиках процесса кипения. В частности, в работах [6, 7] исследователями активно использовался метод лазерной интерферометрии для изучения структуры микрослоя при кипении различных жидкостей. Данная методика позволяет не только определять размер области микрослоя и сухого пятна, но и измерять толщину микрослоя в различные моменты времени на стадии роста пузыря. Также для измерения нестационарного поля температур тепловыделяющей поверхности активно используется высокоскоростная ИК-термография [8–11]. В частности, в работах [10, 11] было показано, что при кипении жидкости на поверхности тонкопленочного нагревателя такой метод дает возможность детально изучить эволюцию поля температур под отдельными центрами парообразования и на основе этого определить локальный теплообмен в различных областях, включая область микрослоя.

В настоящей работе с использованием одновременно высокоскоростных методов измерения поля температур тепловыделяющей поверхности и макровизуализации процесса с нижней стороны прозрачного нагревателя детально изучена эволюция паровых пузырей, области микрослоя, а также сухого пятна, ограниченного контактной линией, при кипении воды в области малых тепловых потоков.

Эксперименты проводились с использованием установки, подробное описание и схематический вид которой представлены в работе [10]. В качестве рабочей жидкости в опытах на линии насыщения при атмосферном давлении использовалась деионизированная вода, подготовленная на установке M Direct Q3UV. В качестве нагревателя использовалась проводящая пленка из оксида индия-олова (ИТО) толщиной 1 мкм, напыленная на сапфировую подложку толщиной 400 мкм. Преимуществом применения пленки ИТО в экспериментах по визуализации кипения является ее прозрачность в видимом диапазоне длин волн (380–750 нм) и непрозрачность в ИК-диапазоне (3–5 мкм). Интегральная пропускная способность сапфира в диапазоне длин волн 0,3–5 мкм составляет не менее 70 %. Сочетание перечисленных свойств позволяет измерять нестационарное поле температур на поверхности ИТО-нагревателя с помощью тепловизора, а также визуально регистрировать процесс роста и отрыва паровых пузырей непосредственно на поверхности сапфировой подложки с использованием высокоскоростной видеокамеры. Ввиду высокой теплопроводности ($\lambda = 25$ Вт/м·К) и малой толщины сапфировой подложки температура на исследуемой поверхности принималась равной температуре ИТО пленки, регистрируемой с помощью тепловизора. Тепловыделение на нагревателе осуществлялось посредством пропускания электрического тока. Согласно данным производителя шероховатость поверхности сапфировой подложки составила $R_a < 1$ нм. Оценка глубины захлаживания h_{cp} , выполненная согласно [12] с учетом экспериментальных данных по плотности центров парообразования, времени роста пузыря и его отрывного

диаметра, показала, что используемый в опытах нагревательный элемент можно считать толстостенным ($\delta/h_{\text{сп}} \sim 3$).

Визуализация процесса кипения жидкости проводилась с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры Phantom v.7,0 с частотой съемки 3 кГц. Для детального исследования эволюции области микрослоя и сухого пятна в работе был использован макрообъектив Nikon 105 mm f/2,8G. Пространственное разрешение видеосъемки в экспериментах составляло 33 мкм/пиксель. Для измерения нестационарного поля температур нагревательной поверхности применялась высокоскоростная термографическая камера Titanium HD 570M с частотой записи 1 кГц. Абсолютная погрешность измерения температуры с использованием данной камеры после проведения калибровочных экспериментов не превышала 1°C.

На рис. 1 представлены кадры высокоскоростной визуализации процесса формирования, роста и отрыва парового пузыря от нагревательной поверхности. Из фрагментов начальных моментов времени видеосъемки видно, что существуют две области: одна из них, ограниченная темной линией, соответствует внешнему диаметру основания пузыря, другая, светлая область, соответствует области микрослоя. То, что светлая область является участком микрослоевого испарения, было показано еще в работе [8] на основе сравнения ее результатов с данными, полученными с использованием ИК-термографии. Также это следует из результатов прямого сравнения данных настоящей работы с данными, полученными с использованием лазерной интерферометрии [11]. Как видно из рис. 1, после появления пузыря и его быстрого роста в центре активации в короткий промежуток времени (до 1 мс) формируется сухое пятно, ограниченное контактной линией. Со временем область сухого пятна расширяется за счет интенсивного испарения жидкости в области микрослоя. При этом было замечено, что форма границы сухого пятна изменяется со временем. По-видимому, при достижении определенных пороговых температурных напоров в области контактной линии на границе развивается неустойчивость, что приводит к формированию мелкомасштабных возмущений на фронте и повышению скорости распространения границы осушения. Однако для более детального анализа рассматриваемых процессов требуется проведение видеосъемки с более высокой частотой записи, а также с объективом-микроскопом для повышения пространственного разрешения. Как показал анализ данных высокоскоростной визуализации, стадия отрыва пузыря, соответствующая началу уменьшения размера области контактной линии, начинается в момент

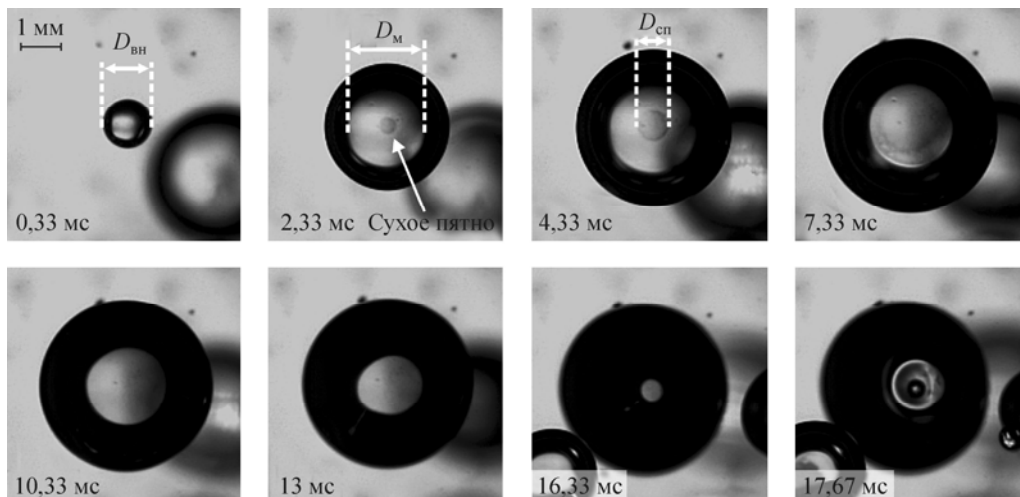


Рис. 1. Кадры высокоскоростной видеосъемки динамики роста и отрыва парового пузыря.
 $q = 31,5 \text{ кВт/м}^2$.

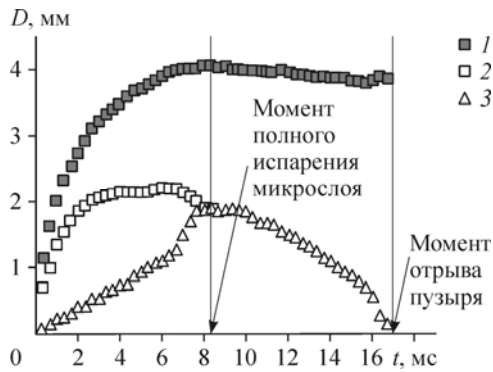


Рис. 2. Эволюция внешнего диаметра отдельного пузыря $D_{вн}$ (1), области микрослоя $D_{м}$ (2) и размеров сухого пятна $D_{сп}$ (3) во времени при кипении воды.
 $q = 31,5 \text{ кВт/м}^2$.

полного испарения микрослоя жидкости. Момент отрыва парового пузыря соответствует полному схлопыванию области контактной линии.

На рис. 2 представлены опытные данные по эволюции внешнего диаметра отдельного пузыря, области микрослоя,

а также размера сухого пятна во времени. Вертикальными линиями на графике отмечены времена полного испарения микрослоя и отрыва парового пузыря. Как было указано выше, в зависимости от стадии роста сухого пятна изменяется форма границы контактной линии. Из графика видно, что возникновение быстрорастущих мелкомасштабных возмущений приводит к увеличению средней скорости распространения границей сухого пятна. Также видно, что момент достижения границей сухого пятна границы области микрослоя соответствует началу уменьшения области контактной линии и, как следствие, началу стадии отрыва пузыря. Другими словами стадия отрыва парового пузыря начинается сразу после полного испарения жидкости в области микрослоя. На этой стадии внешний размер пузыря практически не изменяется.

В настоящей работе была проанализирована динамика роста и отрыва ансамбля пузырей, формирующихся в различных точках нагревательной поверхности при заданном тепловом потоке. Как видно из рис. 3, скорость роста и максимальный размер пузырей перед отрывом, как и размер области микрослоя, могут отличаться друг от друга. Связано это со следующим фактом. Как показал анализ данных эволюции локальной температуры поверхности под отдельными центрами парообразования, которые были получены с использованием ИК-термографии (рис. 4), пороговая температура активации различных центров может заметно отличаться, как и частота зародышеобразования для заданного теплового потока. Это приводит к тому, что запас тепла, необходимый для активации различных центров парообразования, может варьироваться в зависимости от локальных особенностей поверхности нагрева. На рис. 3 приведены расчетные зависимости для скорости роста паровых пузырей на обогреваемой стенке, полученные в работе [13]

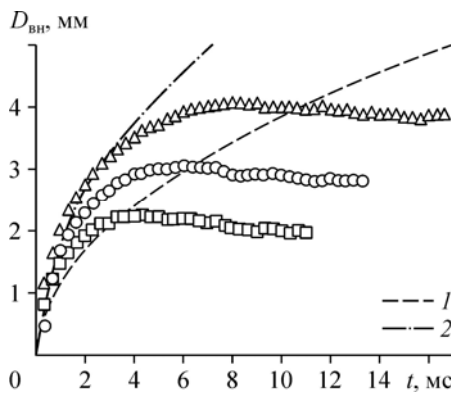


Рис. 3. Зависимость от времени диаметра паровых пузырей, формирующихся на различных центрах парообразования при тепловом потоке $q = 31,5 \text{ кВт/м}^2$ (символы). Результаты расчетов по модели [13] для $\Delta T = 13$ (1), 22 (2) К.

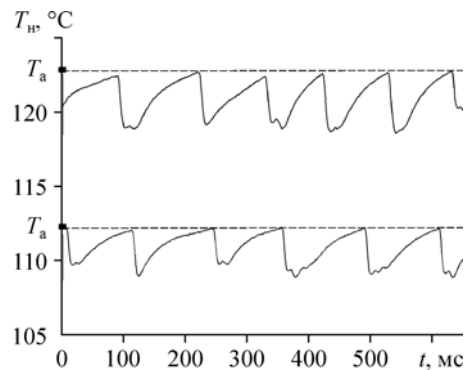


Рис. 4. Эволюция локальной температуры нагревательной поверхности под различными центрами парообразования.
 $q = 31,5 \text{ кВт/м}^2$.

и рассчитанные для различных чисел Якоба, соответствующих минимальному и максимальному перегреву поверхности в момент активации паровых пузырей. Как видно из рис. 3, опытные данные лежат в области, ограниченной теоретическими кривыми. Многие эмпирические зависимости, построенные для описания величины отрывного диаметра пузыря, в том числе модель, представленная в работе [14], также учитывают влияния числа Якоба на максимальный размер пузыря перед отрывом. Авторами настоящей работы был проведен статистический анализ по размерам отрывных диаметров пузырей при различных тепловых потоках. Было показано, что отрывной диаметр пузыря, например, для теплового потока $31,5 \text{ кВт/м}^2$ может варьироваться в достаточно широком диапазоне: от 1,5 до 4,5 мм.

На рис. 5 представлены опытные данные по скорости расширения сухого пятна в процессе роста парового пузыря. Показана зависимость изменения радиуса сухого пятна от времени для паровых пузырей, активируемых в различных точках нагревательной поверхности и имеющих разные отрывные диаметры, для различных тепловых потоков в диапазоне $30\text{--}102 \text{ кВт/м}^2$. Видно, что радиус контактной линии на продолжительной стадии линейно растет во времени и не зависит от внешнего размера области микрослоя. Повышение тепловой нагрузки приводит к незначительному увеличению скорости распространения границы сухого пятна. Таким образом, время полного испарения в первую очередь зависит от размера области микрослоя и в представленных экспериментах варьируется в диапазоне $5\text{--}11 \text{ мс}$. При этом оценки времени полного испарения жидкости в микрослое из уравнения теплового баланса, выполненные с учетом того, что толщина слоя жидкости равномерно распределена вдоль радиуса области микрослоя и равна 1 мкм [11], дают значения $20\text{--}50 \text{ мс}$. Полученные теоретические оценки показывают в несколько раз завышенные результаты по сравнению с опытными данными. В первую очередь это связано с тем, что для расчета времени полного испарения необходимо учитывать локальную плотность теплового потока, отводимого в жидкость за счет испарения микрослоя, которая, как показывает анализ, проведенный в работах [15, 16], может в несколько раз превышать плотность подводимого теплового потока. Более того для теоретического описания скорости распространения границы сухого пятна требуется знание реального распределения толщины пленки жидкости в области микрослоя.

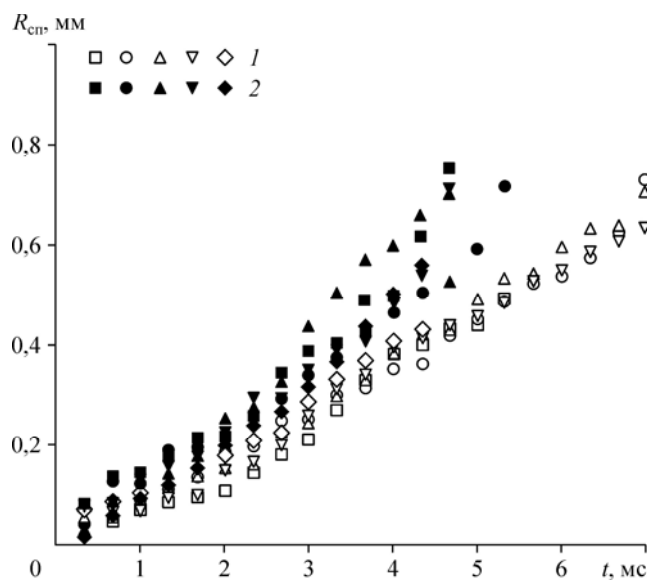


Рис. 5. Зависимость радиуса сухого пятна от времени для различных центров парообразования и тепловых потоков. $q = 31,5$ (1), $101,3$ (2) кВт/м^2 .

На рис. 6 представлены опытные данные по эволюции диаметра паровых пузырей и области микрослоя, построенные в относительных координатах для различных центров парообразования и тепловых нагрузок. По оси ординат внешний диаметр пузыря и размер области микрослоя были отнесены к величине отрывного диаметра для каждого пузыря, по оси абсцисс время отнесено ко времени отрыва пузыря от тепловыделяющей поверхности. Из графика видно, что в относительных координатах данные по динамике роста парового пузыря и эволюции области микрослоя, полученные для различных центров и тепловых потоков, практически совпадают друг с другом. Также можно увидеть, что размер области микрослоя связан с внешним диаметром парового пузыря, а максимальный размер этой области достигает величины $D_{отр}/2$. Время полного испарения варьируется в диапазоне $t/t_{отр} = 0,4-0,5$, а внешний диаметр пузыря достигает своего максимального размера уже при $t/t_{отр} = 0,3-0,4$.

В настоящей работе приведены новые опытные данные по эволюции паровых пузырей при кипении воды на прозрачном нагревателе в диапазоне тепловых потоков $q = 30-150 \text{ кВт/м}^2$, полученные с использованием высокоскоростной видеосъемки. Разработанная экспериментальная методика позволяет не только измерять внешний диаметр парового пузыря, но и регистрировать размеры области микрослоя жидкости и границу сухого пятна, а также исследовать нестационарное поле температур тепловыделяющей поверхности с использованием высокоскоростного ИК-сканера. В результате экспериментов показано, что максимальный отрывной диаметр при заданной тепловой нагрузке для различных центров парообразования может существенно изменяться в диапазоне 1,5–4,5 мм, что связано с различным порогом активации отдельных центров парообразования. Высокоскоростная видеосъемка продемонстрировала, что после образования парового зародыша и формирования области микрослоя в короткий промежуток времени (до 1 мс) в центре активации возникает сухое пятно. Обнаружены различные стадии распространения границы сухого пятна, при этом на начальной стадии (до возникновения мелкокомасштабных возмущений на границе контактной линии) скорость распространения постоянна во времени. Показано, что стадия отрыва пузыря, на которой его внешний диаметр практически не изменяется, начинается после полного испарения микрослоя жидкости под паровым пузырем. Полученная в исследовании экспериментальная

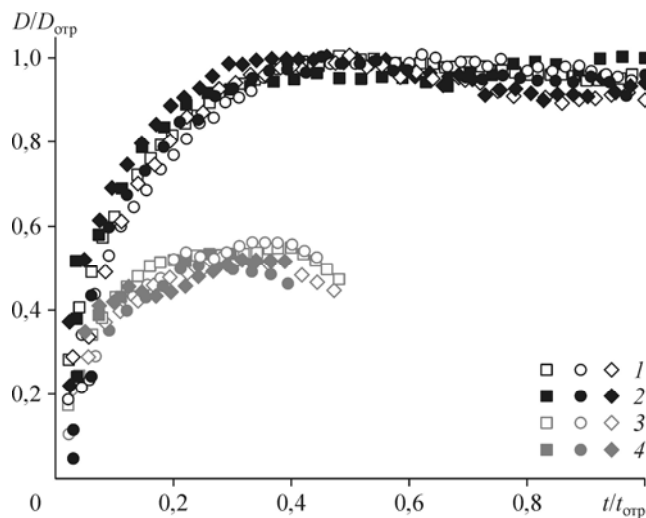


Рис. 6. Динамика роста паровых пузырей и области микрослоя для различных центров парообразования и тепловых потоков. $D_{вн}/D_{отр}$: $q = 31,5$ (1), $101,3$ (2) кВт/м^2 ; $D_{м}/D_{отр}$: $q = 31,5$ (3), $101,3$ (4) кВт/м^2 .

информация может использоваться в будущем для формирования новых теоретических подходов при описании основных локальных характеристик процесса кипения, включая эволюцию различных областей теплообмена под паровым пузырьком, отрывной диаметр пузыря, частоту зародышеобразования и т.д.

Список литературы

1. **Ягов В.В.** Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М: Издательский дом МЭИ, 2014. 542 с.
2. **Лабунцов Д.А.** Механизм роста паровых пузырьков на поверхности нагрева при кипении // Инженерно-физический журнал. 1963. Т. 6, № 4. С. 33–40.
3. **Cooper M.G., Lloyd A.J.P.** The microlayer in nucleate pool boiling // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1969. Vol. 12, No. 8. P. 895–913.
4. **Siedel S., Cioulachtjian S., Bonjour J.** Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008. Vol. 32, No. 8. P. 1504–1511.
5. **Kenning D.B.R.** Optical studies of boiling heat transfer: insights and limitations // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 2004. Vol. 25, No. 2. P. 209–222.
6. **Gao M., Zhang L., Cheng P., Quan X.** An investigation of microlayer beneath nucleation bubble by laser interferometric method // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 57, No. 1. P. 183–189.
7. **Chen Z., Haginiwa A., Utaka Y.** Detailed structure of microlayer in nucleate pool boiling for water measured by laser interferometric method // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 108. P. 1285–1291.
8. **Gerardi C., Buongiorno J., Hu L.W., McKrell T.** Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, No. 19. P. 4185–4192.
9. **Golobic L., Petkovsek J., Kenning D.B.R.** Bubble growth and horizontal coalescence in saturated pool boiling on a titanium foil, investigated by high-speed IR thermography // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55, No. 4. P. 1385–1402.
10. **Суртаев А.С., Сердюков В.С., Моисеев М.И.** Применение высокоскоростной инфракрасной термографии для исследования кипения жидкости // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 4. С. 140–145.
11. **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 // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 73. P. 365–375.
12. **Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.** Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 289 с.
13. **Лабунцов Д. А.** Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1963. Т. 1. С. 58–71.
14. **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.
15. **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.
16. **Surtaev A., Serdyukov V., Chernyavskiy A.** Study of thermal behavior of microlayer under vapor bubble at liquid boiling // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 159. P. 00051-1–00051-5.

*Статья поступила в редакцию 5 мая 2017 г.,
после доработки — 15 июня 2017 г.*