

УДК 621.019

Исследование роста и колебаний парового пузыря на плоской поверхности нагрева в большом объеме

Д.А. Устинов, Д.В. Сиденков, Ю.А. Кузма-Кичта, А.А. Устинов, А.К. Устинов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия
 e-mail: dmitry.ustinov@gmail.com, sidenkovdv@mpei.ru, kuzma@itf.mpei.ac.ru,
 alexander.ustinov@gmail.com, uw@bk.ru

Поступила в редакцию 11.06.2019

После доработки 24.06.2019

Принята к публикации 8.07.2019

Исследование работы центра парообразования проведено на плоской нагреваемой поверхности в большом объеме жидкости. Методика исследования колебаний парового пузыря основывалась на фиксации рассеянного зондирующего лазерного излучения поверхностью пузыря. Впервые получены фазовые портреты колебаний интенсивности зондирующего лазерного пучка, возникающие от оптических неоднородностей над непрерывно работающим центром парообразования. Фазовые портреты в фазовой области представляют комплекс замкнутых орбит различных масштабов. Полученные временные сигналы отраженного от поверхности парового пузыря зондирующего лазерного излучения свидетельствуют о хаотическом процессе колебания парового пузыря, а зависимость диаметра парового пузыря от времени отличается от ранее принятой закономерности. Отрывные диаметры паровых пузырей были равны 1.5 мм.

Ключевые слова: паровой пузырь, центр парообразования, колебания, фазовый портрет, лазер.

Ранее колебания парового пузыря при его росте исследованы в работах [1–6]. Эксперименты проводились на цилиндрической поверхности. Колебания парового пузыря регистрировались оптическим методом [7, 8] по затенению оптического пучка паровым пузырем. Было установлено, что при росте парового пузыря на поверхности нагрева перед отрывом он испытывает колебания объема и формы. Модель колебаний описана системой нелинейных дифференциальных уравнений [3, 7, 9–14], решение которой приводит к странному аттрактору.

Настоящее исследование проведено на плоской нагреваемой поверхности в большом объеме. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Ход зондирующего лазерного пучка показан до начала кипения.

Рабочий участок представлял собой стеклянную призму из полированного жаропрочного стекла размером 18×30×30 мм. В качестве нагревающего элемента использовался диск с нагревательными элементами со стабилизированным источником питания Matrix модель MPS-6005L-1. Оптическая измерительная схема включала в себя гелий-неоновый лазер ЛГН-207

в качестве источника излучения и фотодиод ФД-24 как приемник оптического излучения. На рис. 2 представлена измерительная часть экспериментальной установки вместе с рабочим участком.

Методика исследования колебаний парового пузыря основыва-

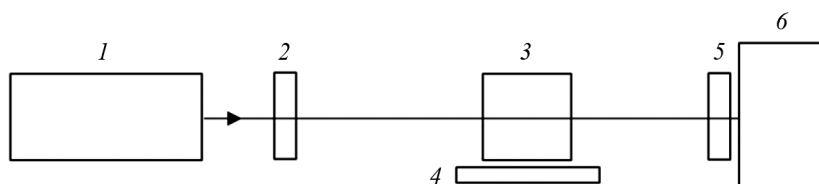


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию роста одиночного парового пузыря: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – коллиматор; 3 – рабочий участок; 4 – нагреватель; 5 – фотоприемник; 6 – вычислительный комплекс

лась на фиксации рассеянного зондирующего лазерного излучения поверхностью пузыря. На рис. 3 представлена принципиальная схема измерения. На рис. 4 – фото рабочего участка.

Кроме того для измерения температурных полей использовался тепловизор SAT S-280. На рис. 5 представлены результаты измерений тепловизором температурных полей, а на рис. 6 – изменение температурного поля вдоль измерительных линий L01, L02 и L03. По вертикальной оси отложены значения температуры в градусах Цельсия, а по горизонтальной – длина линий в мм, вдоль которых происходит изменение температуры.

В экспериментах в качестве рабочего тела использовалась деаэрированная дистиллированная вода. Температура жидкости изменялась от 79 до 95°C, температура нижней стенки кюветы от 105 до 116°C.



Рис. 2. Измерительная часть экспериментальной установки с рабочим участком

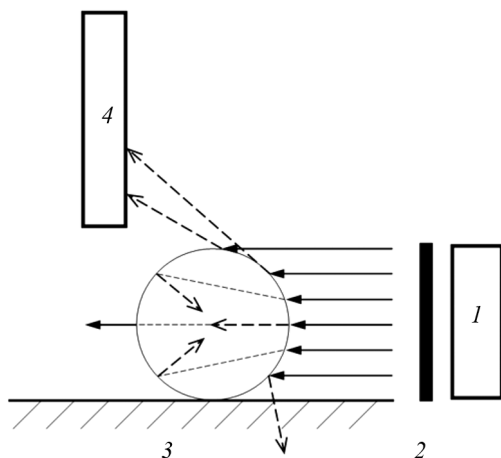


Рис. 3. Принципиальная схема измерительной части экспериментальной установки: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – коллиматор; 3 – поверхность нагрева; 4 – фотоприемник

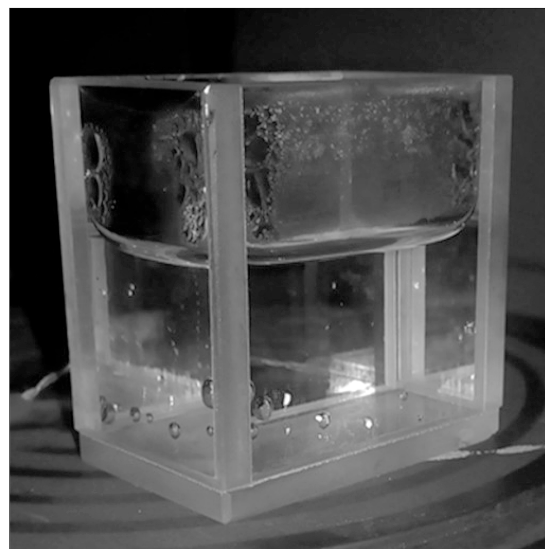


Рис. 4. Рабочий участок

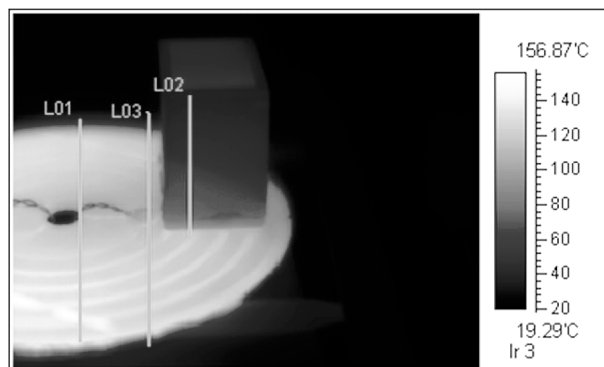


Рис. 5. Температурные поля, фиксируемые тепловизором

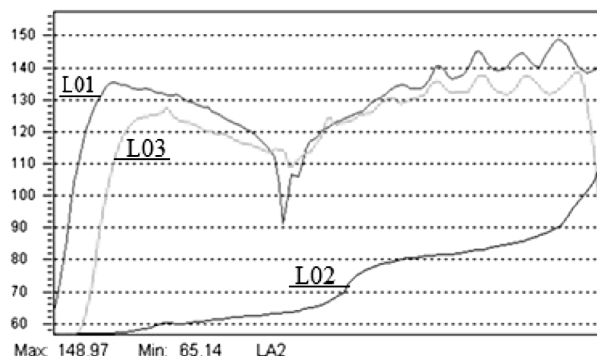


Рис. 6. Изменение температурного поля вдоль измерительных линий

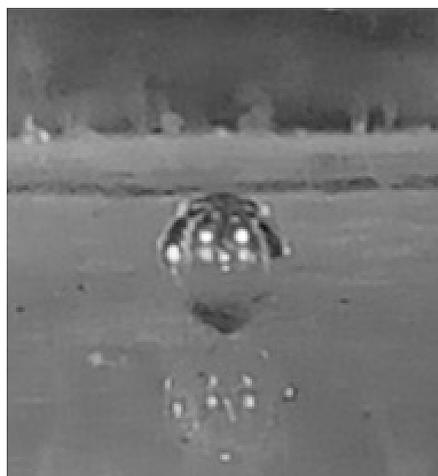


Рис. 7. Паровой пузырь над центром парообразования перед отрывом (диаметр пузыря 1.5 мм)

Особенностью проводимых экспериментов было то, что удалось наблюдать паровой пузырь от зарождения до отрыва от поверхности нагрева на центре парообразования в течение нескольких десятков секунд. Это позволило непосредственно измерять диаметры паровых пузырей. В качестве примера на рис. 7 представлен паровой пузырь на поверхности нагрева перед отрывом от нее. Фото получено при подсветке лазерным пучком поверхности парового пузырька.

Был отмечен тот факт, что по мере роста парового пузыря наступают моменты, когда пузырь начинает совершать интенсивные колебания, после чего наступают моменты, когда колебания не наблюдаются, и затем вновь возникают интенсивные колебания вплоть до отрыва пузыря от поверхности нагрева.

На рис. 8 представлена временная развертка колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированного поверхностью парового пузыря до момента его отрыва от поверхности.

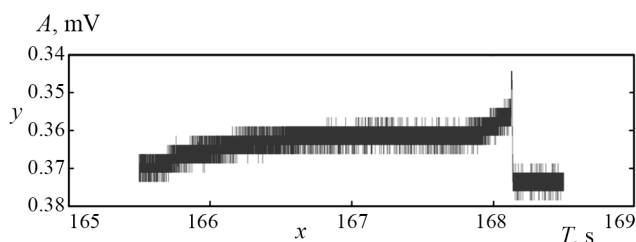


Рис. 8. Временная развертка колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированного поверхностью парового пузыря до момента его отрыва от поверхности

отрыва от поверхности. Амплитуда сигнала пропорциональна отражающей поверхности парового пузыря, а скачок интенсивности на временной развертке сигнала соответствует моменту отрыва парового пузыря от поверхности нагрева.

Методика исследования роста и колебаний одиночного парового пузыря заключалась в непрерывной фиксации интенсивности лазерного пучка, проходящего непосредственно над центром парообразования.

Кювета с водой, подогретой до 80°C, нагревалось электрическим нагревательным элементом постоянного тока до образования паровых пузырей. Образование, рост и отрыв пузырей фиксировались в непрерывном режиме.

Имея запись зависимости наблюдаемой переменной от времени $x = x(t)$, зададимся некоторым временным шагом τ и целым числом m и построим m -мерный вектор, компонентами которого являются значения x в моменты времени $t, t-\tau, t-2\tau, \dots, t-(m-1)\tau$, т.е.

$$x(t) = (x(t), x(t-\tau), x(t-2\tau), \dots, x(t-(m-1)\tau)).$$

В случае трехмерного фазового пространства определяем по автокорреляционной функции временной масштаб τ , когда корреляционная функция R принимает нулевое значение.

Корреляционная функция R строится следующим образом [15].

Пусть $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ – выборка из n наблюдений пары переменных (X, Y) .

Выборочный коэффициент корреляции определяется как

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}},$$

где \bar{X}, \bar{Y} – выборочные средние, определяющиеся следующим образом:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i; \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i.$$

На основе этого временного масштаба строятся три последовательности временного сигнала: $x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau)$, которые образуют тройки независимых координат ($R = 0$) в фазовом пространстве.

Вектор $x(t)$ задает точку в m -мерном пространстве, которая с течением времени t переме-

щается по некоторой траектории. В дискретном случае полагаем

$$x_k = (x_k, x_{k-p}, x_{k-2p}, \dots, x_{k-(m-1)p}),$$

где p – фиксированное число, например, 1, 2, 3, ... При переборе по k получаем дискретный набор точек m -мерного пространства. Если предположить, что мы имеем дело с установившимся режимом колебаний диссипативной системы, то возникающая при таком построении картина представляет собой фазовый портрет аттрактора [16, 17].

На рис. 9 представлены поэтапно стадии этого процесса для недогрева 10°C . На рис. 9, *a* – временная развертка сигнала изменения интенсивности модулированного оптическими неоднородностями лазерного зондирующего пучка. Далее (рис. 9, *б*) – автокорреляционная функция сигнала, по которой определяем масштаб Тейлора задержки временного сигнала. На основе данных, представленных на этих рисунках, строится фазовый портрет колебаний интенсивности зондирующего лазерного пучка (рис. 9, *в*). Характерным является наличие нескольких областей фазового пространства, где происходят колебания разных масштабов. На рис. 9, *г* приведено сечение Пуанкаре, которое представляет собой набор связанных между собой замкнутых орбит в фазовом пространстве.

С уменьшением недогрева на 5°C происходит перестройка процесса колебания парового пузыря. На рис. 10 представлены рост парового пузыря, его колебания и отрыв от поверхности. Фазовый портрет становится более заполненным в фазовой области, что соответствует более развитым колебаниям в момент роста и отрыва парового пузыря от поверхности нагрева. Колебания имеют вид периодических орбит в фазовом пространстве (рис. 10, *в*).

После отрыва парового пузыря от поверхности нагрева центр парообразования заполняется жидкостью и начинается вновь процесс генерации паровой фазы (рис. 11). Характерным является отсутствие крупномасштабных низкочастотных колебаний интенсивности рассеянного оптически неоднородностями зондирующего лазерного излучения (рис. 11, *a*). Фазовый портрет вырождается в небольшую область колебаний в начале координат (рис. 11, *б*).

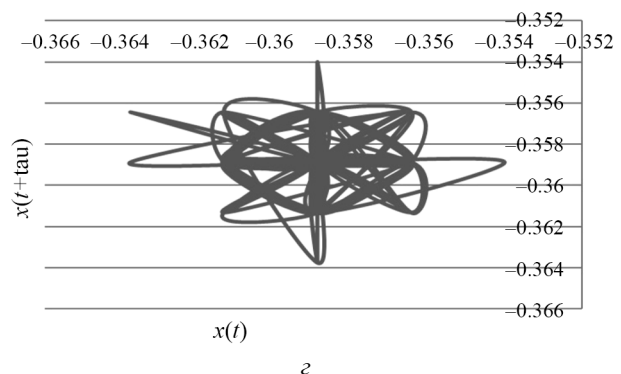
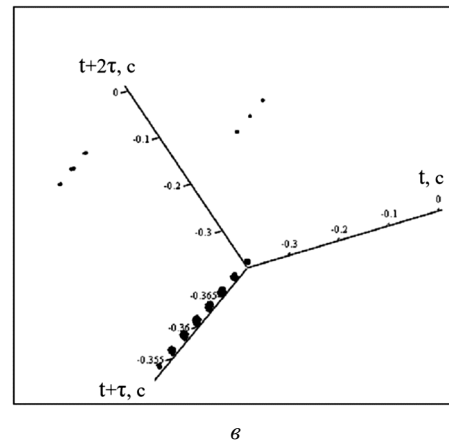
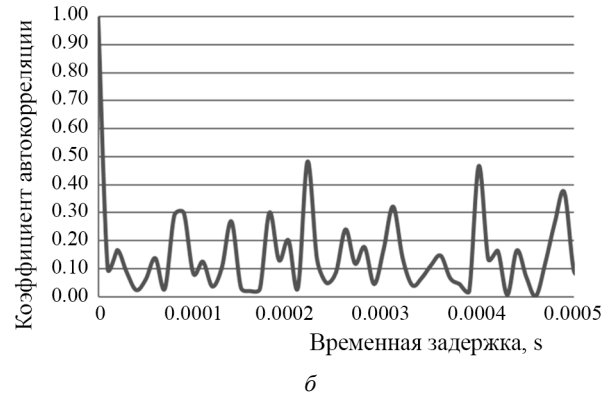
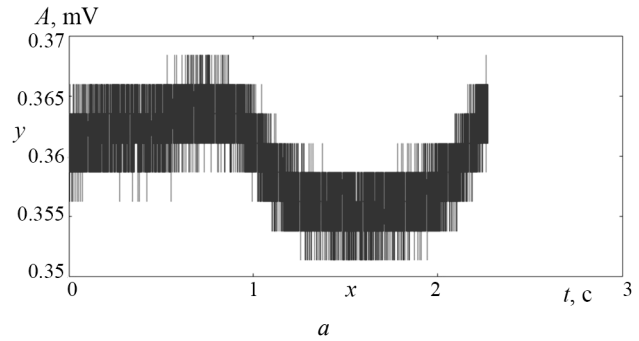


Рис. 9. Временная развертка (*a*), автокорреляционная функция временного сигнала (*б*), фазовый портрет (*в*) и сечение Пуанкаре фазового портрета (*г*) колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированным парового пузыря

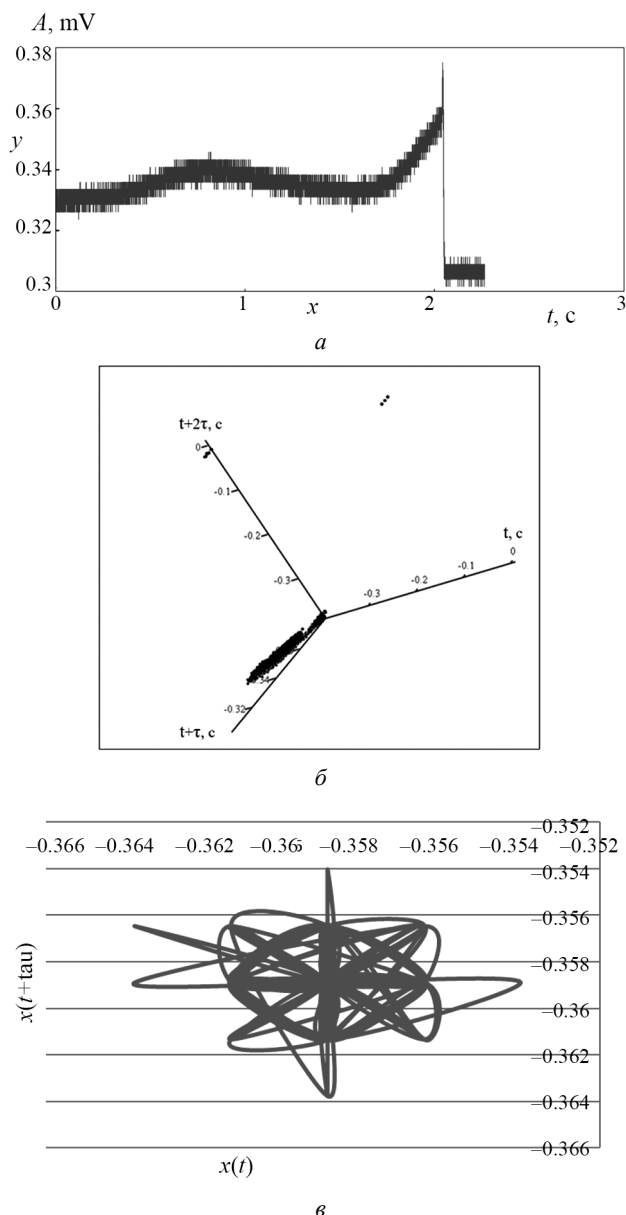


Рис. 10. Временная развертка (а), фазовый портрет (б) и сечение Пуанкаре фазового портрета (в) колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированного поверхностью парового пузыря, в момент его роста и отрыва от стенки

Проведенные эксперименты позволили впервые получить фазовые портреты колебаний интенсивности зондирующего лазерного пучка, возникающих от оптических неоднородностей над непрерывно работающим центром парообразования. В опытах непрерывно фиксировались колебания паровых пузырей при росте на центре парообразования и их отрыв от поверхности нагрева. Фазовые портреты в фазовой области представляют комплекс замкнутых орбит различных масштабов. Полученные временные

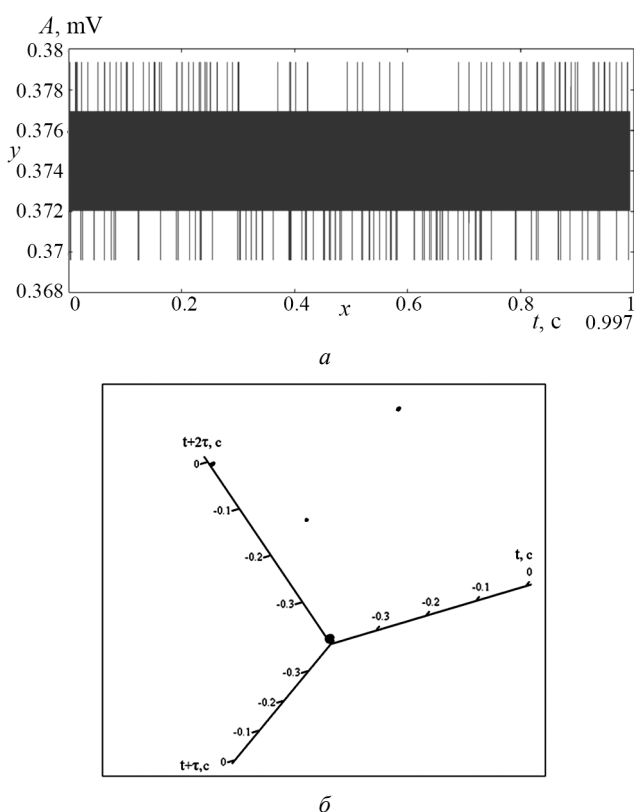


Рис. 11. Временная развертка (а) и фазовый портрет (б) колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированного жидкостью в области расположения центра парообразования

сигналы отраженного от поверхности парового пузыря зондирующего лазерного излучения и их анализ свидетельствуют о хаотическом процессе колебания парового пузыря [18, 19] и отличии от принятой ранее закономерности роста парового пузыря от времени [4, 20]. Измеренные прямым методом отрывные диаметры паровых пузырей составили 1.5 мм. Экспериментальные данные, полученные в работе, позволяют уточнить классическую теорию кипения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of interface oscillation during boiling by the method of laser and acoustic diagnostics // The Engineering Foundation Conference. Boiling 2000: Phenomena and Emerging Applications. April 30 – May 5, Anchorage, Alaska, USA. Vol. 1. P. 100–115.
2. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of interface oscillation during boiling // Proc. of 12th International Heat Transfer Conference 2002, Grenoble, France. Vol. 3. P. 527–533.
3. **Устинов А.А.** Исследование колебаний границы раздела фаз при кипении. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва. МЭИ. 2005.

4. Лабунцов Д.А. Механизм роста паровых пузырьков на поверхности нагрева при кипении // Инженерно-физический журнал. 1963. Т. 6. № 4. С. 33–39.
5. Лабунцов Д.А., Кольчугин Б.А., Головин В.С., Захарова Э.А., Владимиров 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.
6. Лабунцов Д.А. Современные представления о механизме кипения жидкостей // Теплообмен и физическая газодинамика. М.: Изд. АН. СССР, 1974. С. 98–115
7. Кузма-Кичта Ю.А., Петухов Б.С., Ковалев С.А., Жуков В.М. Методика исследования колебаний границы раздела фаз при пленочном кипении жидкости с помощью оптического квантового генератора // Инженерно-физический журнал. 1973. Т. XXV. С. 20–25.
8. Petukhov B.S., Kovalev S.A., Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Yu.A. Investigation of the mechanism of heat transfer upon film boiling of liquid // Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf. Tokyo. 1974. N 4. P. 96–99.
9. Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A. Investigation of boiling process by the method of laser and acoustic diagnostics // 3rd European Thermal Sciences Conference. September 10–13, 2000. Heidelberg, Germany. V. 2. P. 785–803.
10. Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P. Analysis of interface oscillations during boiling // The Third International Conference on Transport Phenomena in Multiphase System. Kielce – Baranow Sand. Poland, June 24–27, 2002. P. 45–53.
11. Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P. Analysis of interface oscillations during boiling // Archives of Thermodynamics, Proceedings of Polish Academy of Science. 2003. V. 24. N 1. P. 17–23.
12. Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А., Холпанов Л.П. Моделирование колебаний парового пузыря при его росте на поверхности нагрева // 3^я РНКТ. Москва, Россия, 20–25 октября, 2002. Т. 4. С. 241–245.
13. Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А. Исследование колебаний парового пузыря, растущего на стенке // Международная конференция по оптическим методам измерений многофазных потоков. Москва, Россия, 20–25 февраля, 2003. Т. 2. С. 121–123.
14. Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А., Холпанов Л.П. Моделирование колебаний границы раздела фаз при кипении // Теоретические основы химической технологии. 2002. Т. 6. С. 2–24.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
16. Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica 16D. 1985. P. 285–317.
17. Zeng X., Eykholt R., Pielke R.A. Estimating the lyapunov-exponent spectrum from time series of low precision // Physical review letters. 1991. V. 66. N 25. P. 3229–3232.
18. Mosdorf R., Shoji M. Chaos in nucleate boiling–nonlinear analysis and modeling // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 1515–1524.
19. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. Begell. 2016. 630 p.
20. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. К вопросу о скорости роста паровых пузырей при кипении // Труды МЭИ. 1975. Вып. 268. С. 3–15.

Studying steam bubble growth and oscillations on a flat heating surface in a large volume

Ustinov D.A., Sidenkov D.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.A., Ustinov A.K.

*Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 112250 Russia
e-mail: dmitry.ustinov@gmail.com, sidenkovdv@mpei.ru,
kuzma@itf.mpei.ac.ru, alexander.ustinov@gmail.com, uw@bk.ru*

The present study of steam center of steam formation was performed on a flat surface being heated, in a large volume of liquid. The working section represented a glass prism made of polished heat-resistant glass of the 18×30×30 mm size. Optical measuring system included single-mode helium-neon laser as a radiation source, and FD-24 photo-diode as a radiation receiver. The steam bubble oscillations studying technique was based on the scattered radiation fixation of the probing laser beam by the bubble surface. The conducted experiments allowed obtaining for the first time the phase portraits of the probing laser beam oscillation intensity, occurring due to optical non-uniformities above the continuously operating steam center. Steam bubbles oscillations while their growth at the steam center and breaking from the heating surface were continuously recorded. Phase portraits in the phase area represent a complex of closed orbits of various scales. The obtained time signals of the probing laser radiation reflected from the steam bubble surface and their analysis give evidence of chaotic steam bubble oscillations process, and difference from the accepted dependence of the steam bubble growth on time. Diameters of steam bubbles at departure, measured by the direct method, were of 1.5 mm. Experimental data obtained in the present work will allow clarifying the classical theory of boiling.

Keywords: vapor bubble, vaporization center, oscillations, phase portrait, laser.

REFERENCES

1. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of the interface oscillation during boiling. *Proc. of Engineering Foundation Conference. Boiling 2000: Phenomena and Emerging Applications*. April 30 – May 5, Anchorage, Alaska, USA, 2000, vol. 1, pp. 100–115.
2. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of interface oscillation during boiling. *Proc. of 12th International Heat Transfer Conference*, Grenoble, France, 2002, vol. 3, pp. 527–533.
3. **Ustinov A.A.** *Issledovanie kolebanij granitsy razdela faz pri kipenii*. Diss.cand. tech. nauk [Investigation of phase boundary oscillations during boiling. Cand.techn. sci.diss.]. Moscow, MEI, 2005.
4. **Labuntsov D.A.** Mekhanizm rosta parovykh puzyr'kov na poverkhnosti nagreva pri kipenii [The mechanism of growth of vapor bubbles on the heating surface during boiling]. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1963, vol. 6, no. 4, pp. 33–39. In Russ.
5. **Labuntsov D.A., Kolchugin B.A., Golovin V.S., Zakharova E.A., Vladimirova L.N.** Issledovanie pri pomoshhi skorostnoj kinos'emki rosta puzyr'kov pri kipenii nasyshhennoj vody v shirokom diapazone izmeneniya davlenij [Research with the help of high-speed filming of the growth of bubbles during boiling saturated water in a wide range of pressure variations]. *Teplofizika vysokikh temperatur – High Temperature*, 1964, vol. 2, no. 3, pp. 446–453. In Russ.
6. **Labuntsov D.A.** *Sovremennye predstavleniya o mekhanizme kipeniya zhidkostej* [Modern ideas about the mechanism of boiling liquids]. *Teploobmen i fizicheskaya gazodinamika* [Heat transfer and physical gas dynamics]. Moscow, Publisher AS USSR, 1974, pp. 98–115. In Russ.
7. **Kuzma-Kichta Yu.A., Petukhov B.S., Kovalev S.A., Zhukov V.M.** Metodika issledovaniya kolebanij granitsy razdela faz pri plenochnom kipenii zhidkosti s pomoshh'yu opticheskogo kvantovogo generatora [Methods of investigation of interface fluctuations at nucleate liquid boiling using an optical quantum generator] *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal – Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1973, vol. 25, no. 1, pp. 20–25. In Russ.
8. **Petukhov B.S., Kovalev S.A., Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Yu.A.** Investigation of the mechanism of heat transfer upon film boiling of liquid. *Proc. of 5th Int. Heat Transfer Conf. Tokyo*, 1974, no. 4, pp. 96–99.
9. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of boiling process by the method of laser and acoustic diagnostics. *Proc. of 3rd European Thermal Sciences Conference, Heidelberg, Germany*, 2000, vol. 2, pp. 785–803.
10. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P.** Analysis of interface oscillations during boiling. *Proc. of 3rd International Conference on Transport Phenomena in Multiphase System. Kielce – Baranow Sand. Poland*, 2002, pp. 45–53.
11. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P.** Analysis of interface oscillations during boiling. *Archives of Thermodynamics, Proceedings of Polish Academy of Science*, 2003, vol. 24, no. 1, pp. 17–23.
12. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P.** Modelirovanie kolebanij parovogo puzyrya pri ego roste na poverkhnosti nagreva [Simulation of steam bubble oscillations during its growth on the heating surface]. *Trudy 3 Rossijskoj natsional'noj konferentsii po teploobmenu* [Proceedings of the Third Russian National Conference on Heat Exchange], 2002, vol. 4, pp. 241–245. In Russ.
13. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Issledovanie kolebanij parovogo puzyrya, rastushhego na stenke [The study of the oscillations of the vapor bubble growing on the wall]. *Trudy Mezhdunarodnoj konferentsii po opticheskim metodam izmerenij mnogofaznykh potokov* [Proc of International Conference on Optical Methods for Measuring Multiphase Flows]. Moscow, 2003, vol. 2, pp. 121–123. In Russ.
14. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P.** Modelirovanie kolebanij granitsy razdela faz pri kipenii [Simulation of phase boundary oscillations during boiling]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii – Theoretical foundations of chemical technology*, 2002, vol. 6, pp. 2–24. In Russ.
15. **Bendat J.S., Piersol A.G.** *Random data: analysis and measurement procedures*, Wiley, 1986, 566 p. (Russ. ed, Bendat J., Piersol A. Prikladnoj analiz sluchajnykh dannykh, Moscow: Mir, 1989, 540 p.).
16. **Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Vastano J.A.** Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica 16D*, 1985, pp. 285–317.
17. **Zeng X., Eykholt R., Pielke R.A.** Estimating the lyapunov-exponent spectrum from time series of low precision, *Physical review letters*, 1991, vol. 66, no. 25, pp. 3229–3232.
18. **Mosdorf R., Shoji M.** Chaos in nucleate boiling–nonlinear analysis and modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 1515–1524.
19. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** *Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales*. Begell, 2016. 630 p.
20. **Labuntsov D.A., Yagov V.V.** K voprosu o skorosti rosta parovykh puzyrej pri kipenii [On the growth rate of steam bubbles at boiling]. *Trudy Moskovskogo ehnergeticheskogo universiteta – Proc. of Moscow Power Engineering Institute*, 1975, no. 268, pp. 3–15. In Russ.