

Ю.А. Кузма-Кичта¹, А.А. Устинов², А.К. Устинов¹, Л.П. Холпанов³

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)
 Университет Падеборна, Институт промышленной теплотехники, Германия (2)
 Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия (3)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ЕГО РОСТЕ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

АННОТАЦИЯ

Представлены данные по колебаниям парового пузыря при его росте на стенке при кипении воды в большом объеме при атмосферном давлении, полученные с помощью лазерной диагностики. Проведен корреляционный анализ сигнала оптического датчика, который позволил определить макро- и микромаштабы Тейлора для колебаний парового пузыря. Предложена методика выбора временной задержки для построения фазовых портретов по ограниченному набору экспериментальных данных, измеренных с погрешностью. Построен фазовый портрет по экспериментальным данным, и рассчитан максимальный показатель Ляпунова. Для системы модельных уравнений получены фазовые портреты колебаний парового пузыря, и рассчитаны показатели Ляпунова.

1. ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальными вопросами в физике кипения являются зарождение, рост и отрыв от поверхности нагрева парового пузыря. Процессы, происходящие на этих стадиях, оказывают определяющее влияние на динамику паровых пузырей, а следовательно, и на теплообмен при кипении. В работах [1–6] показано, что при пузырьковом и пленочном кипении как с недогревом жидкости, так и в состоянии насыщения происходят колебания границы раздела фаз и колебания температуры стенки, которые при определенных условиях могут быть хаотическими. В работах [7–12] колебания межфазной границы исследованы методами хаотической динамики.

Однако для пузырькового кипения, имеющиеся данные крайне ограничены, и не исследованы причины и закономерности изменения колебаний границы раздела фаз.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ЕГО РОСТЕ НА СТЕНКЕ

2.1. Экспериментальная установка

Колебания границы раздела фаз при кипении воды в большом объеме на горизонтальном цилиндре исследованы на модернизированной установке, которая была разработана для изучения механизма передачи тепла при пленочном кипении [1]. На рис.1 изображена принципиальная схема методики, используемой для исследования колебаний границы раздела фаз при кипении. Источником лазерного излучения служит гелий-неоновый лазер 1 с дли-

ной волны $\lambda = 0.63$ мкм. В качестве поверхности нагрева выбрана трубка из нержавеющей стали внешним диаметром 3 мм с толщиной стенки 0,5 мм, расположенная горизонтально 3. Фотодатчик 4, представляющий собой фотодиод, выбранный с максимальной чувствительностью в диапазоне длин волн, соответствующих красному свету, воспринимает прошедшее через диафрагму 2 и рабочую камеру излучение. Пучок излучения проходит возле рабочего участка 3 над центром парообразования. При росте пузыря сигнал фотодатчика меняется во времени от момента зарождения парового пузыря до его отрыва. Волновые процессы, возникающие при этом в жидкой фазе, регистрируются акустическим датчиком 5. В экспериментах измерялись: температура жидкости, температура теплоотдающей поверхности, и сигналы оптического и акустического датчиков. Сигналы оптического и акустического датчиков подавались на двухканальный запоминающий осциллограф, соединенный с персональным компьютером. Опыты проведены при атмосферном давлении и недогревах воды до 15 К, при небольших тепловых нагрузках, при которых на поверхности возникали отдельные паровые пузыри.

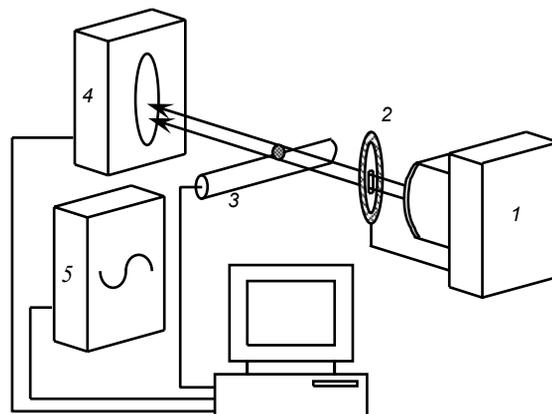


Рис. 1. Схема методики исследования

Температура рабочего участка и жидкости измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, погрешность измерений составляла 0,3 К, погрешность определения теплоотдачи составляла 13%, диаметра парового пузыря – до 32%.

2.2. Результаты экспериментального исследования

При исследовании роста паровых пузырей зафиксированы колебания границы разделы фаз

(рис.2). В работе используется автокорреляционный анализ сигнала оптического датчика. Для этого найдены коэффициенты корреляции сигнала и рассчитаны временные макро- и микромасштабы Тейлора и аппроксимации размеров парового пузыря во время его роста (корреляционная размерность) в виде $N(r) \sim r_f^\nu$ (рис. 3, 4). Здесь N – число точек, а r_f – расстояние между ними в фазовом пространстве; ν – корреляционная размерность. На рис. 4 представлены аппроксимации временного сигнала роста парового пузыря для различных временных задержек τ . Для временной задержки $\tau = 5.7$ мс корреляционная размерность $\nu = 0.49$, что близко к общепринятым зависимостям изменения радиуса парового пузыря от времени в степени 0,5. Для временных задержек $\tau = 0,1$ мс и $\tau = 7,0$ мс корреляционные размерности ν отвечают другим законам роста парового пузыря и не описывают адекватно физическое явление. Поэтому при построении фазовых портретов в качестве временной задержки выбраны Тейлоровские временные макро- и микромасштабы. Используя значение временной задержки τ , равной среднему арифметическому между временными масштабами Тейлора, построен фазовый портрет по экспериментальным данным (рис. 5), временная задержка $\tau = 5.7$ мс. Как видно, паровой пузырь небольших размеров испытывает большие флуктуации. Для анализа колебаний парового пузыря при его росте на стенке использована методика, основанная на расчете коэффициентов Ляпунова [13,14]. Максимальный показатель Ляпунова находится как:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^N \log_2 \frac{L(t_i)}{L(t_{i-1})}, \quad (1)$$

где $L(t_i)$ – расстояние между двумя точками на фазовом портрете в i -й момент времени, N – число измерений, τ – значение временной задержки.

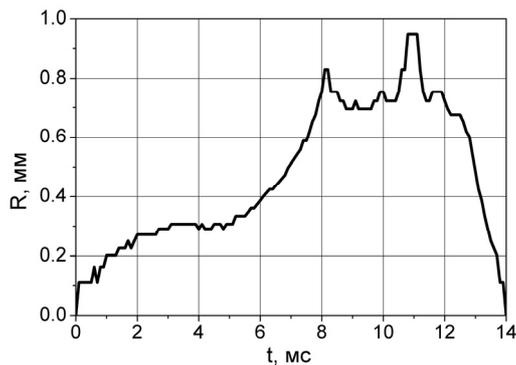


Рис. 2. Рост пузыря на стенке: вода $p = 0,1$ МПа, $q = 52$ кВт/м², $\Delta T_{\text{нед}} = 9$ К

Для изучения характеристик колебаний границы раздела фаз рассчитан максимальный показатель Ляпунова для ограниченного набора экспериментальных данных. Для данной временной задержки найден показатель Ляпунова $\lambda_1 = 0.0515$. Положительное значение показателя Ляпунова свидетельствует о возможности возникновения хаотических колебаний границы раздела фаз.

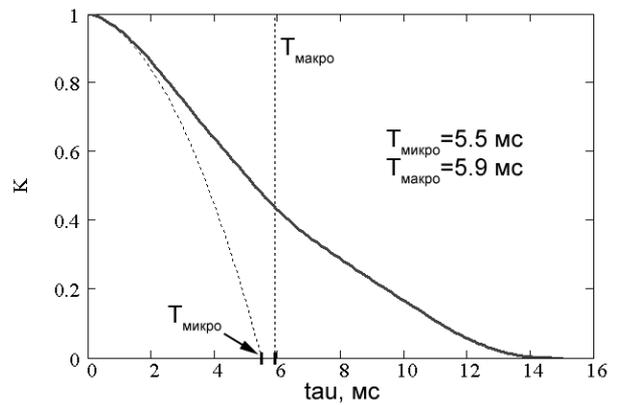


Рис. 3. Коэффициент корреляции и временные макро- и микромасштабы Тейлора колебаний парового пузыря

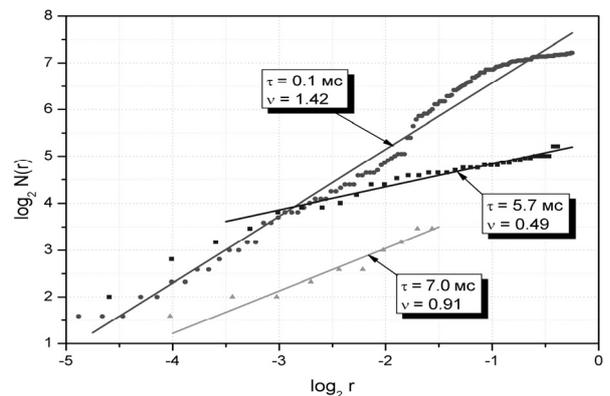


Рис. 4. Аппроксимация роста парового пузыря степенной функций

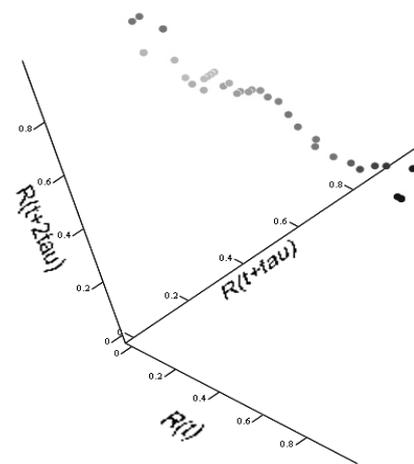


Рис. 5. Фазовый портрет колебаний парового пузыря, построенный по экспериментальным данным

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ КОЛЕБАНИЙ ПАРОВОГО ПУЗЫРЯ ПРИ ЕГО РОСТЕ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

Система модельных уравнений, описанная в [7], включает в себя уравнение баланса массы в паровом пузыре (2), уравнение движения (3) и уравнение эволюции толщины теплового слоя жидкости, окружающего пузырь, во времени (4):

$$2\pi R h j - \lambda \frac{\Delta T_{\text{ж}}}{\delta} \frac{4\pi R^2 - 2\pi R h}{r} = \left(\rho_{\text{п}} \frac{4}{3} \pi R^3 \right); \quad (2)$$

$$R \ddot{R} + 3\dot{R} \left| \dot{R} \right| = \frac{6}{\rho_{\text{ж}}} \left(p_{\text{п}} - \frac{2\sigma}{R} - p_{\text{ж}} \right); \quad (3)$$

$$\dot{\delta} = -\frac{\lambda}{r \rho_{\text{п}}} \Delta T_{\text{ж}} \frac{\delta(2R + \delta)}{(R + \delta)^2}. \quad (4)$$

Разработанная модель описывает колебания паровых пузырьков при их росте на поверхности нагрева. Расчеты согласно предложенной модели показывают, что колебания межфазной поверхности в зависимости от недогрева жидкости и теплового потока на стенке могут происходить в диапазоне от 40 Гц до 24 кГц. Согласно расчету с увеличением недогрева жидкости растет частота, и уменьшается амплитуда колебаний границы раздела фаз.

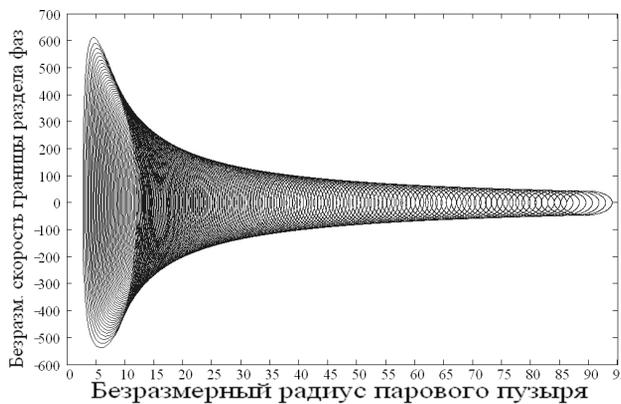


Рис. 6. $\left(R, \dot{R} \right)$ – проекция 4-мерного фазового портрета исследованной системы уравнений

Фазовый портрет (рис. 6), построенный в проекции на оси $\left(R, \dot{R} \right)$, показывает, что маленькие пузырьки могут испытывать большие флуктуации скорости межфазной границы, чем крупные.

Для предложенной модельной системы рассчитан спектр показателей Ляпунова по методике Вольфа [14]. Эволюция коэффициентов Ляпунова приведена на рис. 7. Коэффициенты расположены в порядке убывания: наибольший – по скорости границы раздела фаз, затем по радиусу парового пузыря, по толщине погранслоя около парового пузыря, наименьший – по давлению пара в паровом пузыре:

$$\lambda_{\dot{R}} = 0.128, \quad \lambda_R = 0.0512, \quad \lambda_{\delta} \approx 0, \quad \lambda_p = -0.103.$$

Так как два максимальных коэффициента в спектре положительны, то на основании имеющихся представлений можно сделать вывод о возможности возникновения хаотических колебаний парового пузыря, что согласуется с данными экспериментов.

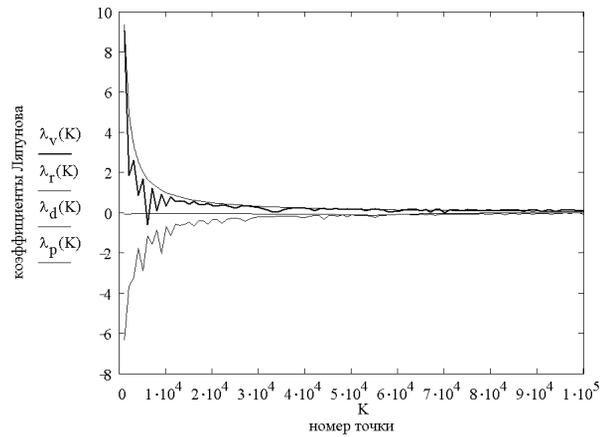


Рис. 7. Эволюция коэффициентов Ляпунова на фазовом портрете

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное и теоретическое исследование колебаний границы раздела фаз при росте парового пузыря на стенке. Эксперименты проведены при кипении воды в большом объеме при атмосферном давлении. С помощью лазерной диагностики зафиксированы колебания парового пузыря, растущего на стенке. Полученное значение показателя Ляпунова, равное $\lambda_1 = 0.0515$, свидетельствует о возможности возникновения хаотических колебаний растущего парового пузыря.

Для системы модельных уравнений получены фазовые портреты колебаний парового пузыря. Рассчитаны показатели Ляпунова, два из которых положительные, что свидетельствует также о возможности возникновения хаотических колебаний. Полученное согласование расчетных и экспериментальных значений коэффициентов Ляпунова свидетельствует об адекватности принятой модели колебаний парового пузыря при росте на стенке.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

p – давление, Па;
 T – температура, К;
 q – тепловая нагрузка, Вт/м²;
 h – толщина пристенного перегретого слоя жидкости, м;
 δ – толщина теплового пограничного слоя, м;
 R – радиус парового пузыря, м;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ρ – плотность, кг/м³;
 M – масса, кг.
 Индексы:
 п – пар;
 ж – жидкость;
 с – стенка;
 s – насыщение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. **Нигматулин Б.И., Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Молошников А.С., Рыхлик В.С., Булкина Н.А.** Исследование колебаний границы раздела фаз и механизма переноса тепла при пленочном кипении // Теплофизика высоких температур. 1994. Т. 32. № 2. С. 255–260.
3. **Кузма-Кичта Ю.А., Зудин Ю.Б., Бакунин В.Г., Устинов А.А., Салтыкова Е.В.** Исследование колебаний границы раздела фаз при кипении с помощью лазерной диагностики // XII школа-семинар молодых ученых и специалистов под патронажем Леонтьева А.И. Москва, 1999.
4. **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, Vol. 2. P. 713 – 717.
5. **Bode A., Schroeder J.J.** Pressure Pulse Generation by Single Bubbles in Subcooled Pool Boiling, Multiphase Science and Technology. 2000. Vol. 12. 34. P. 85–101.
6. **Mosdorf R., Shoji M.** Chaos in nucleate boiling—nonlinear analysis and modeling // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. 47. (2004). P. 1515–1524.
7. **Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А., Холпанов Л.П.** Исследование колебаний границы раздела фаз при кипении // Теоретические основы химической технологии. 2002. Т. 36. № 6. С. 577–583.
8. **Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А., Холпанов Л.П.** Моделирование колебаний парового пузыря при его росте на поверхности нагрева // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. 2002. Т. 4. С. 127 – 130.
9. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Analysis of interface oscillations during boiling // 12th Intern. Heat Transfer Conference. Heat Transfer 2002. Grenoble, France.
10. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A., Kholpanov L.P.** Investigation of interface oscillations during boiling // The Third International Conference on Transport Phenomena in Multifase Systems. Heat 2002. Baranow Sandomierski, Poland, June 24–27, 2002. P. 45–52.
11. **Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А.** Исследование колебаний растущего на стенке парового пузыря // Оптические методы исследования потоков: Труды VII Международной научно-технической конференции. М.: МЭИ, 2003. С. 456–461.
12. **Устинов А.А.** Исследование колебаний границы раздела фаз при кипении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. энерг. ин-т, 2005. 20 с.
13. **Шустер Г.** Детерминированный хаос. Введение. М.: Мир, 1988. 240 с.
14. **Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L., Bastano J.A.** Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica 16D (1985). P. 285–317.