

Ю.А. Кузма-Кичта<sup>1</sup>, А.А. Устинов<sup>2</sup>, А.К. Устинов<sup>1</sup>, Л.П. Холманов<sup>3</sup>

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 микромасштабы 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.

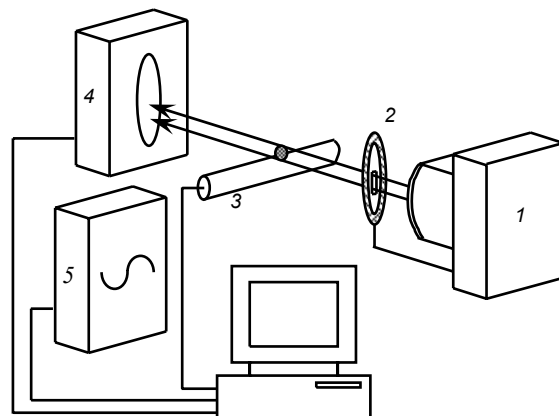


Рис. 1. Схема методики исследования

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;  $\nu$  – корреляционная размерность. На рис. 4 представлены аппроксимации временного сигнала роста парового пузыря для различных временных задержек  $\tau$ . 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  $\nu$  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  $\tau$ , 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,  $\tau$  – значение временной задержки.

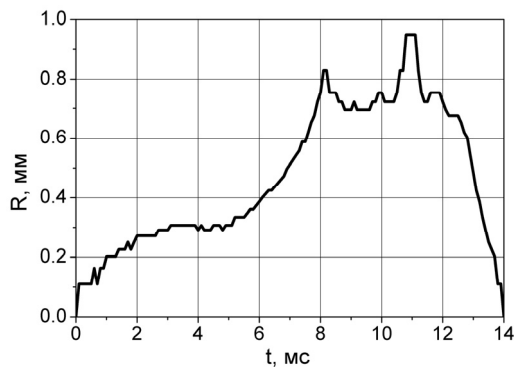


Рис. 2. Рост пузыря на стенке: вода  $p = 0,1$  МПа,  $q = 52$  кВт/м<sup>2</sup>,  $\Delta T_{\text{нед}} = 9$  К

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.

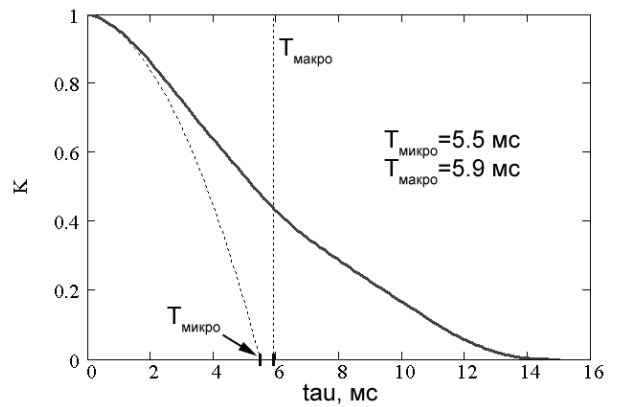


Рис. 3. Коэффициент корреляции и временные макро- и микромасштабы Тейлора колебаний парового пузыря

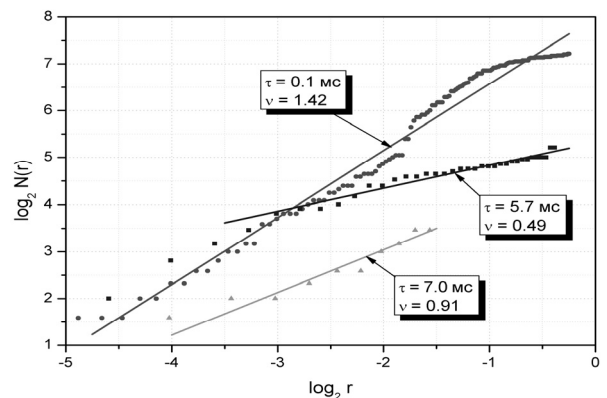


Рис. 4. Аппроксимация роста парового пузыря степенной функцией

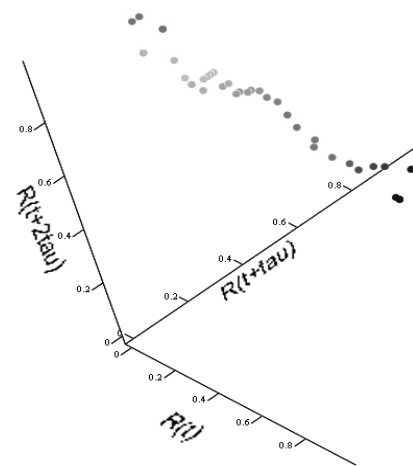


Рис. 5. Фазовый портрет колебаний парового пузыря, построенный по экспериментальным данным

### 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):

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

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

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

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.

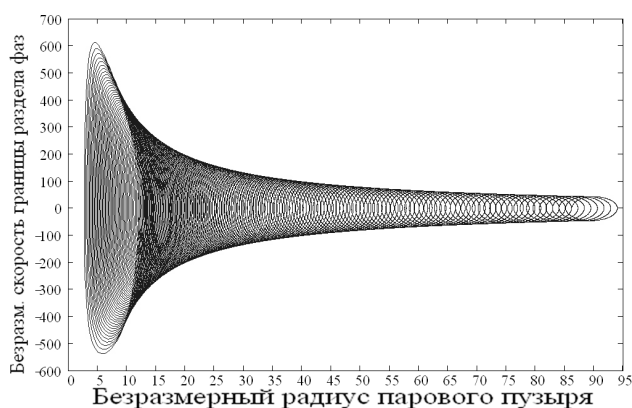


Рис. 6.  $\left( R, \dot{R} \right)$  – проекция 4-мерного фазового портрета исследованной системы уравнений

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.

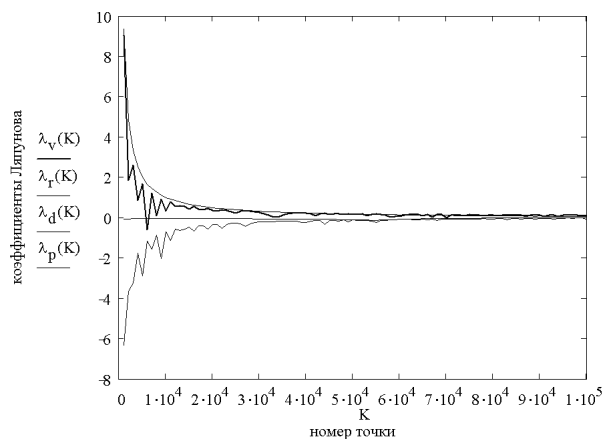


Рис. 7. Эволюция коэффициентов Ляпунова на фазовом портрете

## 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/м<sup>2</sup>;  
 $h$  – толщина пристенного перегретого слоя жидкости, м;  
 $\delta$  – толщина теплового пограничного слоя, м;  
 $R$  – радиус парового пузыря, м;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $M$  – 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 // 3<sup>rd</sup> 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.