

УДК. 621.019

Экспериментальное исследование кипения на модифицированной поверхности испарителя теплонасосной установки

Д.А. Устинов¹, Д.В. Сиденков¹, Ю.А. Кузма-Кичта¹, В.А. Устинов², А.К. Устинов¹

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия

² Schaeffler Technologies AG&KG, Herzogenaurach, 91074, Germany

e-mail: dmitry.ustinow@gmail.com, sidenkovdv@mpei.ru, kuzma@itf.mpei.ac.ru, victor.ustinov@gmail.com, uw@bk.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-4-155-162

Поступила в редакцию 25.03.2020

После доработки 04.04.2020

Принята к публикации 05.04.2020

С помощью оптических лазерных методов зондирования двухфазной среды исследован процесс кипения фреона 134а на модифицированной поверхности испарителя теплонасосной установки. Анализ интегральных значений интенсивности рассеянного на паровых пузырьках зондирующего лазерного излучения в потоке теплоносителя на основе теории рассеяния Ми позволил определить средний размер паровых пузырьков в потоке теплоносителя, равный 0.1 мм. Получены временные, корреляционные и фазовые характеристики процесса кипения на модифицированной поверхности. Анализ временного сигнала велся в диапазоне до 100 кГц. С использованием сечения Пуанкаре фазового портрета колебаний интенсивности зондирующего лазерного излучения проведено сравнение процесса пузырькового кипения на плоской поверхности теплообмена и на модифицированной. Установлено, что диапазон размеров паровых пузырей, генерируемых на модифицированной поверхности, в 50 раз больше, чем на плоской поверхности. Полученные в работе материалы свидетельствуют о хаотичной природе кипения.

Ключевые слова: кипение, модифицированная поверхность, фазовый портрет, сечение Пуанкаре, хаос.

Введение

Эффективным путем интенсификации теплообмена при кипении является применение пористых покрытий и структурированной поверхности, имеющих оптимальный размер каверн и их большое количество. В работах [1–11] отмечены основные эффекты, достигаемые в этом случае:

- высокие коэффициенты теплоотдачи;
- низкие перегревы стенки для начала кипения;
- высокие критические тепловые потоки;
- уменьшение отложений на поверхности.

Эти эффекты чрезвычайно важны, поэтому их достижение является актуальной научной и инженерной задачей.

В работе [12] получены временные сигналы отраженного от поверхности одиночного парового пузыря зондирующего лазерного излучения, которые свидетельствуют о хаотических колебаниях парового пузыря, растущего на стенке.

В настоящей работе продолжено исследование в этом направлении, а именно, характеристика кипения в канале на модифицированной поверхности.

Методика исследования

С помощью лазерной диагностики исследованы колебания паровых пузырей, растущих на стенке, при кипении в канале хладагента-134а. Согласно разработанной методике, лазерный пу-

чок, проходя через двухфазную среду, модулируется паровыми пузырями. Регистрация колебаний парового пузыря при его росте на стенке осуществлялась при помощи изучения отраженного от поверхности парового пузыря зондирующего лазерного излучения так же как и в работе [12]. Зондирующий лазерный пучок, проходя через двухфазную среду, модулируется оптическими неоднородностями, находящимися в потоке теплоносителя. Средний размер паровых пузырей определяется на основе теории однократного рассеяния Ми.

Оптическая схема для исследования кипения на модифицированной поверхности представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения использовался одномодовый гелий-неоновый лазер ЛГН-107 с длиной волны $\lambda = 0.63$ мкм. Испарительная камера 2 теплонасосной установки представляла собой цилиндрическую трубку из нержавеющей стали с двумя оптическими окнами 3 из кварцевого стекла. Лазерный пучок направлялся на верхнюю образующую модифицированной поверхности теплообмена 4. Рассеянный оптическими неоднородностями свет поступал на фотоприемник ФД 24 К 5. Аналоговый электрический сигнал от фотоприемника преобразовывался в цифровой (АЦП, 6) и далее обрабатывался на ЭВМ (7).

При проведении экспериментов велась фоторегистрация процесса кипения. Фото одиночных пузырей представлены в [12].

При кипении на модифицированной поверхности регистрация сигналов велась с частотой 100 кГц. Обработка такого большого массива экспериментальных данных связана с продолжительным временем цифровой обработки. В случае аналогичных временных масштабов обработки сигнала при видеорегистрации объем данных на несколько порядков больше, обра-

ботка таких данных будет целью дальнейших исследований.

Структура двухфазного потока исследовалась при помощи оптической методики, описанной в [14]. Важную информацию о среде, в которой распространяется лазерный пучок, можно получить, анализируя ослабление интенсивности излучения по отношению к интенсивности лазерного пучка, генерируемого лазером. Это ослабление в первую очередь связано с показателем преломления и микроструктурой оптических неоднородностей. При этом регистрируются следующие характеристики:

- состояние оптических неоднородностей;
- распределение оптических неоднородностей по размерам;
- объемная концентрация.

В случае исследования колебаний границы раздела фаз перечисленные характеристики следует отнести к поверхности раздела фаз паровых пузырей и областей, непосредственно прилегающих к ним. Ослабление излучения в рассеивающих средах при выполнении определенных условий описывается теорией однократного рассеяния Ми [15]. В основе теории лежат следующие ограничения:

- полагается, что падающее и рассеянное излучение имеют одинаковую длину волны;
- рассматривается рассеяние независимыми частицами и предполагается, что интерференционные явления отсутствуют;
- считается, что эффекты многократного рассеяния не оказывают существенного влияния, т.е. интенсивность ослабления и рассеяния n частицами в n раз больше соответствующих характеристик отдельно взятой частицы.

Ослабление параллельного пучка монохроматического излучения в рассеивающей среде характеризуется объемным коэффициентом ослабления α , равным сумме объемных коэффициентов рассеяния α_p и поглощения α_n :

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_n. \quad (1)$$

В силу допущений, описанных выше, каждый из коэффициентов α , α_p , α_n может быть выражен через сумму соответствующих коэффициентов для одной частицы:

$$\alpha = \sum_{i=1}^N K_i, \quad \alpha_p = \sum_{i=1}^N K_{pi}, \quad \alpha_n = \sum_{i=1}^N K_{ni},$$

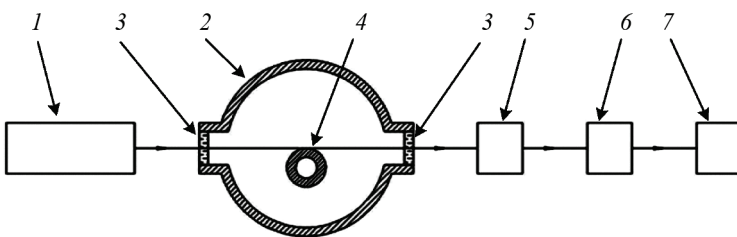


Рис. 1. Оптическая схема для исследования кипения на модифицированной поверхности: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – испаритель; 3 – оптические окна; 4 – модифицированная поверхность; 5 – фотоприемник; 6 – АЦП; 7 – ЭВМ

где K_i , K_{pi} , K_{ni} – соответственно коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения i -ой частицы; N – число частиц в единице объема.

Таким образом, определив характеристики ослабления излучения для одной частицы, произведя операцию суммирования для всех частиц рассеивающего объема, определяем интегральные характеристики рассеивающей среды. В работе [15] получено решение задачи о рассеянии и поглощении электромагнитного излучения однородным шаром. Полученные аналитические выражения имеют вид бесконечных слабо сходящихся рядов. С практической точки зрения имеют интерес два предельных случая – когда радиус частиц много меньше длины волны и когда радиус частиц много больше длины волны зондирующего излучения.

В первом предельном случае имеем так называемое рэлеевское рассеяние:

$$Q(x, m) \cong 4 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right) x^4, \quad (2)$$

где $Q(x, m)$ – фактор эффективности ослабления, численно равный отношению энергии ослабленной к энергии, падающей на геометрическое сечение частицы; $x = 2\pi a / \lambda$ – относительный размер частицы, т.е. по отношению к длине волны зондирующего излучения; m – комплексный показатель преломления вещества частицы.

Во втором предельном случае – случае больших частиц – можно приблизительно считать, что $Q(x, m) \approx 2$.

В силу того, что фактор эффективности рассеяния представляет собой отношение энергии излучения, рассеянного частицей, к полной энергии, которая падает на геометрическое сечение частицы, значения $Q(x, m)$ больше единицы могут показаться странными. Ответом на этот вопрос является тот факт, что электромагнитное поле претерпевает возмущение в области пространства, размер которой больше частиц, в противном случае не удовлетворялись бы граничные условия на ее поверхности [16].

Объемный коэффициент ослабления α связан с интенсивностями проходящего через слой излучения $I(R)$ и падающего на слой излучения I_0 соотношением:

$$I(R) = I_0 \exp\left[-\int_0^R \alpha(R) dR\right], \quad (3)$$

где R – длина пути лазерного пучка в рассеивающей среде.

Последнее соотношение выражает собой закон Бугера [17].

Оценить размер частиц можно в предельном случае больших частиц ($a \gg \lambda$). Тогда из [16] следует, что

$$Q \approx 2 \int_0^\infty f(a) da = 1 \quad (4)$$

и объемный коэффициент ослабления будет пропорционален произведению концентрации частиц на их эффективное сечение. При возможно максимально плотной упаковке частиц в рассеивающем объеме

$$N \sim \frac{1}{\frac{4}{3}\pi a^3}; \quad \alpha \sim \frac{1}{\frac{4}{3}\pi a^3}; \quad 2\pi a^2 \sim \frac{3}{2} \frac{1}{\alpha},$$

откуда

$$a = \frac{3}{2} \frac{1}{\alpha}. \quad (5)$$

В экспериментах определялось соотношение J/J_0 , где J – мощность рассеянного излучения, J_0 – мощность зондирующего излучения.

Исходя из соотношения $J = J_0 \exp(-aR)$, где R – характерный размер рассеивающего слоя, проведем оценку размеров оптических неоднородностей. В проведенных экспериментах $J/J_0 = 1/10 - 1/1000$. В качестве R принимался диаметр испарителя $d = 50$ мм. При этих параметрах получаем $a \approx 0.1$ мм.

Экспериментальная установка

Для исследования кипения фреона R134a в теплофизической лаборатории кафедры Теоретических основ теплотехники разработан экспериментальный стенд (рис. 2). Схема стенда представлена на рис. 3. Стенд предназначен для исследования кипения фреона R134a на орбитальной поверхности, изготовленной по технологии деформирующего резания в условиях свободной и вынужденной конвекции. Основной частью стенда является холодильная машина, рабочим телом которой служит фреон R134a.

Для обеспечения заданной холодопроизводительности (от 100 до 300 Вт) при температуре кипения фреона от -10 °C до $+10$ °C используется компрессор ТНВ 1340У фирмы-производителя L'UniteHermetique (Франция).

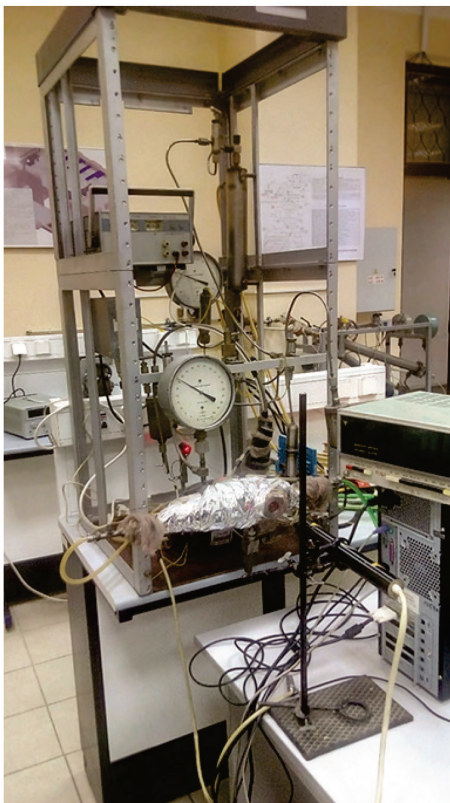


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования кипения в испарителе теплонасосной установки

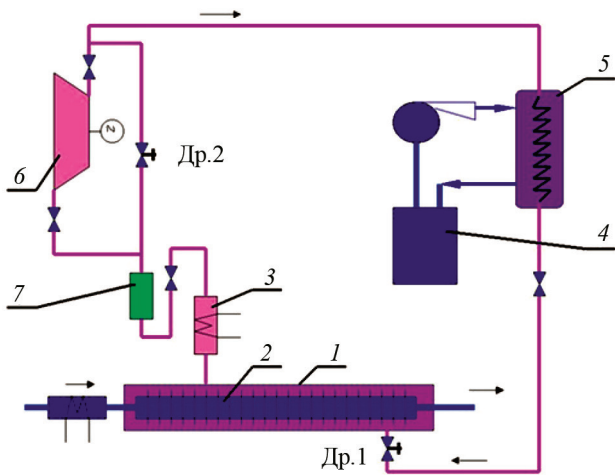


Рис. 3. Схема стенда для исследования теплообмена при кипении в испарителе теплонасосной установки: 1 – испарительная камера; 2 – исследуемые образцы; 3 – расходомер; 4 – термостат; 5 – конденсатор; 6 – компрессор; 7 – емкость-ресервуар; Др1, Др2 – дроссельные вентили

Параметры теплообменных труб

№ трубы	Длина L , мм	Шаг оребрения S , мм	Толщина ребра δ , мм	Высота ребра h , мм	Диаметр наружный d_m , мм	Диаметр по основанию ребер d_k , мм	Площадь по корн. диаметру F_k , м ²	Коэффициент оребрения
1	1000	1.2	0.64	1.8	16	12.4	0.03894	2.75
2	1000	0.6	0.32	1.9	16	12.2	0.03831	8.49

Опытным участком стенда является испарительная камера 1. Она выполнена в виде трубы из нержавеющей стали 12Х10Н диаметром 50/43.5 мм и длиной 1000 мм. В торцах кожуха вварены с некоторым смещением относительно оси специальные штуцеры для фиксации и герметизации исследуемых образцов 2 (труб с модифицированной поверхностью).

На рис. 4 представлен образец трубы с модифицированной поверхностью. В таблице приведены параметры теплообменных труб с модифицированной поверхностью.

В испарительной камере установлены оптические окна для контроля испаряющегося фреона. На рис. 5 представлена фотография испарительной камеры с оптическими окнами и лазером.



Рис. 4. Образец трубы с модифицированной поверхностью



Рис. 5. Испарительная камера с оптическими окнами

Расчетная заправка (950 г R134a) обеспечивает погружение исследуемого образца на 8–10 мм. Испарительная камера теплоизолирована, толщина слоя теплоизоляции не менее 25 мм. В замкнутом водяном контуре с помощью термостата с насосом обеспечивается расход воды в испарителе до 50 г/с и температурой от 0.5 °С до 15 °С, что дает возможность устанавливать температуру насыщения от –10 °С до +10 °С. На входе в испарительную камеру установлен дроссельный клапан, с помощью которого регулируется температура насыщения фреона.

Для определения расхода фреона сконструирован и установлен на всасывающей линии компрессора расходомер 3 калориметрического типа. Пары фреона (сухой насыщенный пар) проходят по межтрубному пространству, затем направляются в керамическую трубку с нагревательной спиралью из нихромовой проволоки сопротивлением 15.2 кОм. Такая конструкция позволяет снижать тепловые потери от нагревательного элемента в окружающую среду. Корпус расходомера теплоизолирован.

Входная и дифференциальные термопары через специальные штуцеры введены непосредственно в поток газа, что дает устройству высокую чувствительность.

Пары фреона через емкость-ресивер 7 попадают в компрессор 6. Компрессор имеет байпасную линию с дроссельным клапаном Др2, что позволяет уменьшать холодопроизводительность испарителя в несколько раз по отношению к номинальной и устанавливать при заданной температуре насыщения в испарителе различную тепловую нагрузку.

Конденсатор 5 с водяным охлаждением, осуществляемым с помощью термостата 4, позволяет устанавливать температуру конденсации в диапазоне от 15 °С до 50 °С, что дает дополнительную возможность управлять тепловой нагрузкой в испарителе.

Температура измерялась медь-константановыми термопарами. Для контроля давления в испарителе и конденсаторе использовались образцовые манометры класса точности 0.4.

Испаритель выводится на заданную температуру регулировкой расхода воды через исследуемую трубу и подбором соответствующей температуры конденсации в конденсаторе 5 с помощью термостата 4 в пределах нескольких градусов. Более точно (до десятых долей граду-

са) режим устанавливается с помощью дроссельного клапана ДР1. При стабилизации температуры в испарителе в течение 15 минут проводятся измерения остальных величин.

На калориметрический расходомер от источника постоянного тока подается мощность 1–2 Вт, измеряется перегрев фреона от температуры сухого насыщенного пара. Теплоемкость C_p рассчитывается по уравнению состояния для R134a по температуре и давлению.

Измерения проведены при тепловой нагрузке, соответствующей началу кипения, массовой скорости фреона-134a – 2.0–2.9 кг/(м²с), давления 2.5–3 кг/см². Дроссельный клапан Др2 на байпасном контуре приоткрыт и режим испарения выводится на заданную температуру.

Результаты исследования

Помимо интегральных характеристик лазерного пучка, прошедшего через исследуемый объем рабочей жидкости, фиксировались высокочастотные колебания (до 100 кГц), вызванные модулированием оптическими неоднородностями. Для анализа высокочастотных колебаний использовалась методика [12]. Временной сигнал представлен на рис. 6.

Для вычисления временного масштаба Тэйлора строились автокорреляционные функции процесса колебаний, представленные на рис. 7.

Эксперименты на плоской поверхности позволили получить фазовые портреты колебаний интенсивности зондирующего лазерного пучка, возникающих при росте парового пузыря и его отрыве от поверхности нагрева.

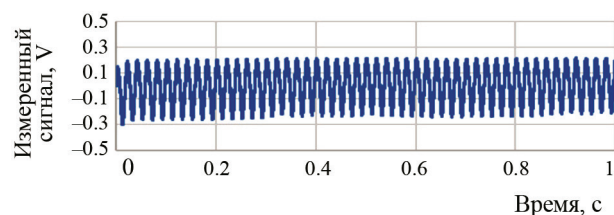


Рис. 6. Временной сигнал колебаний модулированного лазерного пучка

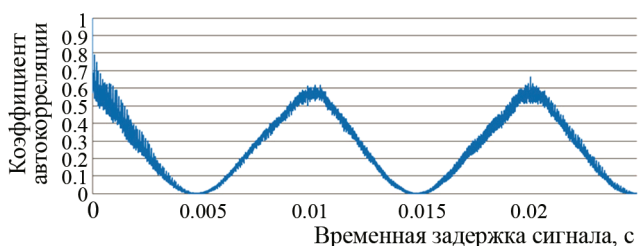


Рис. 7. Автокорреляционная функция сигнала

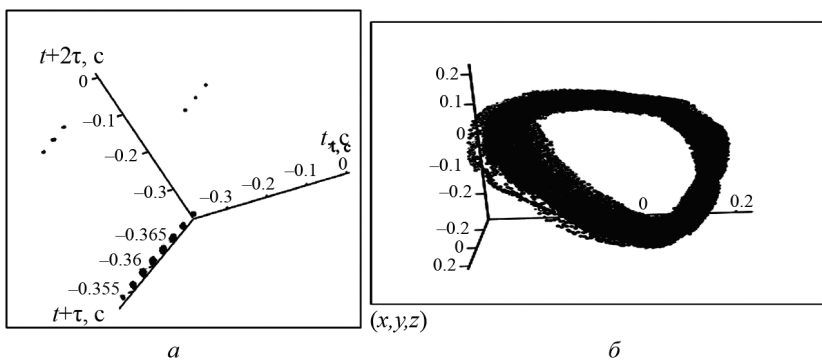


Рис. 8. Фазовый портрет колебаний интенсивности освещенности фотодатчика лазерным пучком, модулированным паровым пузырем на плоской (а) и модифицированной поверхностях (б)

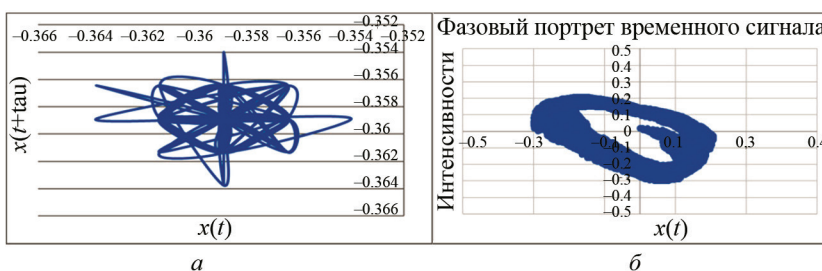


Рис. 9. Сечение Пуанкаре колебаний интенсивности модулированного лазерного пучка паровым пузырем на плоской (а) и модифицированной поверхностях (б)

Результаты анализа экспериментальных данных представлены в виде фазовых портретов и соответствующих сечений Пуанкаре [18, 19] колебаний интенсивности модулированного лазерного пучка при кипении на модифицированной поверхности в сравнении с плоской стенкой (рис. 8, 9).

Получено, что фазовые портреты в фазовой области представляют комплекс замкнутых орбит различных масштабов, что соответствует экспериментальным данным, представленным в работе [13].

Фазовый портрет имеет вид периодического аттрактора. Крупномасштабные колебания интенсивности зондирующего лазерного излучения связаны с работой компрессора и, следовательно, с образованием паровой фазы. Можно сделать вывод о том, что вынужденные колебания теплоносителя приводят к интенсификации теплообмена.

С помощью сечений Пуанкаре показано, что при кипении на модифицированной поверхности диапазон отрывных диаметров паровых пузырей во много раз шире, чем при кипении на плоской поверхности.

При сравнении масштабов колебаний паровой фазы, используя сечение Пуанкаре, для гладкой поверхности временной масштаб составляет 0.01 с (рис. 9, а), а для модифицированной поверхности временной масштаб – 0.5 с (рис. 9, б). В случае модифицированной поверхности в потоке теплоносителя находятся паровые пузыри различных размеров. Это подтверждается сравнением сечений Пуанкаре для плоской и модифицированной поверхностей. Разница в ширине диапазона размеров достигает 50 раз.

Таким образом, полученные в работе материалы свидетельствуют о хаотичной природе кипения и согласуются с результатами работы [20], в которой при исследованиях колебаний поверхности раздела был рассчитан максимальный показатель Ляпунова для ограниченного набора

экспериментальных данных. Его положительное значение доказывает возникновение хаотических колебаний границы раздела фаз при кипении при определенных обстоятельствах.

Заключение

С помощью лазерной диагностики исследованы колебания паровых пузырей, растущих на стенке, при кипении в канале хладона-134а. Согласно разработанной методике, лазерный пучок, проходя через двухфазную среду, модулируется паровыми пузырями. Средний размер паровых пузырей определяется на основе теории однократного рассеяния Ми. При анализе колебаний интенсивности лазерного пучка, возникающих при росте паровых пузырей и их отрыве от поверхности нагрева, получены фазовые портреты и сечение Пуанкаре. Фазовые портреты в фазовой области представляют комплекс замкнутых орбит различных масштабов. С помощью сечений Пуанкаре показано, что при кипении на модифицированной поверхности диапазон отрывных диаметров паровых пузырей во много раз шире, чем при кипении на плоской поверхности.

Таким образом, полученные в работе материалы свидетельствуют о хаотичной природе кипения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузма-Кичта Ю.А. Исследование интенсификации теплообмена и разработка рекомендаций для расчета теплогидравлических характеристик в докризисной и закризисной областях парогенерирующих каналов. Дисс... докт. техн. наук. Москва. МЭИ. 1989.
2. Ustinov A., Mitrovic J. Highly effective surfaces for boiling applications // Proc. of 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Sun City, South Africa, 2007.
3. Ustinov A., Mitrovic J. Special boiling effects of novel microstructured surface // Proc. of 5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008.
4. Ustinov A., Ustinov V., Mitrovic J. Pool boiling heat transfer from a bundle of tubes provided with the novel microstructure // Proc. of ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Canada, Whistler, 21–26 September 2008.
5. Устинов В.А., Сухих А.А. Исследование процессов теплообмена на микроструктурированных поверхностях в испарителе теплонасосной установки // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 2 (64). С. 43–46.
6. Mitrovic J., Ustinov A. Nucleate boiling heat transfer on a tube provided with a novel microstructure // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2006. 13(3). P. 261–278.
7. Mitrovic J., Ustinov A. Boiling features of a novel microstructure // Proc. of 13th International Heat Transfer Conference. Sydney, Australia, August 13–18, 2006.
8. Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A. Heat and mass transfer enhancement on macro-, micro-, and nanoscales choice and justification of the heat transfer intensification methods // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. Iss. 6. P. 465–565.
9. Thome J.R. Enhanced boiling heat transfer. Hemisphere, New York, 1990. 356 p.
10. Webb R.L. Principles of Enhanced Heat Transfer. Wiley Int. Publication, 1994. 556 p.
11. Solodov A.P. Computer Model of Nucleate Boiling // Proc. of the International Engineering Foundation, 3rd Conference, Irsee, Germany. 1997. P. 231–238.
12. Устинов Д.А., Сиденков Д.В., Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.К., Устинов А.А. Исследование роста и колебаний парового пузыря на плоской поверхности нагрева в большом объеме // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 8. С. 338–344.
13. Устинов А.А. Исследование колебаний границы раздела фаз при кипении. Дисс... канд. техн. наук. Москва. МЭИ. 2005.
14. 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, V. 1. P. 100–115.
15. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // Annalen der Physik. Vierte Folge. Band 25. 1908. N 3. P. 377–445.
16. Бисярин В.П., Соколов А.В., Сухонин Е.В., Федорова Л.В., Ширей Р.А. Ослабление лазерного излучения в гидрометеорах / Под ред. М.А. Колосова. М.: Наука, 1977. 176 с.
17. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2004. 852 с.
18. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивости в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 512 с.
19. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. М.: Мир, 1988. 240 с.
20. Kuzma-Kichta Yu.A., Bondur V.G. Chaos under interface oscillations during boiling and sea surface agitation // Journal of Physics: Conference Series 1382 (2019) 012111 IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/1382/1/012111 1

Experimental study of boiling on a modified surface of the evaporator of a heat pump unit

D.A. Ustinov¹, D.V. Sidenkov¹, Yu.A. Kuzma-Kichta¹, V.A. Ustinov², A.K. Ustinov¹

¹ Moscow Power Engineering Institute (MPEI), Moscow, 112250 Russia

² Schaeffler Technologies AG&KG, Herzogenaurach, 91074, Germany

e-mail: dmitry.ustinov@gmail.com, sidenkovdv@mpei.ru,
kuzma@itf.mpei.ac.ru, victor.ustinov@gmail.com, uw@bk.ru

In this work, the boiling of Freon 134a on the modified surface of the evaporator of a heat pump unit was studied using optical laser methods for sensing a two-phase medium. Investigation of interface oscillation during boiling was carried out by the method of laser diagnostics. The analysis of the integrated values of the probe laser radiation intensity scattered by the vapor bubbles in the coolant flow based on the Mie scattering theory was completed. It became possible to determine the average size of the vapor bubbles in the coolant flow. The time, correlation, and phase characteristics of the boiling process on a modified surface are obtained. The analysis of the time signal was carried out in the range up to 100 kHz. A comparison was made of the process of bubble boiling and a phase portrait of fluctuations in the intensity of the probe laser radiation using the Poincare section on a flat and modified heat exchange surfaces. It has been found that the modified surface generates ranges of steam bubbles 50 times larger than a flat surface. The materials obtained in this work indicate the chaotic nature of boiling.

Keywords: boiling, modified surface, phase portrait, Poincare section, chaos.

REFERENCES

1. **Kuzma-Kichta Yu.A.** *Issledovanie intensifikatsii teplo-obmena i razrabotka rekomendatsij dlya rascheta teplogidravlicheskih kharakteristik v dokrizisnoj i zakrizisnoj oblastiakh parogeneriruyushhikh kanalov. Diss. dokt. tekhn. Nauk* [Study of heat transfer intensification and development of recommendations for calculating thermohydraulic characteristics in the pre-crisis and post-crisis areas of steam-generating channels. Dr. eng. Sci. diss.]. Moscow, 1989. In Russ.
2. **Ustinov A., Mitrovic J.** Highly effective surfaces for boiling applications. *Proc. of 5th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Sun City, South Africa, 2007.
3. **Ustinov A., Mitrovic J.** Special boiling effects of novel microstructured surface. *Proc. of 5th European Thermal-Sciences Conference*, The Netherlands, 2008.
4. **Ustinov A., Ustinov V., Mitrovic J.** Pool boiling heat transfer from a bundle of tubes provided with the novel microstructure. *Proc. of ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale*, Canada, Whistler, 21–26 September 2008. Paper 39
5. **Ustinov V.A., Sukhikh A.A.** Issledovanie protsessov teploobmena na mikrostrukturirovannykh poverkhnostyakh v isparitele teplonasosnoj ustanovki [Investigation of heat transfer processes on microstructured surfaces in the evaporator of a heat pump installation]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka – Energy Saving and Water Treatment*, 2010, no. 2 (64), pp. 43–46. In Russ.
6. **Mitrovic J., Ustinov A.** Nucleate boiling heat transfer on a tube provided with a novel microstructure. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 13 (3) 2006, pp. 261–278. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.v13.i3.50
7. **Mitrovic J., Ustinov A.** Boiling features of a novel microstructure. *Proc. of 13th International Heat Transfer Conference*, Sydney, Australia, August 13–18, 2006.
8. **Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A.** Heat and mass transfer enhancement on macro-, micro-, and nanoscales choice and justification of the heat transfer intensification methods. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25, no. 6, pp. 465–565.
9. **Thome J.R.** *Enhanced Boiling Heat Transfer*. Hemisphere, New York, 1990. 356 p.
10. **Webb R.L.** *Principles of Enhanced Heat Transfer*. Wiley Int. Publication, 1994. 556 p.
11. **Solodov A.P.** Computer Model of Nucleate Boiling. *Proc. of the International Engineering Foundation, 3rd Conference, Irsee, Germany*. 1997, pp. 231–238.
12. **Ustinov D.A., Sidenkov D.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** *Issledovanie rosta i kolebanij parovogo puzrya na ploskoj poverkhnosti nagreva v bol'shom ob'eme* [Investigation of the growth and fluctuations of a steam bubble on a flat heating surface in a large volume]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2019, vol. 11, no. 8, pp. 338–344. In Russ.
13. **Ustinov A.A.** *Issledovanie kolebanij granitsy razdela faz pri kipenii*. Diss. cand. tekhn. nauk. [The study of oscillations of the phase boundary during boiling. Cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2005. 125 p. In Russ.
14. **Kuzma-Kichta Yu.A., Ustinov A.K., Ustinov A.A.** Investigation of interface oscillation during boiling by the method of laser and acoustic diagnostics. *Proc. of The Engineering Foundation Conference. Boiling 2000: Phenomena and Emerging Applications*. April 30–May 5, Anchorage, Alaska, USA, vol. 1, pp. 100–115.
15. **Mie G.** Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*, 1908, 330, pp. 377–445.
16. **Bisyarin V.P., Sokolov A.V., Sukhonin E.V., Fedorova L.V., Shirej R.A.** *Oslablenie lazernogo izlucheniya v gidrometeorakh*. Pod red. M.A. Kolosova [Laser attenuation in hydrometeors. Red. M.A. Kolosov]. Moscow: Nauka, 1977. 176 p. In Russ.
17. **Landsberg G.S.** *Optika* [Optics]. Moscow: Fizmatlit, 2004. 852 p. In Russ.
18. **Haken H.** *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*. Springer-Verlag, Berlin, New York. 1983. (Russ. ed. Haken H. Sinergetika. Ierarkhiya neustojchivosti v samoorganizuyushhikhsya sistemakh i ustrojstvakh. Moscow: Mir, 1985. 512 p.).
19. **Schuster H.G.** *Deterministic Chaos. An Introduction*. Wiley-VCH, 2004. 299 p. (Russ. ed. Schuster H. Determinirovannyj khaos. Vvedenie. Moscow: Mir, 1988. 240 p.).
20. **Kuzma-Kichta Yu.A., Bondur V.G.** Chaos under interface oscillations during boiling and sea surface agitation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1382, p. 012111. DOI: 10.1088 / 1742-6596 / 1382/1/012111 1