

Визуализация структуры парожидкостного потока при кипении недогретого хладагента R113 в предкризисных условиях

Н.В. Васильев^{1,А, В}, С.Н. Вавилов^{2,А}, Ю.А. Зейгарник^{3,А}, Е.А. Лиджиев^{4,А, В}

^А Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^В Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@jiht.ru

⁴ ORCID: 0009-0006-7234-6045, lind722k@gmail.com

Аннотация

Кипение диэлектрических жидкостей, недогретых до температуры насыщения, является перспективным способом охлаждения современных электронных устройств. Данный метод позволяет отводить достаточные плотности тепловых потоков (q), поддерживать на требуемом уровне температуру интерфейсов чипов и не создавать нежелательных условий, ведущих к электрическому пробое, в случае протечки в контуре теплоносителя. Безопасное применение процесса кипения недогретой жидкости ограничивается плотностями тепловых потоков, при которых в ядре течения теплоносителя появляются крупные агломераты паровой фазы, что несет опасность гидравлической разверки применяемых систем охлаждения из параллельных каналов.

В работе с помощью визуализации посредством высокоскоростной видеосъемки (с частотой 5–10 кГц) проведено экспериментальное исследование эволюции структуры двухфазного потока при кипении недогретой диэлектрической жидкости R113 в предкризисных условиях. Показано, характерное также для воды, при q , близких к критическим, формирование в потоке R113 крупных паровых агломератов. Установлено, что повышение степени недогрева и массовой скорости приводит к увеличению q в момент появления паровых агломератов. Показано влияние скорости нагрева теплоотдающей пластины на структуру двухфазного потока в предкризисных условиях и на значение q в момент пережога.

Ключевые слова: кипение, недогретая жидкость, хладагент R113, паровые агломераты, критическая плотность теплового потока, высокоскоростная видеосъемка.

1. Введение

В настоящее время миниатюризация элементов электронных устройств и микросхем создает потребности в отводе все более высоких плотностей тепловых потоков [1]. В этих условиях традиционные системы охлаждения начинают не справляться с поставленной задачей. В целях предотвращения электрического замыкания в случае протечки в контуре системы охлаждения целесообразно применение в качестве теплоносителей диэлектрических жидкостей. Однако, низкие теплофизические свойства таких жидкостей не позволяют отводить требуемые q при использовании однофазного течения теплоносителя. Дополнительным доводом для применения двухфазных систем охлаждения на основе диэлектрических теплоносителей является их низкая температура насыщения (кипения) ($t_{\text{нас}}$) при атмосферном давлении (например, для жидкости

Noves 649 – 49°C, для хладона R113 – 47.5°C). Данное обстоятельство позволяет поддерживать температуру процессоров на требуемом уровне (ниже 75–80°C).

Кипение недогретой жидкости в канале является одним из наиболее эффективных способов отвода предельно высоких плотностей тепловых потоков [2–4]. Кипение недогретых диэлектрических жидкостей используется в системах охлаждения центров обработки данных, силовой электроники, суперкомпьютеров, авионики, лазеров и др. [5]. Проводятся исследования возможности применения этого способа охлаждения в космических приложениях [6]. При данном способе охлаждения температура жидкости в ядре потока ($t_{\text{ж}}$) остается ниже температуры насыщения, и образующиеся на теплоотдающей поверхности паровые пузыри конденсируются (схлопываются), не попадая в ядро течения. Эта особенность позволяет обеспечивать помимо больших коэффициентов теплоотдачи (за счет сочетания двух высокоинтенсивных процессов – кипения и конденсации) отсутствие паровой фазы в ядре потока теплоносителя. Однако нужно отметить, что оно реализуется в условиях, позволяющих сконденсировать весь пар вблизи теплоотдающей поверхности, то есть при высоких недогревах ($\Delta t_{\text{нед}} = t_{\text{нас}} - t_{\text{ж}}$), массовых скоростях жидкости (ρw) и плотностях тепловых потоков, далеких от критических ($q_{\text{кр}}$).

Для определения границ безопасного применения технологии кипения недогретой жидкости нужно знать величину $q_{\text{кр}}$. Однако, в наших предыдущих работах [7–9] было показано появление в потоке недогретой воды при приближении к кризису ($q > 0.75 - 0.8q_{\text{кр}}$) крупных паровых агломератов. В случае зачастую используемой системы параллельных каналов, это несет опасность гидравлической разверки (выхода из строя одного или нескольких каналов вследствие “загромождения” паром). Поэтому данное обстоятельство также требует повышенного внимания и дополнительного исследования в случае рассмотрения использования в системах охлаждения конкретных диэлектрических теплоносителей, сильно отличающихся от воды по теплофизическим свойствам.

В данной работе проводилось экспериментальное исследование эволюции структуры двухфазного потока при кипении недогретой диэлектрической жидкости R113 в предкризисных условиях в зависимости от параметров режима (плотности теплового потока, степени недогрева в диапазоне $\Delta t_{\text{нед}} = 12 - 45^\circ\text{C}$, массовой скорости в диапазоне $\rho w = 0 - 1500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) посредством визуализации с помощью высокоскоростной видеосъемки, (метода, успешно применяемого в исследованиях в области теплообмена в двухфазных системах [7–11]).

2. Установка и методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка, на которой проводилось исследование, подробно описана в [7]. На рис. 1 представлена 3D модель основных элементов установки. Рабочий участок (поз. 1 на рис. 1) в виде канала длиной 70 мм имел прямоугольное поперечное сечение 21 x 5 мм. Кипение потока недогретого хладона R113 происходило на поверхности пластины из нержавеющей стали X18H10T длиной 30 мм и шириной 4 мм (поз. 2 на рис. 1), приклеенной к задней стенке корпуса рабочего участка. Нагрев пластины осуществлялся пропусканием через нее постоянного тока с помощью двух медных токоподводов, диаметром 8 мм и длиной 50 мм.

Визуализация процесса кипения осуществлялась через специальное стеклянное смотровое окно на передней стенке рабочего участка с помощью высокоскоростной видеосъемки с частотой 5–10 кГц на камеру Phantom VEO 410s (поз. 4 на рис. 1). Синхронизировано с видеосъемкой велась запись изменения силы тока и падения напряжения на теплоотдающей пластине с частотой 10–1000 Гц на систему сбора данных (ССД) на базе шасси NI Compact DAQ-9178. В большей части экспериментов опыты проводились при динамическом непрерывном повышении тепловой нагрузки вплоть до перегрева греющей пластины. Плотность теплового потока рассчитывалась с учетом площади по-

верхности пластины, омываемой жидкостью, пренебрегая тепловыми потерями в тело рабочего участка. На рис. 2 представлен типичный вид кривой повышения q от времени в эксперименте.

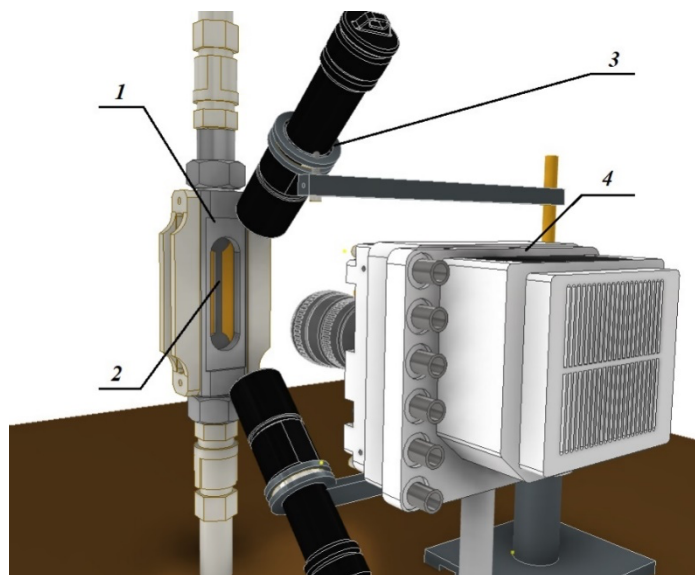


Рис. 1. 3D модель основных элементов установки: 1 – рабочий участок; 2 – теплоотдающая пластина; 3 – фонари подсветки; 4 – высокоскоростная видеокамера.

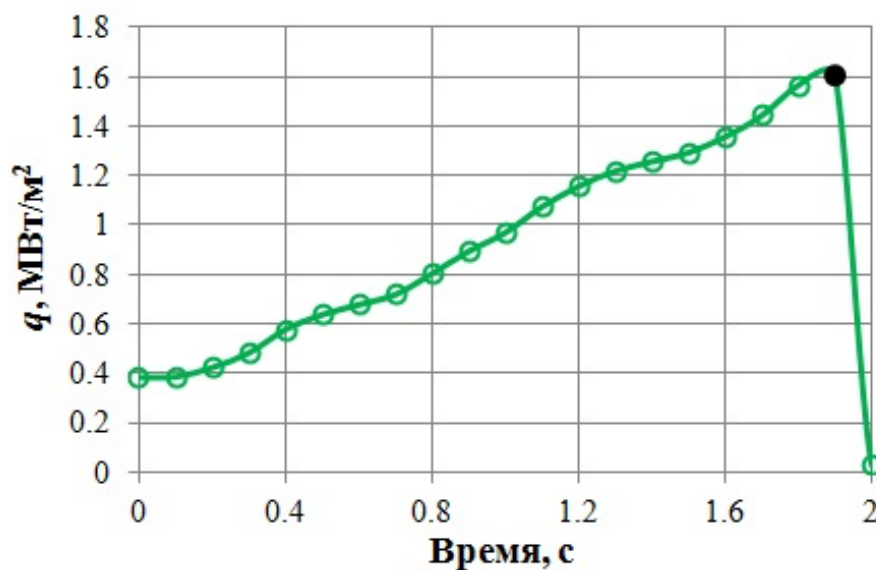


Рис. 2. Типичный вид кривой повышения плотности теплового потока от времени в эксперименте. Черной точкой отмечено значение q в момент пережога пластины.

3. Результаты исследования

На рис. 3 представлены типичные кадры кипения потока недогретого хладона R113 при различных значениях q в одном эксперименте. На рис. 3а изображен кадр пузырькового режима кипения при далеких от $q_{кр}$ тепловых нагрузках. С повышением q в какой-то момент, как и при экспериментах на воде [7–9], в потоке хладона R113 начинают появляться крупные паровые агломераты (рис. 3б). Затем после дальнейшего повышения q на греющей пластине устанавливается пленочный режим кипения с ухудшенными характеристиками теплоотдачи (рис. 3в). Плотность теплового потока в момент появления агломератов составила примерно 0.7 от q при наступлении пленочного кипения, что также близко к значениям, полученным на воде.

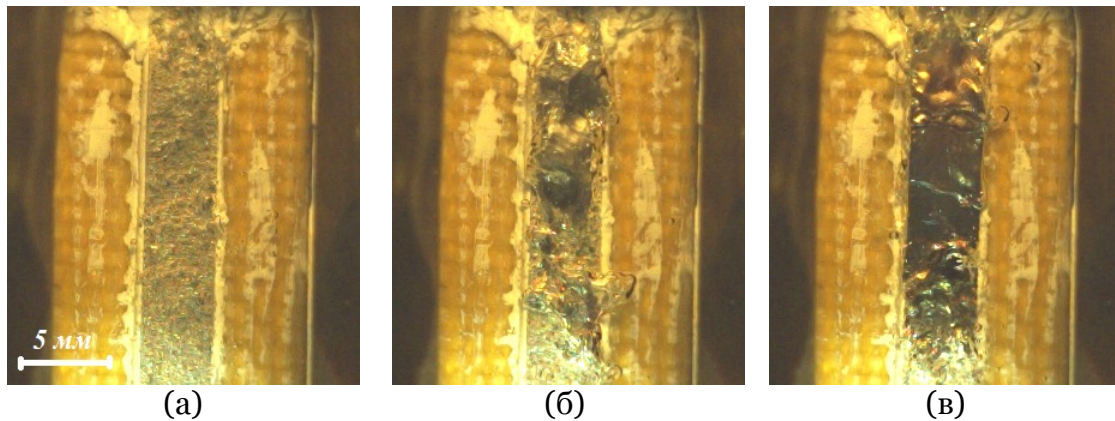


Рис. 3. Кадры кипения потока недогретой жидкости R113, $\Delta t_{\text{нед}} = 28^\circ\text{C}$, $\rho w = 1400$ кг/(м²·с): (а) – $q = 0.64$ МВт/м²; (б) – $q = 0.95$ МВт/м²; (в) – $q = 1.32$ МВт/м². Восходящее движение жидкости. Греющая пластина шириной 4 мм в центре кадра. Время экспозиции – 2 мкс.

Основными параметрами, влияющими на величину критической плотности теплового потока при кипении недогретой жидкости, являются степень ее недогрева и массовая скорость [3]. Естественно, что эти два параметра также должны влиять и на величину q в момент появления в потоке крупных агломератов пара исследуемой жидкости. На рис. 4 и 5 представлены кадры из видео, иллюстрирующие такое влияние степени недогрева и массовой скорости соответственно при одинаковых остальных параметрах. На рис. 4б показан момент появления в потоке жидкости паровых агломератов размерами несколько миллиметров (10–15 мм в длину и 4–8 мм в ширину, зависящую также от ширины греющей пластины). В то же время на рис. 4а, на котором изображен кадр видео из эксперимента с более высокой степенью недогрева при тех же ρw и q , ещё наблюдается типичный режим пузырькового кипения. Соответственно с увеличением $\Delta t_{\text{нед}}$ помимо роста $q_{\text{кр}}$ наблюдается и рост величины q , при которой в кипящем потоке появляются паровые агломераты.

На рис. 5б для сравнения показан кадр видео из эксперимента с отсутствием вынужденного течения теплоносителя в контуре (т.е. при минимальном значении массовой скорости – $\rho w = 0$) при тех же $\Delta t_{\text{нед}}$ и q , что и в эксперименте на кадрах рис. 4а и рис. 5а. Откуда можно сделать вывод, что увеличение массовой скорости, так же как и рост степени недогрева «оттягивает» момент появления паровых агломератов в потоке жидкости в сторону более высоких q . Что представляется достаточно логичным, поскольку рост этих параметров (ρw и $\Delta t_{\text{нед}}$) интенсифицирует процесс отвода теплоты от поверхности пузырей и тем самым процесс их конденсации.

Достаточно любопытными выглядят данные по резкому закипанию и формированию сухих областей, полученные в условиях резкого наброса мощности нагрева теплоотдающей пластины (рис. 6) – ситуации нередко встречающейся в реальной аппаратуре. Скорость увеличения q в данном опыте составляла ~ 14.5 МВт/м² в секунду, что примерно в 20 раз выше, чем в большей части проведенных опытов (рис. 2). На рис. 6а изображен момент начала резкого повышения q и закипания на трех центрах (отмечены белыми стрелками). Через 1 мс (рис. 6б) на данных центрах сформировались сухие области размерами порядка 2–3 мм с появлением ещё нескольких центров вскипания (отмечены черными стрелками). Сухие области по прошествии ещё одной мс (рис. 6в) в результате взаимного слияния и роста заняли большую часть пластины, а через ещё несколько мс реорганизовались в пленочное кипение в центре пластины по ее длине с очагами пузырькового кипения по краям (рис. 6д). Через ~ 65 –70 мс (рис. 6е) практически на всей поверхности пластины установился режим пленочного кипения. Режим с наличием паровых агломератов в потоке в данном случае не наблюдалось. Что, по-видимому, можно объяснить быстрым формированием пленочного режима кипения и

отсутствием большой плотности пузырей, из которых обычно формируются крупные агломераты [7].

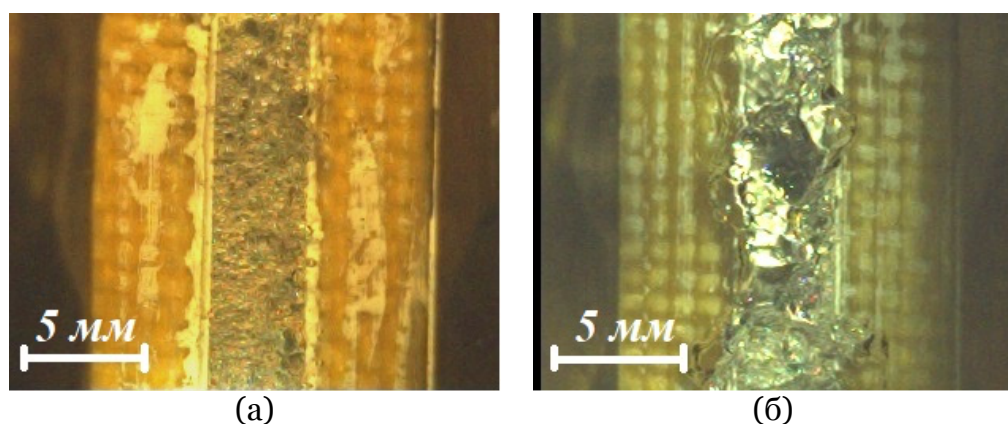


Рис. 4. Кадры кипения потока недогретой жидкости R113, $q = 0.65$ МВт/м²: (а) – $\Delta t_{\text{нед}} = 28^\circ\text{C}$, $\rho w = 1400$ кг/(м²·с); (б) – $\Delta t_{\text{нед}} = 13^\circ\text{C}$, $\rho w = 1500$ кг/(м²·с). Восходящее движение жидкости. Греющая пластина шириной 4 мм в центре кадра. Время экспозиции: (а) – 2 мкс; (б) – 1 мкс.

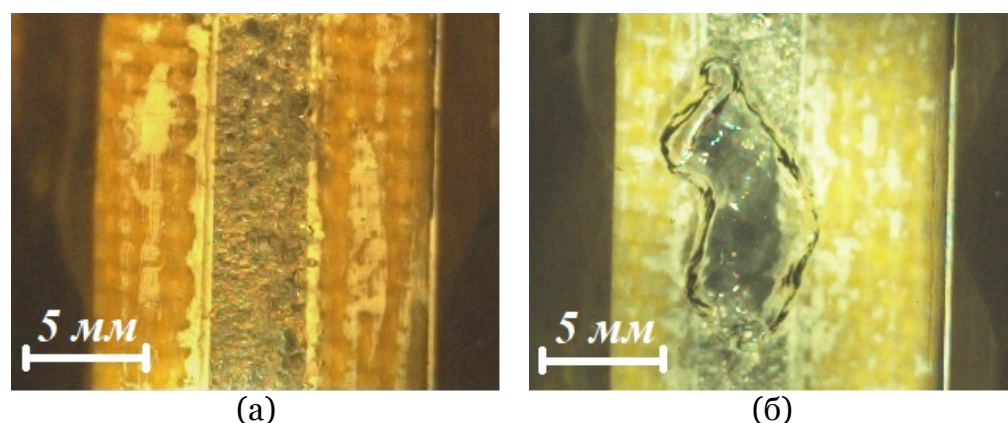


Рис. 5. Кадры кипения потока недогретой жидкости R113, $q = 0.65$ МВт/м²: (а) – $\Delta t_{\text{нед}} = 28^\circ\text{C}$, $\rho w = 1400$ кг/(м²·с); (б) – $\Delta t_{\text{нед}} = 35^\circ\text{C}$, $\rho w = 0$ кг/(м²·с). Восходящее движение жидкости. Греющая пластина шириной 4 мм в центре кадра. Время экспозиции – 2 мкс.

За время между кадрами (рис. 6а–е) плотность теплового потока была увеличена от 0.3 МВт/м² до 1.6 МВт/м². В других экспериментах при тех же величинах $\Delta t_{\text{нед}}$ и ρw в условиях медленного повышения тепловой нагрузки пережог греющей пластины происходил примерно при таких же значениях q . Что не является противоречием, поскольку кризис теплоотдачи при кипении связан как раз таки с наступлением при определенной $q_{\text{кр}}$ пленочного режима кипения, то есть с формированием слоя пара, отделяющего жидкость от греющей поверхности. Однако, при резком повышении q пластина ещё не успевает к этому моменту достаточно прогреться для пережога, чем в условиях медленного роста тепловой нагрузки. То есть значение q при пережоге греющей пластины не всегда соответствует $q_{\text{кр}}$, и зависит от скорости ее нагрева в эксперименте.

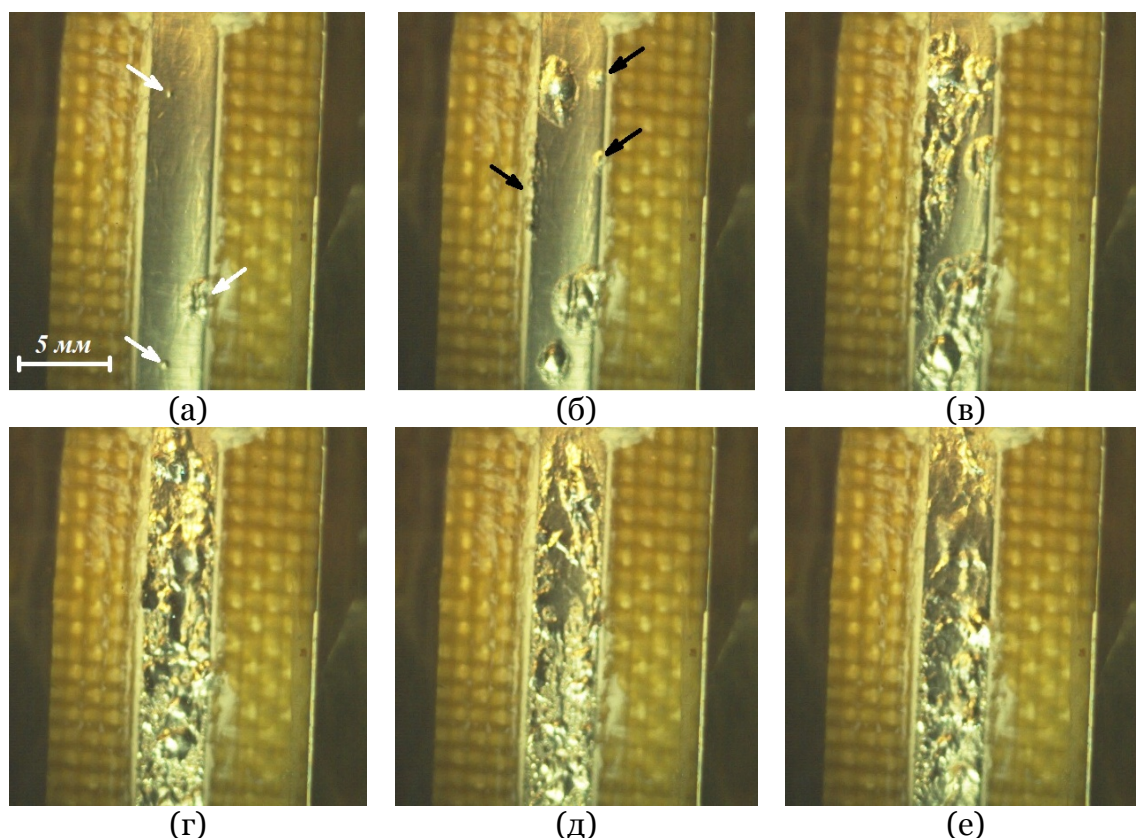


Рис. 6. Кипение потока недогретой жидкости R113 в условиях быстрого увеличения мощности нагревающей пластины, $\Delta t_{\text{нед}} = 38^\circ\text{C}$, $\rho w = 1300 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$: Время от начала резкого роста q (кадр (а)): (б) – 1 мс; (в) – 2 мс; (г) – 4 мс; (д) – 8 мс; (е) – 68 мс. Восходящее движение жидкости. Греющая пластина шириной 4 мм в центре кадра. Время экспозиции – 2 мкс.

Увеличение $\Delta t_{\text{нед}}$ от 13°C до 28°C позволило повысить q в момент пережога греющей пластины от $1.2 \text{ МВт}/\text{м}^2$ до $1.6 \text{ МВт}/\text{м}^2$, то есть примерно на 30%. Наличие недогрева и массовой скорости жидкости ($\rho w = 1400\text{--}1500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) позволило получить значительно более высокие q по сравнению, с кипением в большом объеме, например, близких по свойствам к R113 диэлектрических жидкостей FC-72 и Novec 649 ($q_{\text{кр}} \approx 0.25 \text{ МВт}/\text{м}^2$, [12]). Так же не стоит забывать, исходя из приведенного выше анализа, о завышении получаемых с помощью непрерывного повышения тепловой нагрузки данных по q в момент пережога пластины по сравнению с $q_{\text{кр}}$. Это, несомненно, является минусом данной методики. Однако следует отметить, что основной целью являлась реализация возможности высокоскоростной визуализации в одном эксперименте эволюции двухфазного кипящего потока недогретой жидкости в зависимости от изменения q .

4. Заключение

С помощью визуализации посредством высокоскоростной видеосъемки проведено экспериментальное исследование эволюции структуры двухфазного потока при кипении недогретой диэлектрической жидкости R113 в предкризисных условиях.

Показано, характерное так же для воды, при q , близких к критическим, формирование в потоке R113 крупных паровых агломератов до наступления пленочного режима кипения. Установлено, что повышение степени недогрева и массовой скорости приводит к увеличению q в момент появления паровых агломератов.

Показано влияние скорости нагрева теплоотдающей пластины на структуру двухфазного потока в предкризисных условиях и на значение q в момент пережога.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-00270-24-00).

Список литературы

1. Bar-Cohen A., Holloway C.A. Thermal science and engineering – from macro to nano in 200 Years // Proc. of the 15th Int. Heat Transfer Conf. Kyoto. Japan. 2014. IHTC-15-FL01.
2. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение при вынужденном течении недогретой жидкости как метод отвода высоких тепловых потоков (обзор). Ч. 1. Характеристики, механизм и модель процесса, теплоотдача и гидравлическое сопротивление // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 3–21.
3. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Кипение при вынужденном течении недогретой жидкости как метод отвода высоких тепловых потоков (обзор). Ч. 2. Критические тепловые потоки, интенсификация теплоотдачи // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 3–17.
4. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Азаров Н.А. Визуализация эволюции одиночного пузыря при кипении недогретой жидкости: опыт автоматизации обработки результатов скоростной видеосъемки // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 3. С. 1–6.
5. Kharangate C.R., O'Neill, L.E., Mudawar I., Hasan M.M., Nahra H.K., Balasubramanian R., Hall N.R., Macner A.M., Mackey J.R. Effects of subcooling and two-phase inlet on flow boiling heat transfer and critical heat flux in a horizontal channel with one-sided and double-sided heating // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2015. V. 91. P. 1187–1205.
6. Mudawar I., Devahdhanush V.S., Darges S.J., Hasan M.M., Nahra H.K., Balasubramanian R., Mackey J.R. Heat transfer and interfacial flow physics of microgravity flow boiling in single-side-heated rectangular channel with subcooled inlet conditions—Experiments onboard the International Space Station // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2023. V. 207. 123998.
7. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Вавилов С.Н. Паровые агломераты и сухие пятна как предвестники кризиса кипения недогретой жидкости в канале // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 3. С. 373–383.
8. Vasiliev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A. Evolution of steam-water flow structure under subcooled water boiling at smooth and structured heating surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. № 012008.
9. Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Маслакова И.В. Экспериментальное исследование структуры двухфазного потока недогретой жидкости в предкризисных условиях // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 37–42.
10. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. Визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 2. С. 38–44.
11. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков с твердыми частицами, каплями и пузырями // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61. № 6. С. 926–948.
12. Forrest E., Hu L.W., Buongiorno J., McKrell T. Pool boiling performance of Novec TM 649 engineered fluid // ECI International Conference on Boiling Heat Transfer. Brazil. 2009. INIS-BR-5525.

Visualization of the Structure of Vapor-Liquid Flow During Subcooled R113 Refrigerant Boiling Under Preburnout Conditions

N.V. Vasil'ev^{1,A, B}, S.N. Vavilov^{2,A}, Yu.A. Zeigarnik^{3,A}, E.A. Lidzhiev^{4,A, B}

^A Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^B Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@jiht.ru

⁴ ORCID: 0009-0006-7234-6045, lind722k@gmail.com

Abstract

Boiling of dielectric liquids subcooled to the saturation temperature is a promising method for cooling modern electronic devices. This method makes it possible to remove sufficient heat flux densities (q), maintain the temperature of chip interfaces at the required level, and not create undesirable conditions leading to electrical breakdown in the event of a leak in the coolant circuit. The safe use of the boiling process of subcooled liquid is limited by heat flow densities, at which large agglomerates of the vapor phase appear in the core of the coolant flow, which carries the risk of hydraulic expansion of the applied cooling systems from parallel channels.

In this work, using visualization through high-speed video recording (with a frequency of 5–10 kHz), an experimental study of the evolution of the structure of a two-phase flow during boiling of subcooled dielectric liquid R113 under preburnout conditions was carried out. It has been shown that, also characteristic of water, at q close to critical, the formation of large vapor agglomerates in the R113 flow. It has been established that an increase in the degree of subcooling and mass velocity leads to an increase in q at the moment vapor agglomerates appear. The influence of the heating rate of the heat-transfer plate on the structure of the two-phase flow in preburnout conditions and on the value of q at the moment of burnout is shown.

Keywords: boiling, subcooled liquid, freon R113, vapor agglomerates, critical heat flux density, high-speed video recording.

References

1. Bar-Cohen A., Holloway C.A. Thermal science and engineering – from macro to nano in 200 Years // Proc. of the 15th Int. Heat Transfer Conf. Kyoto. Japan. 2014. IHTC-15-FL01.
2. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A. Boiling in Forced Convection of Subcooled Liquid as a Method for Removing High Heat Fluxes (Review): Part 1. Characteristics, Mechanism, and Model of the Process, Heat Transfer, and Hydraulic Resistance // Thermal Engineering. 2022. V. 69. P. 235–251.
3. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A. Boiling in Forced Convection of Subcooled Liquid as a Method for Removing High Heat Fluxes (Review): Part 2. Critical Heat Fluxes and Heat-Transfer Enhancement // Thermal Engineering. 2022. V. 69. P. 313–325.
4. Vasil'ev N.V., Vavilov S.N., Zeigarnik Yu.A., Azarov N.A. Visualization of the Evolution of a Single Vapor Bubble During Boiling of a Subcooled Liquid: Experience in Automating the

Processing of High-Speed Video Recording Results // Scientific Visualization. 2023. V. 15. № 3. P. 1–6.

5. Kharangate C.R., O'Neill, L.E., Mudawar I., Hasan M.M., Nahra H.K., Balasubramaniam R., Hall N.R., Macner A.M., Mackey J.R. Effects of subcooling and two-phase inlet on flow boiling heat transfer and critical heat flux in a horizontal channel with one-sided and double-sided heating // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2015. V. 91. P. 1187–1205.

6. Mudawar I., Devahdhanush V.S., Darges S.J., Hasan M.M., Nahra H.K., Balasubramaniam R., Mackey J.R. Heat transfer and interfacial flow physics of microgravity flow boiling in single-side-heated rectangular channel with subcooled inlet conditions—Experiments onboard the International Space Station // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2023. V. 207. 123998.

7. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A., Vavilov S.N. Vapor Agglomerates and Dry Spots as Precursors of the Subcooled Liquid Boiling Crisis in a Channel // High Temperature. 2021. V. 59. P. 325–334.

8. Vasiliev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A. Evolution of steam-water flow structure under subcooled water boiling at smooth and structured heating surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 891. № 012008.

9. Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A., Khodakov K.A., Maslakova I.V. Experimental Investigation of Two-Phase Subcooled Liquid Flow Structure under Preburnout Conditions // Thermal Engineering. 2019. V. 66. P. 798–803.

10. Vasil'ev N.V., Vavilov S.N., Zeigarnik Yu.A. Visualization of the Processes Occurring during Spontaneous Triggering of a Vapor Explosion // Scientific Visualization. 2023. V. 15. № 2. P. 38–44.

11. Varaksin A.Yu. Hydrogasdynamics and Thermal Physics of Two-Phase Flows with Solid Particles, Droplets, and Bubbles // High Temperature. 2023. V. 61. P. 852–870.

12. Forrest E., Hu L.W., Buongiorno J., McKrell T. Pool boiling performance of Novec TM 649 engineered fluid // ECI International Conference on Boiling Heat Transfer. Brazil. 2009. INIS-BR-5525.