

УДК 536.248.2

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С ГИДРОФОБНЫМИ КАВЕРНАМИ

© 2024 г. Е. А. Чиннов¹, С. Я. Хмель¹, В. Ю. Владимиров^{1,*},
К. А. Емельяненко², А. М. Емельяненко², Л. Б. Бойнович²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

*E-mail: victor.lipps@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2023 г.

После доработки 19.12.2023 г.

Принята к публикации 14.02.2024 г.

Выполнено исследование процесса кипения воды в большом объеме жидкости при атмосферном давлении на поверхностях с кавернами, полученными методом лазерной абляции и гидрофобизированными за счет хемосорбции фторированного метоксисилана из паров при температуре 105°C. Проведен анализ результатов эксперимента, выполнено сравнение с ранее полученными и литературными данными. Исследовано влияние размеров, формы и расположения гидрофобных каверн на интенсивность теплообмена при кипении. Показано, что основным параметром, определяющим интенсивность теплообмена, является удельная плотность гидрофобизированных каверн на поверхности нагрева, или шаг между ними. Форма и размер каверн не оказывают существенного влияния на теплообмен. Удаление гидрофобизатора из каверн приводит к значительному уменьшению интенсивности теплообмена.

DOI: 10.31857/S0040364424020113

ВВЕДЕНИЕ

Теплообмен при кипении широко используется для охлаждения различных устройств, так как он позволяет отводить большие тепловые потоки от нагреваемой поверхности при невысоких значениях перегрева относительно температуры, соответствующей насыщенному пару. Поэтому интенсификация теплообмена при кипении является актуальной задачей, решение которой существенно влияет на технический прогресс.

Кипение – сложный процесс, который зависит, в частности, от шероховатости (структуры) и смачиваемости поверхности. В настоящее время продолжается рост количества исследований в области кипения, что связано с развитием новых технологий микро- и наномодификации поверхностей, которые позволяют интенсифицировать теплообмен [1–10]. Микро- и наномодификация включают в себя как микро- и наноструктурирование поверхностей, так и нанесение тонких покрытий (нанопокровов). Данные подходы изменяют физико-химические свойства поверхности кипения, в том числе смачиваемость.

Формирование микроструктур на поверхности в виде массива каверн является хорошо изученным методом увеличения коэффициента теплоотдачи за счет увеличения центров зародышеобразования, в которых возникают пузырьки пара [1, 11],

и за счет увеличения частоты образования пузырьков [12]. Для воды в условиях насыщения при атмосферном давлении размеры каверн, являющихся активным местом зародышеобразования, лежат в диапазоне примерно 1–100 мкм [13]. Показано, что коэффициент теплоотдачи увеличивается при увеличении теплового потока и плотности расположения каверн, однако при слишком высокой плотности уменьшается критический тепловой поток. Уменьшение диаметра каверн при высоких тепловых потоках способствует увеличению коэффициента теплоотдачи [14]. Согласно данным [14], при увеличении глубины каверн уменьшается коэффициент теплоотдачи, однако в [15] утверждается, что глубина каверн не оказывает влияния на теплообмен при кипении. В [16] исследовалось влияние геометрической формы каверн (поперечного сечения) на теплообмен при кипении при тепловых потоках менее 28 Вт/см². Показано, что коэффициент теплоотдачи для пентагональных каверн размером 350 мкм и квадратных каверн размером 500 мкм больше коэффициента теплоотдачи для круглых каверн диаметром 500 мкм на 21.1 и 6% соответственно.

Совместное влияние массива каверн и смачиваемости поверхности на интенсификацию теплообмена при кипении в большом объеме исследовалось в [17, 18]. Показано, что

наибольший эффект при больших тепловых потоках достигается для супергидрофильной поверхности с микрокавернами [18], поскольку супергидрофильная поверхность обеспечивает интенсивный перенос жидкости и усиливает испарение микрослоя под образующимся пузырьком. Однако при тепловых потоках менее 20 Вт/см^2 больший коэффициент теплоотдачи получен для супергидрофобной поверхности с микрокавернами, потому что такая поверхность способствует формированию наибольшего количества активных центров зародышеобразования в режиме кипения с изолированными пузырьками.

Если поверхность кипения кремниевая, то для создания массивов каверн на ней обычно используется технология глубокого реактивного ионного травления совместно с фотолитографией. Этот метод позволяет формировать массивы цилиндрических каверн, причем размеры, форма каверн и расстояние между ними выдерживаются с высокой точностью [13, 17]. У метода изготовления каверн с помощью лазерной абляции точность меньше, однако он намного более универсальный. Обычно с использованием этого метода формируются подобные структуры на поверхностях кипения из металла, а также других материалов [16, 18, 19].

Еще один способ интенсификации теплообмена при кипении — это формирование на поверхности кипения областей с разной смачиваемостью. Большой эффект достигается при создании гидрофобных областей (пятен) на гидрофильной поверхности, такие поверхности называются бифильными [5–7, 20]. Известно, что гидрофобность способствует интенсификации кипения при малых тепловых потоках, а гидрофильность при больших тепловых потоках задерживает начало кризиса кипения. Для одновременного использования преимуществ обоих типов поверхностей в процессах кипения было предложено применять бифильные поверхности. В этом случае на поверхности в области гидрофобных пятен образуется большое количество центров парообразования, что обеспечивает быстрое закипание при малых перегревах поверхности нагрева относительно температуры насыщения и высокий коэффициент теплоотдачи. В свою очередь фоновая (окружающая) гидрофильная поверхность между гидрофобными пятнами препятствует коалесценции пузырей и увеличивает критический тепловой поток. Кроме того, происходит разделение потоков жидкости и пара, что облегчает доступ жидкости к поверхности и способствует увеличению критического теплового потока.

Эксперименты на кремниевых, алюминиевых и медных нагревателях показали, что использование бифильных поверхностей приводит к интенсификации теплообмена при кипении в большом

объеме. Причем более перспективными являются поверхности, состоящие из гидрофобных пятен на фоновой (окружающей) гидрофильной поверхности [21–23]. В процессе исследований установлено, что основные определяющие параметры таких поверхностей: размер гидрофобного пятна, шаг между пятнами, число пятен, отношение гидрофобной и полной площадей (отношение суммарной площади гидрофобной поверхности ко всей площади поверхности кипения), контраст смачиваемости гидрофобной и гидрофильной поверхностей. В работах [23, 24] показано, что теплоперенос при кипении зависит от размера и количества гидрофобных точек, шага между ними, но слабо зависит от отношения площадей. Поэтому для существенной интенсификации теплообмена при кипении в большом объеме бифильная поверхность должна содержать большое количество гидрофобных пятен размером $50\text{--}100 \text{ мкм}$, но при этом иметь относительно малую суммарную гидрофобную площадь.

Отметим, что лазерные методы также оказываются перспективными для создания бифильных поверхностей. Эти методы являются лучевыми, причем минимальный диаметр пучка составляет десятки микрон. Поэтому бифильный рисунок для интенсификации теплообмена может быть создан без использования фотолитографии или других методов с применением маски [10]. Этот подход использовался в [22], где осуществлялось лазерное текстурирование определенных участков поверхности для формирования бифильного рисунка.

Дальнейшая интенсификация теплообмена при кипении на бифильной поверхности возможна при ее предварительном микроструктурировании [25–27]. В этом случае синергетический эффект микроструктуры и бифильности или 3D-бифильности дает преимущество перед плоской бифильной поверхностью. В [25, 27] исследовалось влияние на теплообмен при кипении в большом объеме массивов микростолбиков и массивов микроканалов [26], у которых разные части имели разную смачиваемость (например, верхние поверхности гидрофобные, остальные гидрофильные или наоборот). К этим исследованиям также следует отнести работу [18], в которой изучалось влияние массива каверн, созданных методом лазерной абляции, и смачиваемости поверхности на теплообмен при кипении. Однако авторы при гидрофобизации (гидрофилизации) такой поверхности заливали каверны парафином. Поэтому можно предположить, что с большой степенью вероятности смачиваемости поверхности между кавернами и внутри каверн отличаются и заметно. Все эти поверхности кипения являются бифильными микроструктурированными поверхностями. В большинстве случаев

интенсивность теплообмена при кипении на таких поверхностях выше, чем на плоских бифильных поверхностях или микроструктурированных поверхностях с однородной смачиваемостью.

Таким образом, можно заключить, что на металлических поверхностях слабо изучено влияние формы каверн малых размеров (50–100 мкм) на интенсификацию теплообмена при кипении особенно в области больших тепловых потоков. Большой интерес представляет изучение процессов кипения для каверн в условиях гетерогенного смачивания (гидрофобные каверны и гидрофильная окружающая поверхность). Также перспективными являются лазерные методы формирования таких бифильных поверхностей.

Целью данной работы является исследование теплообмена при кипении в большом объеме на бифильных медных поверхностях с массивами гидрофобных каверн. Для создания таких поверхностей использовалась оригинальная комбинация технологий с применением метода лазерной абляции. В данной работе использовались каверны разной формы (треугольной, прямоугольной, круглой) с эквивалентным диаметром от 50 до 100 мкм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основным элементом установки является термостатируемая камера с пятью оптическими окнами для наблюдения за процессами, происходящими в ходе экспериментов. Стенки камеры представляют собой параллельные стальные пластины, между которыми циркулирует жидкость. Камера состоит из трех независимых контуров: коробки с боковыми стенками, верхней стенки (крышки) и нижней стенки (дна). Каждый контур

включает систему соединительных труб и вентиля и соединен с термостатом для поддержания равномерного и постоянного распределения температуры на стенках камеры. Пространственное распределение температуры контролируется термопарами, введенными в камеру через общий герметичный порт и закрепленными на каждой стенке. Камера заполняется до необходимого уровня рабочей жидкостью через канал подачи жидкости. На дне камеры установлен цилиндрический рабочий участок с медным сердечником, закрепленным специальным прижимным устройством. Термопары, используемые для измерения данных для последующего расчета теплового потока от нагревателя, распределены по сердечнику.

На верхней стенке камеры имеется оребренный трубчатый конденсатор пара. Датчик давления пара и предохранительный клапан также расположены в верхней части камеры. Над верхним оптическим окном размещена дополнительная камера общего вида для визуализации и наблюдения за ходом эксперимента (на рисунке не показана).

Система сбора данных состояла из блока NI-9214 и программного обеспечения. Чувствительность измерения температуры данного устройства составляет 0.1°C . Температура нагревателя, жидкости и окружающей среды измерялась с помощью термопар. Термопары были соединены с холодным спаем (без использования автоматической компенсации холодного спае) для повышения точности. Все термопары установки были откалиброваны индивидуально от 0° до 150° с интервалом 10° . При температурах ниже 100° использовался сухоблочный калибратор КС 100-1, в диапазоне от 100° до 150° — глицериновый термостат “Термекс ВТ-8”. В обоих случаях температура контролировалась с помощью

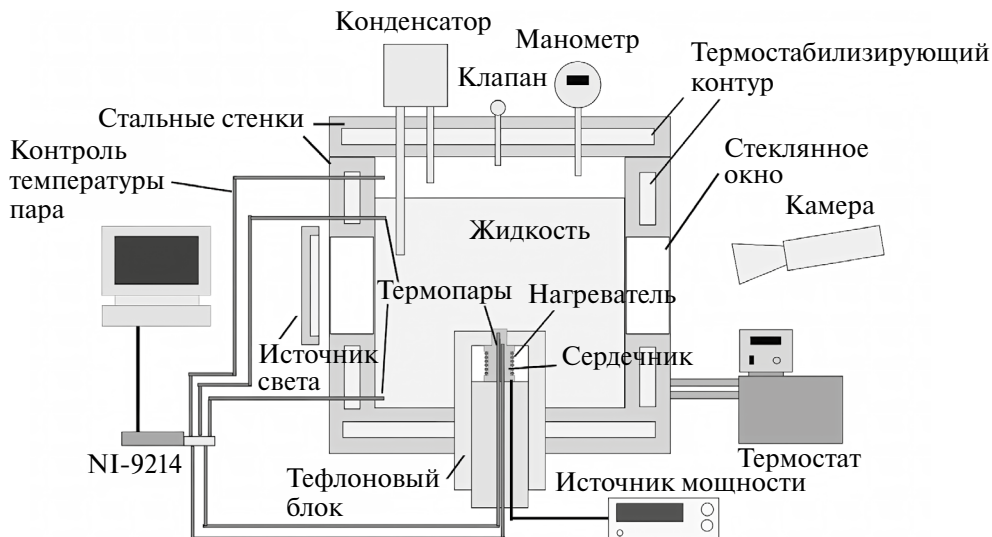


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

измерителя В7-99 с термометрами сопротивления ЭТС-100. Ошибка калибровки составила 0.1°.

В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная, деионизированная, дегазированная вода (Milli-Q). Синтез и осаждение нанопокровов различными методами требует использования нагревателей достаточно малых размеров, которые можно разместить в камерах синтеза и осаждения, быстро монтировать в установку без повреждения микро- и наноструктур на торцевой поверхности нагрева, снимать и регулярно контролировать с помощью электронного микроскопа. Для проведения экспериментов в таких же тщательно контролируемых условиях необходимо изготовить большую серию нагревателей с одинаковыми характеристиками. Сравнение настоящего метода с другими методами, например приклеиванием кремниевых пластин с наноструктурами к нагревателю, показало преимущества используемого подхода. Нагревательный элемент представляет собой цилиндрический медный сердечник с головкой диаметром 5 мм. Поверхность кипения представляет собой плоский верхний торец цилиндра. Кончик сердечника плотно вставлен в отверстие фторопластовой основы и совмещен в одной плоскости с вершиной основы. Источником тепла служит нихромовая проволока, плотно намотанная на стержень сердечника с сопротивлением 4 Ом. Нагревательный элемент тщательно изолирован, чтобы свести к минимуму потери тепла. В качестве теплоизолятора используется стеклоткань, обернутая в несколько слоев вокруг сердцевинки нагревательного элемента. Две термопары Т1 и Т2 устанавливались в пазы на разной глубине медного сердечника для измерения температуры поверхности. Для контроля распределения теплового потока в области сердечника, используемого для намотки нихромового нагревателя, были установлены дополнительные термопары.

Тепловой поток, подводимый к нагревательному элементу, рассчитывался по закону Фурье как

$$q = -k_{\text{Cu}} \frac{T_2 - T_1}{X_1},$$

где q — тепловой поток, X_1 — расстояние между термопарами Т2 и Т1, k_{Cu} — коэффициент теплопроводности меди.

Характеристики используемых поверхностей

№ поверхности	Форма сечения каверн	Эффективный размер каверн, мм	Расстояния между кавернами (шаг), мм	Количество каверн	Отношение гидрофобной и полной площадей, %
1	треугольник	0.07	0.78	32	2.1
2	прямоугольник	0.1	0.78	32	3.4
3	треугольник	0.11	0.78	32	6.2
4	круг	диаметр — 0.05	0.2	485	5.2

Температура поверхности определялась по уравнению

$$T_w = T_1 - q \left(\frac{X_2}{k_{\text{Cu}}} \right),$$

где T_w — температура испытуемой поверхности, X_2 — расстояние между испытуемой поверхностью и термопарой Т1 [28]. Основным источником погрешности измерений была неточность определения реального теплового потока. Эта неточность связана с погрешностью калибровки термопар Т1 и Т2, погрешностью определения глубины пазов для размещения термопар и неточностью их позиционирования в пазах. Суммарная ошибка позиционирования термопар составила около 0.01 мм. Погрешность измерения оценивалась по известным формулам. Итоговая погрешность измерения температуры не превышала 0.2°. Погрешность определения теплового потока не превышала 3 Вт/см².

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ

В данной работе использовались медные нагреватели с полированной поверхностью. После полировки подложки очищались в ультразвуковой бане в растворе поверхностно-активных веществ, изопропиловом спирте, дистиллированной воде и высушивались в потоке азота. Затем на поверхности формировались массивы каверн с эквивалентным диаметром примерно 50–110 мкм методом лазерной абляции. Для текстурирования использовался лазерный маркирующий комплекс “Аргент-М” (ООО “ЦЛТ”, Россия) с инфракрасным иттербиевым волоконным лазером с длиной волны 1.064 мкм, диаметром сфокусированного пучка 40 мкм и пиковой мощностью до 0.95 мДж в режиме ТЕМ₀₀. Проводилась однократная или многократная обработка лазером локальных участков поверхности при длительности импульсов 200 нс и частоте импульсов 20 кГц. В результате были сформированы массивы каверн треугольной, прямоугольной, круглой форм (в сечении). Параметры полученных массивов каверн представлены в таблице. На рис. 2 показаны SEM-изображения отдельных каверн

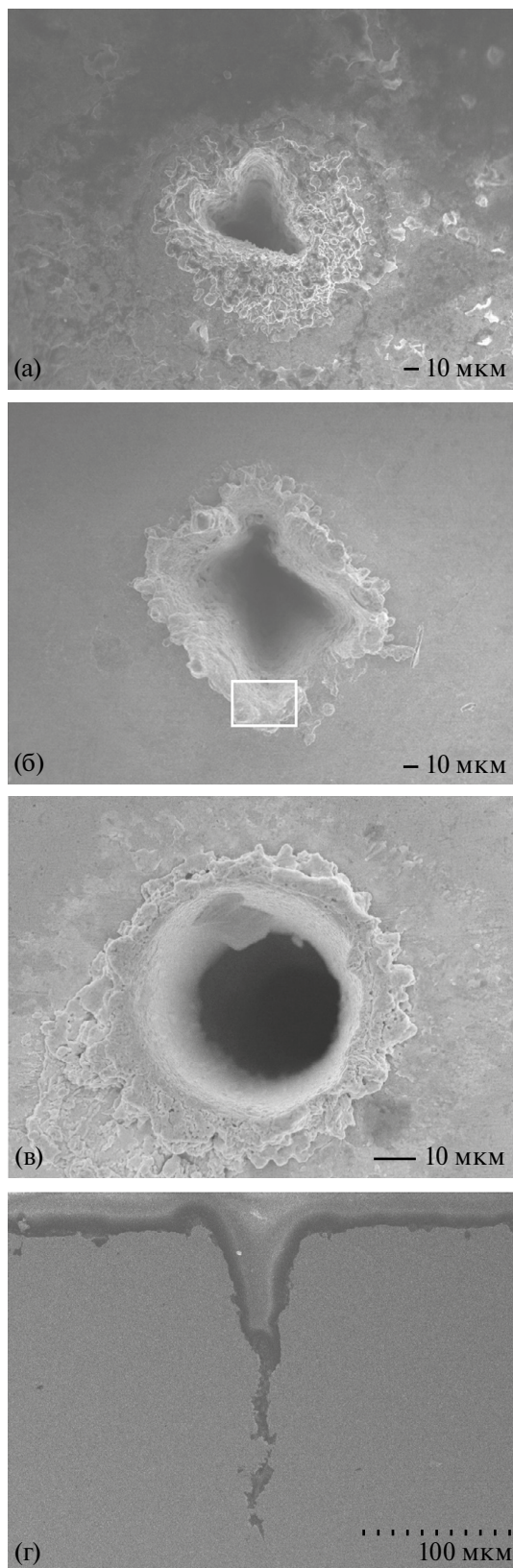


Рис. 2. SEM-изображения отдельных каверн различной формы на поверхности: (а) – № 1 (треугольник), (б) – № 2 (прямоугольник), (в) – № 4 (круг), (г) – SEM-изображение поперечного сечения круглой каверны для поверхности № 4.

треугольной, прямоугольной и круглой форм. Там же дано SEM-изображение поперечного сечения каверны круглой формы для поверхности № 4.

После формирования каверн осуществлялась гидрофобизация медной поверхности. Сначала выполнялась активация поверхности при помощи обработки O_3 и ультрафиолетом, затем проводилась хемосорбция фторированного метоксисилана из паров при температуре $105^\circ C$. В результате формировался слой двумерного химически сшитого фтороксисилана, имеющего силоксановую связь с поверхностью в местах абляции [29, 30]. Предварительные эксперименты показали, что гидрофобизованный слой на гладкой поверхности меди достаточно быстро разрушается, а в областях, обработанных лазером, сохраняется достаточно долго. Основными факторами в этом процессе являются разные типы адгезии: более прочная химическая в обработанных лазером областях и менее прочная физическая в необработанных. Как следствие, в процессе кипения происходит неравномерная деградация гидрофобного покрытия, которая приводит к быстрому разрушению покрытия между кавернами и к относительной стабильности покрытия внутри каверн. Таким образом, из поверхности с однородной смачиваемостью формируется бифильная поверхность с массивами гидрофобных каверн и гидрофильными участками между кавернами.

На рис. 3 представлены SEM-изображения при различных увеличениях боковой стенки прямоугольной полости (см. выделенную область на рис. 2б). Видно, что обработанная лазером поверхность становится шероховатой и пористой.

В некоторых экспериментах возникала необходимость удаления (гидрофилизации) гидрофобного покрытия из фтороксисилана на поверхности нагревателя. Для этого использовалась кислородная плазма тлеющего разряда постоянного тока при следующих параметрах: давление – 1 Торр, ток – 100 мА, мощность – 45 Вт, длительность обработки – 3 мин.

Угол смачивания для гладкой поверхности меди составил $54^\circ \pm 2^\circ$. Для образцов, гидрофобизованных фторированным метоксисиланом, краевой угол в аблированных областях составлял около $170^\circ \pm 2^\circ$ [30], а эффективный угол на поверхностях с гидрофобизованными кавернами – $135^\circ \pm 2^\circ$. Шероховатость R_a гладкой поверхности меди не превышала 0.17 мкм. Характеризация образцов проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6700F. Угол смачивания водой измерялся с помощью прибора KRUS DSA-100.

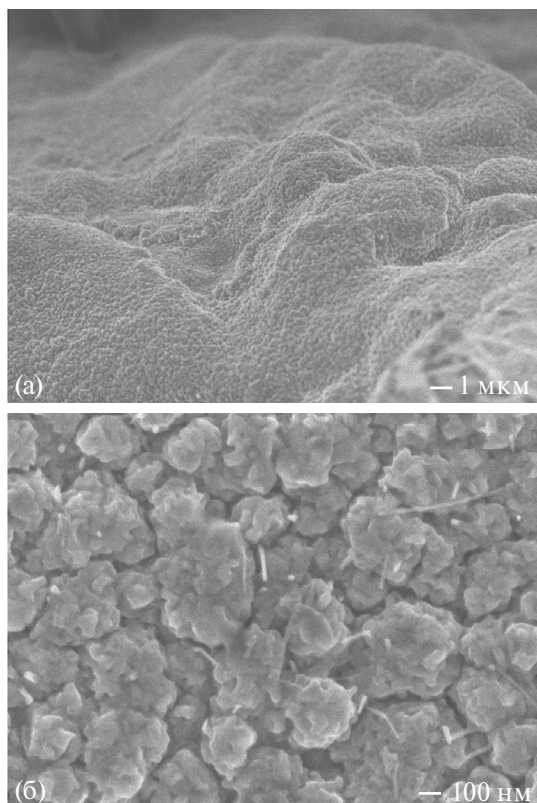


Рис. 3. SEM-изображение стенки индивидуальной каверны на поверхности № 2 (прямоугольник на рис. 2б) при разных увеличениях: (а) — в 5000 раз, (б) — в 50000 раз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлены зависимости плотности теплового потока при кипении от разности температур на поверхности нагрева и в жидкости при условии насыщения для гладкой и модифицированных поверхностей кипения с гидрофобными областями в виде каверн. Все данные сравнивались с известной корреляцией Розенау [31] для меди с параметрами шероховатости, близкими к тем, которые были у используемых в данной работе нагревателей до модификации их поверхностей. Сначала проводились контрольные эксперименты на гладких, не модифицированных образцах. Сравнение этих результатов с корреляцией Розенау показывает достаточно хорошее согласие, т.е. корректную постановку эксперимента. Из рисунка видно, что кривые кипения для всех нагревателей с кавернами лежат заметно выше корреляции Розенау. Интенсификация теплообмена может быть вызвана, во-первых, наличием микроструктур (микрокаверн) на поверхности, во-вторых, предполагаемой бифильностью, сформированной по механизму, описанному выше. Существенных отличий в поведении кривых кипения для поверхностей №№ 1–3 с кавернами с одинаковым шагом (0.78 мм) нет, хотя

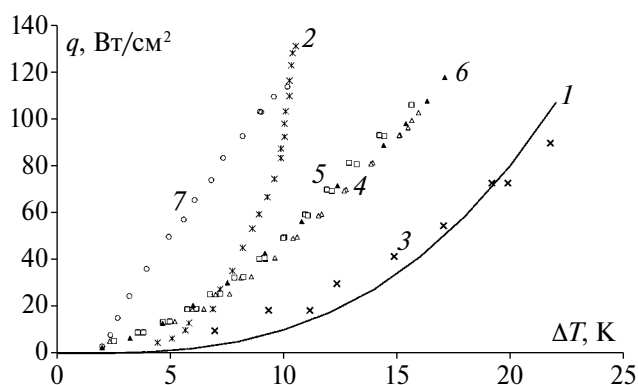


Рис. 4. Зависимости плотности теплового потока от разности температур на поверхности нагрева и в жидкости при условии насыщения для гладкой и модифицированных поверхностей кипения (таблица): 1 — [31], 2 — данные [18] для супергидрофильного образца с диаметром каверн 0.1 мм и шагом 0.4 мм; 3 — гладкий образец, данная работа; 4 — поверхность № 1; 5 — № 2; 6 — № 3; 7 — № 4.

форма каверн, их размер, отношение площадей поверхности для этих нагревателей отличаются существенно, причем отношения площадей разнятся почти в 3 раза (2.1% для образца № 1 и 6.2% для образца № 3). В свою очередь поверхность № 4 с круглыми кавернами и шагом между ними 0.2 мм продемонстрировала значительно большую (до трех раз) интенсивность теплообмена при кипении по сравнению с остальными образцами. При этом размер каверн № 4 меньше примерно в 1.4–2.2 раза, а отношение площадей меняется от заметно меньшего значения (в 2.5 раза) до сопоставимого значения для образца № 3 (5.2 и 6.2% соответственно). Таким образом, можно заключить, что основным фактором в интенсификации теплообмена на поверхностях данного типа является увеличение количества гидрофобных каверн (уменьшение шага), а не увеличение их поперечных размеров или изменение формы. По-видимому, объяснением этого явления может служить заполнение паром гидрофобных каверн, что в первую очередь определяется внутренней площадью поверхности каверны, а не площадью ее поперечного сечения.

В результате одна каверна работает как один центр парообразования, и, соответственно, изменение ее поперечного размера не оказывает существенного влияния на интенсивность теплообмена. Однако остается открытым вопрос о предполагаемой бифильности поверхностей модифицированных нагревателей. Отметим, что угол смачивания на таких поверхностях после проведения экспериментов по кипению уменьшился с исходных $135^\circ \pm 2^\circ$ до $107^\circ \pm 2^\circ$. Это согласуется с предположением о деградации гидрофобного покрытия на гладкой поверхности меди. Но это покрытие может также разрушаться внутри

каверн, в этом случае не будет происходить образования бифильной поверхности. Последнему предположению противоречит долговременная стабильность кривых кипения, а значит, и состояния модифицированной поверхности. Эксперименты по определению стабильности проводились в течение нескольких лет. Длительность каждого эксперимента составляла 4–5 ч. Например, на поверхности № 1 проводилось восемь экспериментов в течение трех лет, первый и восьмой из которых слабо отличаются, а в области высоких тепловых потоков полностью совпадают (рис. 5).

Для прямой проверки сохранения гидрофобных свойств покрытия на внутренних поверхностях каверн, а значит, и бифильности всей поверхности, был предложен следующий эксперимент. Известно, что обработка покрытия из фтороксисилана с помощью кислородной плазмы приводит к его деградации и потере гидрофобности. Если обработать модифицированные поверхности кислородной плазмой, то все покрытие станет гидрофильным, в том числе и внутри каверн за счет проникновения плазмы в каверны. Такая обработка была применена для поверхности № 1 (после проведения восьми экспериментов по определению стабильности). Затем проведены еще два эксперимента по кипению с интервалом в 40 дней. Результаты этих экспериментов (девятый и десятый эксперименты) представлены на рис. 5 для сравнения с кривыми кипения до обработки плазмой. После обработки плазмой интенсивность теплообмена резко уменьшилась, и кривая кипения практически находится на уровне корреляции Розенау. Возможным объяснением некоторого подъема интенсивности кипения

в десятом эксперименте по сравнению с девятым может служить явление спонтанной гидрофобизации нанотекстурированной внутренней поверхности каверн органическими загрязнениями из атмосферы за 40 дней между экспериментами. Такая спонтанная гидрофобизация лазерно-текстурированных поверхностей наблюдалась неоднократно [32, 33].

Эти данные подтверждают, что внутренняя поверхность каверн до обработки плазмой была гидрофобной, а вся поверхность медного нагревателя была бифильной с массивами гидрофобных каверн. Таким образом, можно считать доказанным, что интенсификация теплообмена для медных нагревателей, представленных на рис. 4, происходит за счет бифильности микроструктурированных поверхностей.

Исследовано влияние вклада микроструктур, в данном случае микрокаверн, в интенсификацию теплообмена при кипении в большом объеме. Для этого на рис. 6 представлено сравнение кривой кипения для поверхности № 4 с плоскими бифильными поверхностями с фторполимерными пятнами из [23]. Эти поверхности (№№ 5, 6 [23]) имеют аналогичное поверхности № 4 взаимное расположение гидрофобных областей и их размеры (диаметр — 0.05 мм и шаг — 0.2 мм). Несмотря на сходные размеры, расстояния и, соответственно, отношение гидрофобной и полной площадей, образец с кавернами демонстрирует до двух раз большую интенсивность теплообмена в сравнении с плоскими бифильными образцами. Сравнение кривых кипения для поверхности № 1 до обработки кислородной плазмой и для плоской бифильной поверхности № 4 [23] с диаметром фторполимерных пятен 0.1 мм и шагом 0.5 мм приведено на рис. 5. В этом случае кривые кипения близки друг к другу, по-видимому, потому что шаг для плоского образца меньше, чем

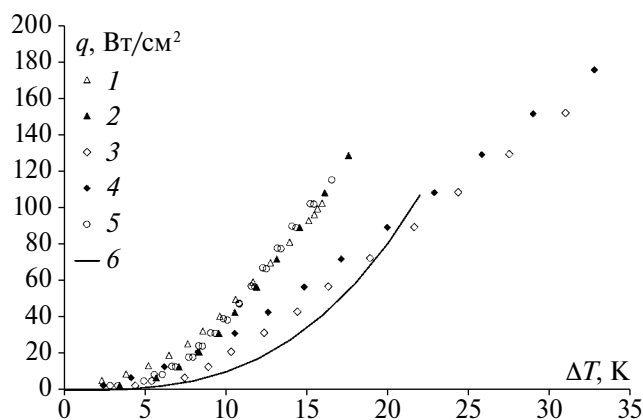


Рис. 5. Зависимости плотности теплового потока при кипении от разности температур на поверхности нагрева и в жидкости для образца № 1 с треугольными кавернами до обработки плазмой, демонстрирующие стабильность в течении трех лет (первый и восьмой эксперименты), и после обработки плазмой (девятый и десятый эксперименты): 1 — поверхность № 1, первый эксперимент; 2 — № 1, восьмой; 3 — № 1, девятый; 4 — № 1, десятый; 5 — № 4, [23]; 6 — [31].

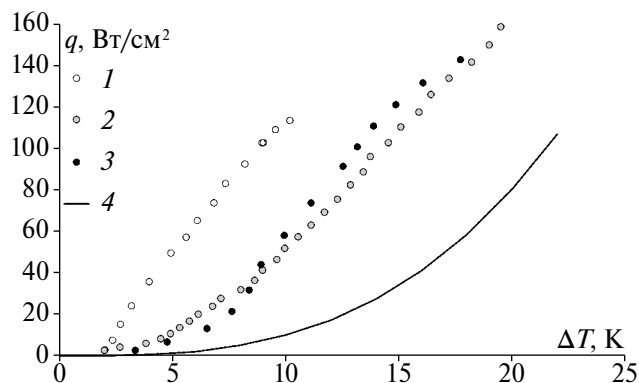


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных для поверхности № 4 с ранее полученными результатами на аналогичных по геометрическим параметрам плоских бифильных поверхностях: 1 — поверхность № 4; 2 — № 5, [23]; 3 — № 6, [23]; 4 — [31].

шаг для поверхности № 1 (0.78 мм). Также отметим, что для плоских образцов из [23] в качестве гидрофобизатора использовалось покрытие из фторполимера, у которого угол смачивания равен 120° . В данной работе применялось покрытие из фтороксисилана, которое на текстурированной внутренней поверхности каверн дает угол смачивания 170° .

Тем не менее из представленных данных следует, что использование бифильных медных поверхностей с массивами гидрофобных каверн обеспечивает большую интенсификацию теплообмена, чем использование плоских бифильных поверхностей или микроструктурированных поверхностей с однородной смачиваемостью.

Выполнено сравнение данных [18] для поверхностей с микрокавернами и разной смачиваемостью с результатами, полученными в настоящей работе. На рис. 4 показана кривая кипения [18] для супергидрофильной поверхности с микрокавернами, которая демонстрирует наибольшую интенсификацию теплообмена. Диаметр микрокаверн составлял 0.1 мм, а шаг — 0.4 мм (расстояние между краями каверн — 0.3 мм). При больших тепловых потоках интенсивность теплообмена для этой поверхности больше, чем для поверхностей №№ 1–3 (шаг — 0.78 мм), но меньше, чем для поверхности № 4 (шаг — 0.2 мм) в соответствии с определяющим параметром — шагом. Такое поведение графика не может быть объяснено только наличием каверн и, как отмечалось во Введении, эту поверхность можно считать бифильной за счет супергидрофильности поверхности между кавернами и более гидрофобной поверхностью внутри каверн. Другие особенности этой кривой кипения (поведение при малых тепловых потоках, угол наклона, большое значение критического теплового потока) также могут быть объяснены за счет этих же факторов. Значит, супергидрофильная поверхность с микрокавернами, использованная в [18] для исследования процессов кипения, является бифильной микроструктурированной поверхностью.

Таким образом, можно заключить, что ключевую роль в значительной интенсификации теплообмена играет не лазерное текстурирование само по себе и не формирование бифильности на плоской поверхности, а сочетание лазерного текстурирования и гидрофобной обработки, приводящее к 3D-бифильности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изготовлены теплообменные поверхности с кавернами, полученными методом лазерной абляции и гидрофобизированные за счет хемосорбции фторированного метоксисилана из паров

при температуре 105°C . Показано, что такие поверхности являются бифильными микроструктурированными поверхностями.

Исследовано влияние размеров, формы и расположения гидрофобных областей на интенсивность теплообмена при кипении. Показано, что основным параметром, определяющим интенсивность теплообмена, является удельная плотность (шаг) гидрофобизированных каверн. Форма и размер каверн не оказывают существенного влияния на теплообмен. Удаление гидрофобизатора из каверн приводит к значительному уменьшению интенсивности теплообмена. Установлено, что бифильные медные поверхности с массивами гидрофобных каверн обеспечивают большую интенсификацию теплообмена, чем плоские бифильные поверхности с тем же расположением и размером гидрофобных пятен.

Разработка и создание экспериментальной установки, проведение экспериментов, исследование морфологии образцов и изменений их свойств в процессе эксплуатации выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 22-19-20090 и Правительства Новосибирской области, соглашение № р-13. Подбор методов лазерного текстурирования поверхностей выполнялся при финансовой поддержке гранта РНФ 23-73-30004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shojaeian M., Kosar A.* Pool Boiling and Flow Boiling on Micro- and Nanostructured Surfaces // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2015. V. 63. P. 45.
2. *Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н.* Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении // *Российские нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 18.
3. *Попов И.А., Шелчков А.В., Гортышов Ю.Ф., Зубков Н.Н.* Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 4. С. 537.
4. *Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Эпельфельд А.В.* Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
5. *Дедов А.В.* Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // *Теплоэнергетика*. 2019. № 12. С. 18.
6. *Liang G., Mudawar I.* Review of Pool Boiling Enhancement by Surface Modification // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2019. V. 128. P. 892.
7. *Li W., Dai R., Zeng M., Wang Q.* Review of Two Types of Surface Modification on Pool Boiling Enhancement: Passive and Active // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2020. V. 130. P. 109926.
8. *Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.* Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 2. С. 280.

9. Khmel S., Baranov E., Vladimirov V., Safonov A., Chinnov E. Experimental Study of Pool Boiling on Heaters with Nanomodified Surfaces Under Saturation // *Heat Transfer Eng.* 2022. V. 43. № 20. P. 1724.
10. Serdyukov V., Vladko I., Starinskiy S., Rodionov A., Shukhov Y., Malakhov I., Safonov A., Surtaev A. Pool Boiling Performance on the Textured Hemi-wicking Surfaces Fabricated by Nanosecond Laser Ablation // *Appl. Therm. Eng.* 2023. V. 228. P. 120472.
11. Hsu Y.Y. On the Size Range of Active Nucleation Cavities on a Heating Surface // *J. Heat Transfer.* 1962. V. 84. P. 207.
12. Dong L., Quan X., Cheng P. An Experimental Investigation of Enhanced Pool Boiling Heat Transfer from Surfaces with Micro/Nano-structures // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 71. P. 189.
13. Sitar A., Može M., Crivellari M., Schille J., Golobič I. Nucleate Pool Boiling Heat Transfer on Etched and Laser Structured Silicon Surfaces // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 147. P. 118956.
14. Yu C.K., Lu D.C., Cheng T.Ch. Pool Boiling Heat Transfer on Artificial Micro-cavity Surfaces in Dielectric Fluid FC-72 // *J. Micromech. Microeng.* 2006. V. 16. № 10. P. 2092.
15. Bon B., Klausner J., McKenna E. An Investigation of Pool Boiling Heat Transfer on Single Crystal Surfaces and a Dense Array of Cylindrical Cavities // *J. Heat Transfer.* 2013. V. 135. № 12. P. 121501.
16. Eid E.I., Al-Nagdy A.A., Khalaf-Allah R.A. Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Above Laser Machining Heating Surfaces with Different Micro-cavity Geometric Shape for Water–Aluminum Oxide Nanofluid // *Exp. Heat Transfer.* 2022. V. 35. № 5. P. 688.
17. Sadaghiani A.K., Altay R., Noh H., Kwak H.J., Sendur K., Misirlioğlu B., Park H.S., Kosar A. Effects of Bubble Coalescence on Pool Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux – A Parametric Study Based on Artificial Cavity Geometry and Surface Wettability // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 147. P. 118952.
18. Gao L., Bai M., Lv J., Li Y., Lv X., Liu X., Li Y. Experimental Studies for the Combined Effects of Micro-cavity and Surface Wettability on Saturated Pool Boiling // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2023. V. 140. P. 110769.
19. Kumar G.U., Suresh S., Kumar C.S.S., Back S., Kang B., Lee H.J. A Review on the Role of Laser Textured Surfaces on Boiling Heat Transfer // *Appl. Therm. Eng.* 2020. V. 174. P. 115274.
20. Chen J., Ahmad Sh., Cai J., Liu H., Lau K.T., Zhao J. Latest Progress on Nanotechnology Aided Boiling Heat Transfer Enhancement: A Review // *Energy.* 2021. V. 215. P. 119114.
21. Betz A., Xu J., Qiu H., Attinger D. Do Surfaces with Mixed Hydrophilic and Hydrophobic Areas Enhance Pool Boiling? // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 97. № 14.
22. Može M., Zupančič M., Golobič I. Pattern Geometry Optimization on Superbiphilic Aluminum Surfaces for Enhanced Pool Boiling Heat Transfer // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 161. P. 120265.
23. Chinnov E.A., Khmel S.Ya., Vladimirov V.Yu., Safonov A.I., Semionov V.V., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Boiling Heat Transfer Enhancement on Biphilic Surfaces // *Energies.* 2022. V. 15. № 19. P. 7296.
24. Jo H., Kim S.H., Park H.S., Kim M.H. Critical Heat Flux and Nucleate Boiling on Several Heterogeneous Wetting Surfaces: Controlled Hydrophobic Patterns on a Hydrophilic Substrate // *Int. J. Multiphase Flow.* 2014. V. 62. P. 101.
25. Jo H.J., Yu D.I., Noh H.W., Park H.S., Kim M.H. Boiling on Spatially Controlled Heterogeneous Surfaces: Wettability Patterns on Microstructures // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 106. № 18.
26. Zhang W., Chai Y., Xu J., Liu G., Sun Y. 3D Heterogeneous Wetting Microchannel Surfaces for Boiling Heat Transfer Enhancement // *Appl. Surf. Sci.* 2018. V. 457. P. 891.
27. Cho H.R., Park S.Ch., Kim D., Joo H.-M., Yu D.I. Experimental Study on Pool Boiling on Hydrophilic Micro/Nanotextured Surfaces with Hydrophobic Patterns // *Energies.* 2021. V. 14. № 22. P. 7543.
28. Može M., Zupančič M., Golobič I. Investigation of the Scatter in Reported Pool Boiling CHF Measurements Including Analysis of Heat Flux and Measurement Uncertainty Evaluation Methodology // *Appl. Therm. Eng.* 2020. V. 169. P. 114938.
29. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The Behaviour of Fluoro- and Hydrocarbon Surfactants Used for Fabrication of Superhydrophobic Coatings at Solid/Water Interface // *Colloids Surf., A.* 2015. V. 481. P. 167.
30. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Chulkiva E.V., Shiryayev A.A., Emelyanenko A.M. Pulsed Laser Induced Triple Layer Copper Oxide Structure for Durable Polyfunctionality of Superhydrophobic Coatings // *Adv. Mater. Interfaces.* 2018. V. 5. № 21. P. 1801099.
31. Rohsenow W.M. A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids // *Trans. ASME.* 1952. V. 74. № 6. P. 969.
32. Yang Z., Liu X., Tian Y. Insights into the Wettability Transition of Nanosecond Laser Ablated Surface Under Ambient Air Exposure // *J. Colloid Interface Sci.* 2019. V. 533. P. 268.
33. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Shiryayev A.A. Comment on “Nanosecond Laser Textured Superhydrophobic Metallic Surfaces and Their Chemical Sensing Applications” by Duong V. Ta, Andrew Dunn, Thomas J. Wasley, Robert W. Kay, Jonathan Stringer, Patrick J. Smith, Colm Connaughton, Jonathan D. Shephard (*Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 357. P. 248.) // *Appl. Surf. Sci.* 2016. V. 379. P. 111.