
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ПРОСТОЙ СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО
ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ¹**© 2024 г. А. В. Дедов^а, М. Д. Филиппов^а, *^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия*e-mail: filippovmd@mpei.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.

После доработки 22.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Работа посвящена исследованию возможности увеличения критического теплового потока $q_{кр}$ при кипении за счет использования поверхностей, состоящих из участков с разной теплопроводностью. Представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена при кипении насыщенной диэлектрической жидкости метоксинонафторбутан (Novex 7100) в большом объеме на биметаллических поверхностях. Исследования выполнены для биметаллических образцов, а также для образцов из меди и нержавеющей стали 08X18H10T в диапазоне давлений 0.1–0.4 МПа. Приведено описание экспериментальной установки и используемых методик. Получены кривые кипения для каждого образца во всем представленном диапазоне давлений жидкости с шагом 0.1 МПа, приведены таблицы значений критического теплового потока. Показано влияние давления жидкости на относительное увеличение $q_{кр}$ для биметаллических образцов. Выполнено сравнение значений $q_{кр}$, полученных на всех образцах, показано увеличение $q_{кр}$ на биметаллических поверхностях до 20%. Выполнен краткий обзор проведенных ранее исследований, представлены экспериментальные данные других авторов о теплообмене при кипении на поверхностях с модулированной теплопроводностью и при кипении Novex 7100, в том числе на образцах с модифицированной поверхностью теплообмена. Представлено сопоставление полученных результатов с немногочисленными данными других авторов. Выполнено численное моделирование температурного поля в биметаллическом образце, представлено распределение температуры по теплообменной поверхности. Причиной увеличения $q_{кр}$ является неизотермичность поверхности теплообмена, приводящая к регуляризации процесса кипения.

Ключевые слова: кипение, биметаллический образец, критический тепловой поток, кривая кипения, насыщенная жидкость, модифицированная поверхность теплообмена, модулированная теплопроводность

DOI: 10.56304/S0040363624010028

Для создания современной техники необходимы простые и надежные решения, обеспечивающие стационарный теплоотвод и термостабилизацию рабочих элементов при тепловом потоке, до десяти раз превышающем критический $q_{кр}$ для выбранной жидкости при кипении ее в большом объеме. “Мировой рекорд” $q_{кр}$ (276 МВт/м²) получен при кипении в сильно недогретом потоке воды в трубке диаметром 0.4 мм при массовой скорости потока 12×10^4 кг/(м² · с) и вряд ли будет побит в силу бессмысленности подобных параметров в реальных устройствах. Кипение в потоке недогретой жидкости — наиболее действенный способ достижения максимального $q_{кр}$ [1, 2].

При реализации некоторых технологий используют кипение насыщенной жидкости. При этом в целях увеличения теплоотдачи и повышения $q_{кр}$ применяют модифицированные поверхности теплообмена. Задача исследования двухфазного теплообмена (кипение, конденсация, испарение, в том числе пленок и одиночных капель) на структурированных (модифицированных) поверхностях остается самой популярной уже около 10 лет. Лавинообразное увеличение числа публикаций, посвященных этой теме, обусловлено как наличием различных современных технологий модификации поверхностей (абляция фемтосекундным лазерным излучением, методы, заимствованные из микроэлектроники, плазменное воздействие и др.), так и растущими возможностями практического применения вы-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00410).

сокоинтенсивного охлаждения. К настоящему времени опубликовано уже несколько десятков подробных обзоров по этой проблеме, в том числе и отечественных авторов [3–5], и не является фантазией даже появление обзора “обзоров”. Получено большое количество результатов при проведении лабораторных опытов на поверхностях площадью примерно 1 см^2 по значительной интенсификации теплообмена и $q_{\text{кр}}$ при кипении, как правило, воды в большом объеме при атмосферном давлении. При этом происходит своеобразная “гонка” за рекордными значениями коэффициентов теплоотдачи и $q_{\text{кр}}$. Вместе с тем вопросы, касающиеся старения поверхности, влияния осадений при кипении, работоспособности процессов за пределами атмосферного давления, применения технологий не в лабораторном опыте, а в реальных устройствах, довольно редко поднимаются в исследованиях, результаты которых опубликованы.

Почти не замеченным является направление, лишенное вопросов старения поверхности и загрязнения разнообразных уникальных микроструктур отложениями, связанное с возможностью интенсификации кипения на поверхностях с модулированной теплопроводностью. Подобная модификация поверхностей предложена в работе [6]. Результаты интенсификации теплообмена, представленные в этой работе, соответствуют лучшим мировым достижениям (увеличение коэффициента теплоотдачи до 4 раз, $q_{\text{кр}}$ до 2 раз) и получены благодаря простой модификации поверхности: в медном образце сделаны регулярные углубления в виде канавок глубиной 0.3 мм, шириной 0.4 мм, шагом 1.0–3.7 мм, заполненных эпоксидной смолой. Теплопроводность смолы и меди составляла соответственно 1 и 400 Вт/(м · К). Данное различие, по мнению авторов, обеспечивало распределение температуры поверхности таким образом, что кипение преимущественно происходило по центру медных полос, над которыми и поднимался пар, тогда как приток жидкости к поверхности осуществлялся над канавкой с эпоксидной смолой. Такая “регуляризация” процесса кипения, разделение путей отвода пара от поверхности и притока жидкости обеспечивали колоссальную интенсификацию теплообмена и повышение $q_{\text{кр}}$. Максимальное улучшение было достигнуто при шаге 2.33 мм. Последующее уменьшение шага приводило к снижению интенсификации и даже давало результаты хуже, чем на поверхности без модификации. В качестве рабочей жидкости применяли воду.

Целью настоящей статьи является развитие подобного метода интенсификации кипения и

обобщение известных данных. Для исследований выбрана химически стойкая диэлектрическая жидкость Novac 7100, с помощью которой можно провести опыты при давлениях выше атмосферного. В статье представлены как результаты работ по кипению в большом объеме на поверхностях с модулированной теплопроводностью, так и данные немногочисленных исследований кипения жидкости Novac 7100 на структурированных поверхностях.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ С МОДУЛИРОВАННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ И ПРИ КИПЕНИИ NOVAC 7100

В работе [7] исследования интенсификации кипения проводили на поверхностях со вставками из эпоксидной смолы. В медной поверхности выполняли вырезы, которые заполняли эпоксидной смолой. В качестве рабочего тела использовали деионизированную воду и водный раствор додецилсульфата натрия (SDS). Авторы установили, что, по сравнению с деионизированной водой, раствор SDS более эффективно усиливает теплообмен в процессе кипения при низком и среднем тепловом потоке. Однако эффект повторного смачивания поверхности нагревателя подавляется, а $q_{\text{кр}}$ становится ниже, чем у деионизированной воды. Также авторы отметили, что $q_{\text{кр}}$ повышается при кипении раствора SDS на поверхности со вставками по сравнению с кипением на гладкой медной поверхности. Характеристики кипения на поверхности со вставками аналогичны таковым на гладкой медной поверхности. Температура поверхности со вставками повышается медленнее при более высоких значениях $q_{\text{кр}}$, чем поверхности из гладкой меди.

Авторы [8] разработали теоретическую модель двухфазного потока и теплообмена при кипении на поверхностях со вставками. С учетом модулированной теплопроводности при решении сопряженной задачи кипения выполняли численное моделирование на основе модифицированного метода решеточных уравнений Больцмана. Результаты расчетов показали, что эффективность кипения на поверхности со вставками повышается по сравнению с однородной поверхностью. Усиление теплообмена оптимизируется, когда шаг вставки равен капиллярной постоянной кипящей жидкости. Увеличение ширины вставок при кипении на поверхности со вставками в условиях малых перегревов приводит к повышению $q_{\text{кр}}$. Изменение глубины вставок практически не влияет на эффективность теплопередачи при кипении.

Таблица 1. Сравнительные результаты опытов по исследованию кипения и $q_{кр}$ на структурированных поверхностях при кипении в большом объеме при атмосферном давлении

Источник	Жидкость	$q_{кр}$ в сравнении с $q_{кр}$ на обычной поверхности	Рабочий участок
[6]	Вода	Повышение на 95%, $q_{кр\ max} = 2.32\ \text{МВт/м}^2$	Медные пластины со вставками из эпоксидной смолы
[7]	Деионизированная вода и водный раствор додецилсульфата натрия	Повышение на 15%, $q_{кр\ max} = 1.15\ \text{МВт/м}^2$	То же
[8]	Вода	Повышение на 17%	Моделирование теплообмена от поверхности с различной теплопроводностью
[9]	Novac 7100	Повышение на 40%, $q_{кр\ max} = 522\ \text{кВт/м}^2$	Медные и титановые подложки с покрытием из TiO_2
[10]	Novac 7100	Снижение на 14%, $q_{кр\ max} = 275\ \text{кВт/м}^2$	Медные пластины с отверстиями
[11]	Novac 7100	Повышение на 56%, $q_{кр\ max} = 390\ \text{кВт/м}^2$	Слой медной пены различной толщины

В настоящее время большинство экспериментов по исследованию теплообмена при кипении выполняются с использованием воды или фреонов в качестве рабочих жидкостей. В связи с этим число исследований теплообмена при кипении диэлектрической жидкости Novac 7100 весьма невелико. Далее рассматриваются результаты некоторых таких исследований.

Влияние нанопокрывтия на теплоотдачу и критические тепловые потоки было подробно изучено в [9]. В этой работе использовали медные и титановые подложки, на которые наносили нанотрубки из диоксида титана TiO_2 , в качестве рабочей жидкости применяли Novac 7100. Авторы отметили, что при использовании обеих поверхностей, покрытых нанотрубками, $q_{кр}$ увеличивается примерно на 40% по сравнению с обычными поверхностями. При применении титановой подложки с покрытием из нанотрубок коэффициент теплоотдачи увеличивается примерно на 65% по сравнению с обычной поверхностью. Это может быть вызвано изменением динамики движения пузырьков и эффективным повторным смачиванием сухих участков на поверхности с нанотрубками, которое связано с более быстрым пополнением жидкости за счет капиллярных эффектов.

В работе [10] исследовали теплообмен на медной поверхности с микроструктурой, создаваемой путем высверливания отверстий и варьирования шага между ними. Полученная шероховатость составляла 0.48–7.56 мкм. Исследования проводили при атмосферном давлении с использованием

жидкости Novac 7100. Результаты показали, что с увеличением шероховатости повышается коэффициент теплоотдачи. На большинстве поверхностей коэффициент теплоотдачи увеличивается, но на всех образцах с модифицированной поверхностью снижается $q_{кр}$. Авторы отметили, что $q_{кр}$ увеличивается на 150% на образцах с наибольшей шероховатостью 7.56 мкм по сравнению с почти гладким образцом – шероховатостью 0.48 мкм.

В [11] проводили эксперименты на поверхности из медной пены толщиной 3, 2 и 1 мм. В качестве рабочей жидкости использовали Novac 7100. Авторы установили, что при толщине 2 и 3 мм обеспечивается лучшая интенсификация при низких тепловых потоках, в то время как при толщине 1 мм – лучшие показатели при высоких тепловых потоках. При тепловых потоках ниже 50 кВт/м² большая площадь смачивания поверхности увеличивает зону естественной конвекции. При более высоких тепловых потоках, в основном выше 200 кВт/м², пузырьки пара задерживаются в структуре пены, что приводит к нестабильному кипению и препятствует повторному смачиванию поверхности жидкостью. Поэтому при наименьшей толщине пены захват пара в ячейку уменьшается. Авторы отметили, что не существует постоянной оптимальной толщины пены – она изменяется в зависимости от теплового потока.

В табл. 1 приведены результаты работ [6–11] о влиянии модификации поверхности на значения $q_{кр}$.

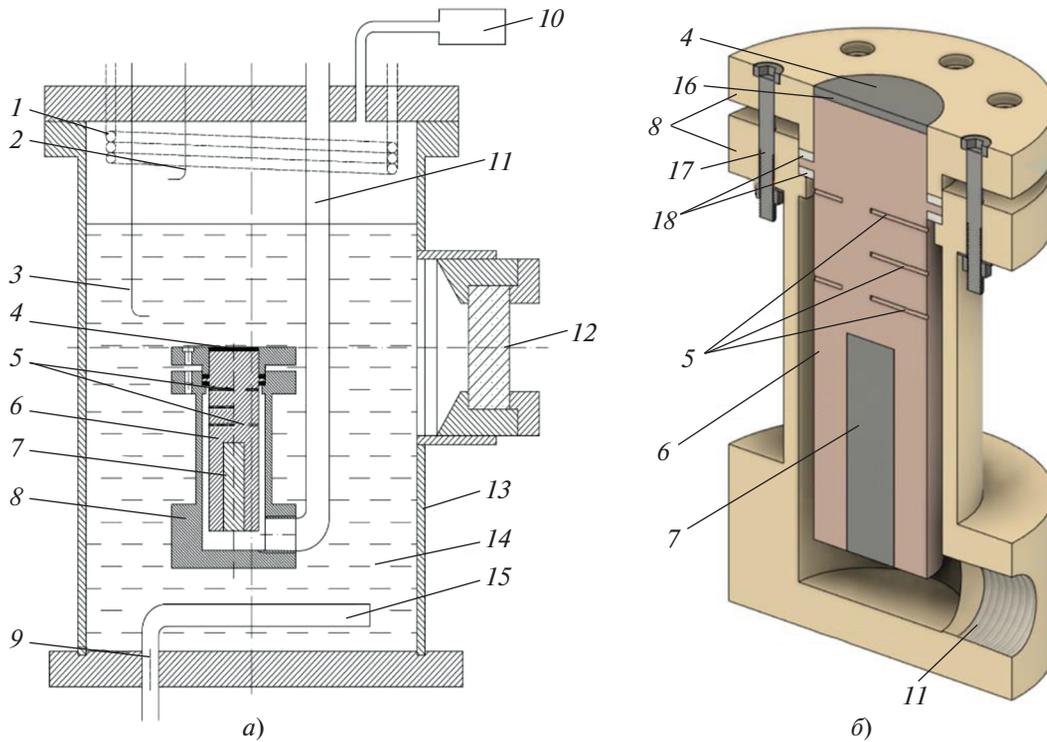


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки (а) и нагревательного блока (б).

1 – конденсатор; 2 – термопара измерения температуры пара; 3 – термопара измерения температуры жидкости; 4 – исследуемый образец; 5 – канал для термопары; 6 – нагревательный блок; 7 – патронный ТЭН; 8 – корпус нагревательного блока; 9 – канал для вывода проводов объемного нагревателя; 10 – датчик измерения давления; 11 – канал для вывода проводов патронного ТЭН и термопар; 12 – смотровое окно; 13 – корпус установки; 14 – рабочая жидкость; 15 – объемный нагреватель; 16 – термоинтерфейс; 17 – прижимной болт; 18 – уплотнительное кольцо

Сопоставление данных, представленных в табл. 1, позволяет сделать вывод, что при использовании поверхностей со вставками можно заметно увеличить $q_{кр}$ и интенсифицировать теплообмен. Выводы по исследованиям кипения Novac 7100 на структурированных поверхностях свидетельствуют о соответствии результатов для этой жидкости известным данным для воды и фреонов по влиянию структуры поверхности на интенсификацию теплообмена и значение $q_{кр}$ [4].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Корпус нагревательного блока 8 представляет собой герметичный сосуд, изготовленный из высокотемпературного прочного полимера РЕЕК (полиэфирэфиркетон), со съемным верхним фланцем, предназначенным для доступа к патронному трубчатому электронагревателю (ТЭН) 7 и смены образца. Исследуемый образец 4 помещается на поверхность нагревательного блока с помощью сплава с низкой температурой плавления

и фиксируется тремя прижимными винтами. Подобная схема обеспечивает надежный тепловой контакт исследуемого образца с нагревательным блоком. В верхней части блока имеются каналы 5 под термопары для измерения температуры медного цилиндра в точках на его оси симметрии, расположенные последовательно с интервалом 10 мм. Канал 11 для вывода кабелей термопар и патронного ТЭН присоединяется к корпусу нагревательного блока посредством конической резьбы. Регулирование мощности осуществляется с помощью трансформаторов, подключенных к патронному ТЭН и объемному нагревателю 15. Данные с термопар установки и датчика давления через аналого-цифровой преобразователь выводятся на монитор компьютера и фиксируются в файле. Для отвода тепла служит конденсатор 1, представляющий собой несколько витков медной трубки, охлаждаемой проточной водой. Через смотровое окно 12, основным элементом которого является закаленное стекло, можно наблюдать за процессом кипения. Для подсветки рабочего объема используется кабель из оптоволокна с торцевым свечением.

Таблица 2. Теплофизические свойства жидкости Novac 7100

Показатель	Давление, МПа			
	0.1	0.2	0.3	0.4
$t_n, ^\circ\text{C}$	61.0	84.04	98.84	109.6
$\rho_{ж}, \text{кг/м}^3$	1421.50	1347.61	1314.02	1289.61
$\rho_{п}, \text{кг/м}^3$	9.4	19.3	28.74	38.4
$r, \text{Дж/кг}$	112000	106244	100488	94800
$\nu \times 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	3.06	2.39	2.11	1.91
$\sigma \times 10^3, \text{Н/м}$	10.06	7.82	6.55	5.90

Примечание. t_n – температура насыщения; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ – плотность жидкости и пара; r – удельная теплота парообразования; ν – кинематический коэффициент вязкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

При погружении нагревательного блока в жидкость обеспечиваются стабилизация температуры поверхности нагревательного блока и максимальная температура окружающей среды в целях минимизации тепловых потерь. Нагревательный блок уплотняется фланцевым соединением с прокладками 18 из тефлона. Нагревательный элемент включает в себя цилиндрический медный блок диаметром 30 мм, длиной 100 мм и вспомогательный патронный нагреватель диаметром 12 мм, длиной 50 мм, плотно установленный в предназначенный для этого объем медного блока. Максимальная тепловая нагрузка составляет 400 Вт. Угловая опорная трубка наружным диаметром 10 × 1 мм присоединена одним концом к нижней части корпуса, другим концом – к верхней крышке установки. Теплопроводность корпуса нагревательного блока составляет 0.25 Вт/(м · К), канал для вывода термопар изготовлен из тонкостенной нержавеющей стали, что минимизирует оттоки тепла. Кипение происходит только на поверхности образца. Все термодары предварительно протарированы с использованием сухоблочного термостата, поддерживающего температуру с точностью 0.002°C. В качестве системы сбора данных выбрана кейтовая система LTRU-1 фирмы L-card с измерительным модулем LTR27, в качестве программного обеспечения – программа LGraph2 и программный пакет LabVIEW.

Плотность теплового потока q в экспериментах вычисляли по закону Фурье

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала блока; t – температура; $\frac{\partial t}{\partial x}$ – градиент температуры медного блока вдоль оси.

Температуру медного цилиндра измеряли термомпарами в трех точках на его оси симметрии, температуру окружающей среды при установившемся давлении – термопарой, находившейся в жидкости. Используя вычисленные значения теплового потока, определяли температуру верхней поверхности медного цилиндра t_n по формуле

$$t_n = t_t - q \left(\frac{h_o}{\lambda_o} + \frac{h_{np}}{\lambda_{np}} \right), \quad (2)$$

где t_t – температура торца медного цилиндра; h_o , h_{np} – толщина образца и слоя припоя; λ_o , λ_{np} – коэффициент теплопроводности образца и припоя.

Градиент температуры рассчитывали на основе показаний трех термопар, вставленных в медный блок до центральной оси и расположенных одна от другой на расстоянии 10 мм по вертикали. Температуру верхней поверхности нагревательного блока определяли путем интерполяции линейного распределения температуры, среднюю температуру теплоотдающей поверхности образца – по закону Фурье. Методика измерений является типовой и повсеместно используемой для подобных опытов и более подробно представлена в [12].

Тепловые режимы во время эксперимента устанавливали путем изменения напряжения на патронном ТЭН с шагом 3% и фиксации показаний термопар для каждого теплового режима. По мере приближения к переходу пузырькового кипения к пленочному шаг изменения напряжения уменьшали.

Эксперименты были проведены при кипении насыщенной диэлектрической жидкости Novac 7100 в большом объеме при давлении 0.1–0.4 МПа. Некоторые свойства Novac 7100 представлены в табл. 2.

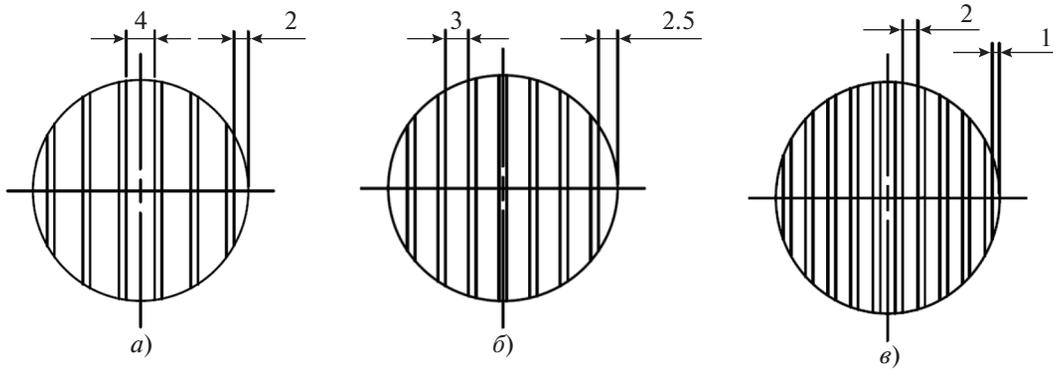


Рис. 2. Чертежи поверхности образцов № 1 (а), 2 (б), 3 (е)

В ходе экспериментов контролировали показания термопар, измерявших температуру нагревательного блока и жидкости в объеме, напряжение и силу тока патронного ТЭН при установившихся тепловых режимах, а также давление. Измерения выполняли с помощью автоматизированной системы сбора данных при стационарном режиме. Максимальный тепловой поток ограничивался кризисом кипения. Критический тепловой поток наблюдали и фиксировали по показаниям термопар внутри нагревательного блока. Неопределенность измерений температуры составила 0.5°C , неопределенность теплового потока $\pm 5\%$ в исследованных диапазонах.

В работе были использованы гладкий образец из нержавеющей стали 08X18H10T и три биметаллических медных образца с различным количеством вставок из нержавеющей стали. Отдельно было исследовано кипение на гладкой медной поверхности нагревательного блока.

На поверхности медного образца путем фрезерования выполняли прорезы размером 1×1 мм (6, 7 и 10 прорезей для каждого образца соответственно). В прорезы зачеканивали проволоку из нержавеющей стали, которую затем заплавляли с использованием установки лазерной сварки. После этого поверхность обрабатывали наждачной бумагой, после чего ее можно было считать технически гладкой. Неровность поверхности составляла: $R_a = R_c = 2.5$ мкм (здесь R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_c – средняя высота элементов профиля). В результате такой обработки на образцах была получена поверхность с границами раздела материалов, имеющих различную теплопроводность. Шаг между вставками из нержавеющей стали варьировали в диапазоне 2–4 мм. Рассчитанная капиллярная постоянная для жидкости Novex 7100 составляла 0.98–1.23 мм для давлений 0.4–0.1 МПа соответ-

ственно. Толщина образцов равнялась 2.8 мм, диаметр 3 см. Чертежи образцов представлены на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В результате экспериментов были получены кривые кипения Novex 7100 в состоянии насыщения на всех образцах при давлениях жидкости 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4 МПа. На рис. 3 приведены экспериментальная кривая кипения на поверхно-

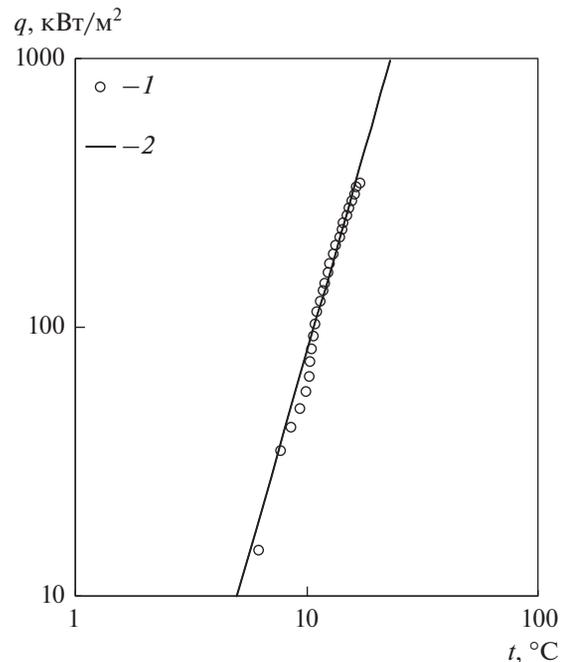


Рис. 3. Кривая кипения на гладком медном образце при давлении 0.4 МПа. 1 – медная поверхность без модификации; 2 – расчет по формуле (3)

сти медного нагревательного блока и кривая кипения Ягова:

$$q = 3.43 \times 10^{-4} \frac{\lambda^2 \Delta t_{\text{н}}^3}{\nu \sigma t_{\text{н}}} \left(1 + \sqrt{1 + 800B} + 400B\right), \quad (3)$$

где $B = \frac{r}{\sigma} \left[\frac{(\nu \rho_{\text{п}})^3}{\lambda t_{\text{н}}} \right]^{0.5}$ – безразмерный теплофизический комплекс, отражающий влияние давления на тепловой поток.

На рис. 3 видно удовлетворительное совпадение экспериментальных данных с рассчитанными по формуле (3).

На рис. 4 показана зависимость критического теплового потока от давления для образцов из нержавеющей стали и меди без модификации поверхности. Для расчета значений $q_{\text{кр}}$ использовали формулы Ягова (4) и Кутателадзе (5):

$$q_{\text{кр}} = 0.06r\rho_{\text{п}}^{0.6}\sigma^{0.4} \left[\frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\mu} \right]^{0.2}; \quad (4)$$

$$q_{\text{кр}} = 0.14r\sqrt{\rho_{\text{п}}^4 g \sigma (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}, \quad (5)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; g – ускорение свободного падения.

С увеличением давления наблюдается повышение $q_{\text{кр}}$. На рис. 4 видно, что значения $q_{\text{кр}}$, полученные при экспериментах на образце из нержавеющей стали, находятся немного выше рассчитанных значений. Это можно объяснить тем, что образцы зачищали наждачной бумагой, в результате чего поверхность имела шероховатость, что приводило к повышению $q_{\text{кр}}$.

Расхождение между экспериментальными данными и рассчитанными по формулам (4) и (5) для медного образца можно объяснить тем, что при применении этих формул не учитывается материал поверхности кипения. В литературе можно найти крайне малое число исследований, посвященных проблеме влияния материала на $q_{\text{кр}}$ [13–15]. В работе [14] авторы предложили учесть влияние теплофизических свойств поверхности с помощью показателя Λ , представляющего собой отношение коэффициента тепловой инерции материала поверхности $\varepsilon_{\text{м}}$ к коэффициенту тепловой инерции жидкости $\varepsilon_{\text{ж}}$:

$$\Lambda = \frac{\varepsilon_{\text{м}}}{\varepsilon_{\text{ж}}} = \frac{\sqrt{\rho_{\text{м}} c_{\text{рм}} \lambda_{\text{м}}}}{\sqrt{\rho_{\text{ж}} c_{\text{рж}} \lambda_{\text{ж}}}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{м}}$ – плотность материала поверхности; $c_{\text{рм}}$, $c_{\text{рж}}$ – удельная теплоемкость материала поверх-

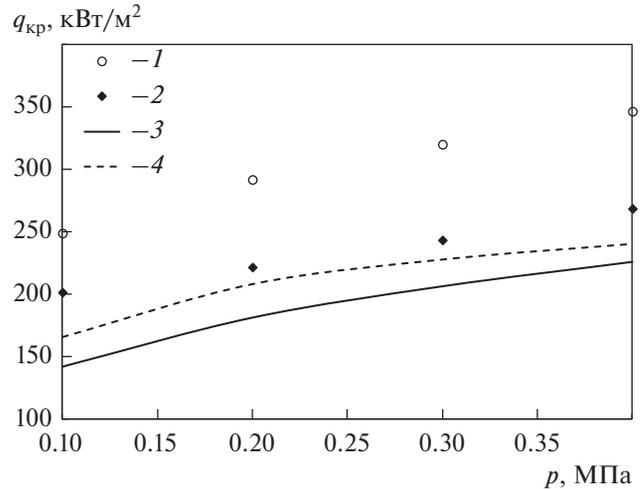


Рис. 4. Зависимость $q_{\text{кр}}$ от давления p для немодифицированных образцов. 1, 2 – медь и нержавеющая сталь; 3 – расчет по формуле (4); 4 – расчет по формуле (5)

ности и жидкости соответственно; $\lambda_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности материала поверхности и жидкости.

Расчет по формуле (6) при давлении 0.1 МПа дал следующие результаты для меди и нержавеющей стали: $\Lambda_{\text{медь}} = 10.47$, $\Lambda_{\text{нерж}} = 4.82$.

С использованием предложенной в [15] зависимости $q \propto \Lambda^{0.622}$ можно получить следующее отношение теплового потока нержавеющей стали к тепловому потоку меди: $q_{\text{нерж}}/q_{\text{медь}} = 0.62$.

На рис. 5 представлены кривые кипения на поверхности биметаллического образца № 1 и кривая кипения Ягова, рассчитанная по формуле (3). Кривые кипения заканчиваются значениями $q_{\text{кр}}$, полученными в результате осреднения нескольких экспериментальных значений. Видно, что для модифицированной поверхности наблюдается хорошее соответствие экспериментальных данных рассчитанным по формуле (3) и с ростом давления уменьшается перегрев поверхности.

В табл. 3 приведены экспериментальные значения критических тепловых потоков для биметаллических поверхностей.

Сопоставляя данные, полученные при расчете кипения на биметаллических поверхностях и в процессе экспериментов с кипением на поверхностях без модификации, можно видеть повышение значений $q_{\text{кр}}$ именно на биметаллических поверхностях, причем наибольшая интенсификация теплообмена наблюдается на образце № 3, на котором увеличение $q_{\text{кр}}$ составляет в среднем 47% по сравнению с поверхностью из нержавеющей стали. В

Таблица 3. Экспериментальные значения $q_{кр}$, кВт/м², для биметаллических и гладких поверхностей

p , МПа	Номер образца			Без модификации	
	1	2	3	медь	нержавеющая сталь
0.1	291 ± 13	289 ± 14	296 ± 15	248 ± 12	201 ± 10
0.2	310 ± 15	329 ± 16	340 ± 17	291 ± 14	221 ± 11
0.3	340 ± 17	342 ± 17	351 ± 18	333 ± 16	243 ± 12
0.4	370 ± 18	361 ± 18	378 ± 19	346 ± 17	268 ± 13

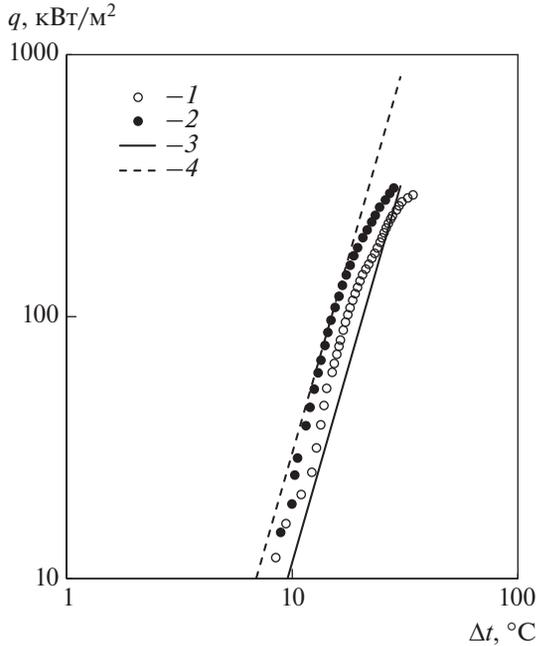


Рис. 5. Экспериментальные (1, 2) и рассчитанные по формуле (3) (3, 4) зависимости теплового потока от температуры при кипении на поверхности биметаллического образца № 1.
 p , МПа: 1, 3 – 0.1; 2, 4 – 0.2

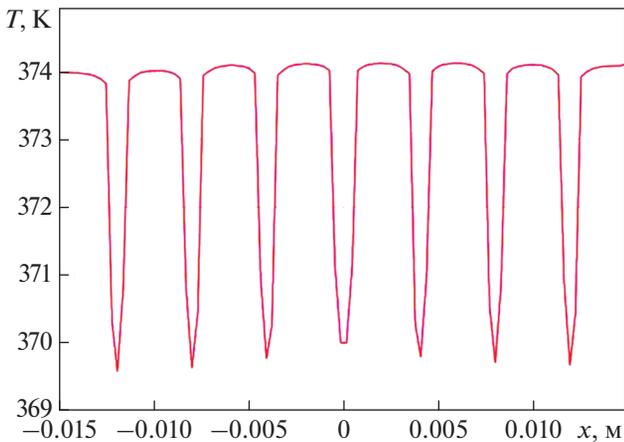


Рис. 6. Распределение температуры T вдоль теплообменной поверхности образца № 2

сравнении с медной поверхностью, максимальное увеличение составляет 19% при давлении 0.1 МПа. Во всем диапазоне давлений $q_{кр}$ увеличилось в среднем на 14%.

На образцах № 1, 2 повышение $q_{кр}$ в сравнении с медной поверхностью без модификации составляет 17% при давлении 0.1 МПа и в среднем 10% во всем диапазоне давлений. Относительно поверхности из нержавеющей стали увеличение $q_{кр}$ составило в среднем 47%.

Особенность данных, представленных в табл. 3, при разных давлениях – снижение интенсификации теплообмена с ростом давления. Так, для образца № 3 относительно поверхности из меди интенсификация уменьшается от 19 до 10% при давлениях 0.1 и 0.4 МПа соответственно. Можно предположить, что хорошие результаты для образца № 3 и снижение интенсификации теплообмена с ростом давления обусловлены тем, что шаг между вставками соответствует капиллярной постоянной. Шаг между вставками уменьшается с 4 до 2 мм для образцов № 1 и 3 соответственно, капиллярная постоянная для Noves 7100 уменьшается от 1.23 до 0.98 мм при увеличении давления от 0.1 до 0.4 МПа соответственно. Этот вывод соотносится с результатами работ [6, 8]. При проектировании теплообменных устройств с биметаллическими поверхностями данное обстоятельство необходимо учитывать при расчетах.

При сопоставлении полученных результатов по интенсификации теплообмена с результатами работ, в которых использовались другие методы модификации поверхности при кипении Noves 7100, выигрыша в увеличении $q_{кр}$ не обнаруживается. Преимуществом примененного в настоящей работе метода интенсификации является отсутствие недостатков, связанных с деградацией структуры поверхности при длительном кипении. Сопоставление с результатами, полученными с использованием воды и такого же способа модификации, свидетельствует о хорошем соответствии относительного увеличения $q_{кр}$ данным работ [7, 8].

В целях подтверждения неизотермичности поверхности теплообмена биметаллического образца было проведено качественное моделирование распределения температуры в образце № 2 в программном пакете ANSYS Fluent. Для получения температурных полей в качестве граничных условий были использованы экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока при фиксированной разности температур между жидкостью и поверхностью. Распределение температуры поверхности теплообмена вдоль диаметра, нормального к вставкам, представлено на рис. 6. Видно, что разница в температурах медной поверхности и поверхности из нержавеющей стали может составлять 4 К. Реализуется возможность кипения только на поверхности из меди, тогда как вдоль поверхности из вставок осуществляется преимущественный приток жидкости в зону испарения.

ВЫВОДЫ

1. Наибольшее влияние модифицированной поверхности на значения критического теплового потока выявлено при давлении 0.1 МПа для образца со вставками из нержавеющей стали, расположенными с наименьшим шагом. Увеличение критического теплового потока составило 19% по сравнению с немодифицированной медной поверхностью и 47% с немодифицированной нержавеющей поверхностью для биметаллических образцов.

2. Выявлено влияние шага расположения вставок и давления на относительное увеличение критического теплового потока. Моделирование распределения температуры в образцах показало достаточную неизотермичность поверхности нагрева из-за наличия вставок для регуляризации процесса кипения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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. <https://doi.org/10.1134/S0040363622050071>
2. **Дедов А.В.** Критические тепловые нагрузки при кипении в недогретом потоке // Теплоэнергетика. 2010. № 3. С. 2–8.
3. **Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А.** Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81–97. <https://doi.org/10.56304/S0040363622110078>
4. **Дедов А.В.** Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18–54. <https://doi.org/10.1134/S0040363619120014>
5. **Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н.** Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // ТВТ. 2021. № 2. С. 280–312. <https://doi.org/10.31857/S0040364421020149>
6. **Rahman M.M., Pollack J., McCarthy M.** Increasing boiling heat transfer using low conductivity materials // Sci. Rep. 2015. V. 5. No. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep13145>
7. **Experimental** investigation of pool boiling characteristics of surfactant solutions on bi-conductive surfaces / J. Yin, X. Xiao, L. Feng, Ke. Zhong, H. Ji // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 157. No. 1. P. 119914. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119914>
8. **Pool** boiling heat transfer enhancement by bi-conductive surfaces / Z. Deng, X. Liu, S. Wu, C. Zhang // Int. J. Therm. Sci. 2021. V. 167. P. 107041. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107041>
9. **Simiao F., Wei T., Fei D.** Nucleate pool boiling heat transfer enhancement in saturated Novec 7100 using titanium dioxide nanotube arrays // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2021. V. 122. P. 105166. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105166>
10. **Genesis Mlakar, Cho-Ning Huang, Chirag Kharangate.** Effects of surface modifications on pool boiling heat transfer with HFE-7100 // Int. J. Thermofluids. 2023. V. 17. No. 9. P. 100286. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100286>
11. **Effect** of copper foam thickness on pool boiling heat transfer of HFE-7100 / L.L. Manetti, A.S. Moita, R.R. de Souza, E.M. Cardoso // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 152. No. 5. P. 119547. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119547>
12. **Study** of nucleate pool boiling heat transfer enhancement on surfaces modified by beam technologies / A.V. Dedov, I.A. Khaziev, D.A. Laharev, S.D. Fedorovich // Heat Transfer Eng. 2022. No. 43. P. 598–607. <https://doi.org/10.1080/01457632.2021.1896834>
13. **К теории** кризиса пузырькового кипения в большом объеме / В.А. Григорьев, В.В. Клименко, Ю.М. Павлов, Е.В. Аметистов // Теплоэнергетика. 1978. № 2. С. 7–9.
14. **Bombardieri C., Manfletti C.** Influence of wall material on nucleate pool boiling of liquid nitrogen // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 94. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.049>
15. **Stephan K., Abdelsalam M.** Heat-transfer correlations for natural convection boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 1980. V. 23. No. 1. P. 73–87. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90140-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90140-4)

A Simple Method for Increasing the Boiling Critical Heat Flux

A. V. Dedov^a and M. D. Filippov^{a, *}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: filippovmd@mpei.ru

Abstract—The article considers a study of the possibility to increase the boiling critical heat flux q_{cr} through the use of surfaces consisting of areas with different heat conductivity. The results of experiments on studying pool boiling heat transfer for saturated dielectric fluid methoxynonafluorobutane (Novec 7100) on bimetallic surfaces are presented. The studies were carried out for bimetallic samples and also for samples made of copper and grade 08Kh18N10T stainless steel in the pressure range 0.1–0.4 MPa. A description of the experimental setup and the procedures used is given. The boiling curves for each sample in the entire presented range of fluid pressures with a step of 0.1 MPa are obtained, and the tables of critical heat-flux values are given. The effect that the liquid pressure has on the relative increase of q_{cr} for bimetallic samples is shown. The values of q_{cr} obtained on all samples are compared with one another, and the increase of q_{cr} on bimetallic surfaces by up to 20% is shown. The previously performed studies are briefly reviewed, and the experimental data obtained by other researchers on boiling heat transfer on surfaces with modulated heat conductivity and for boiling of Novec 7100 fluid are presented, including that on samples with a modified heat-transfer surface. The obtained results are compared with rather few data of other researchers. The temperature field in a bimetallic sample is numerically simulated, and the temperature distribution over the heat-transfer surface is presented. The growth of q_{cr} is due to nonisothermal properties of the heat-transfer surface, which causes the boiling to become regularized.

Keywords: boiling, bimetallic sample, critical heat flux, boiling curve, saturated fluid, modified heat-transfer surface, modulated heat conductivity

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
 ПИ № ФС77-79408 от 27 ноября 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
 информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Подписано к печати 10.12.2019 г.

Формат 60 × 88¹/₈

Тираж 301 экз.

Усл. печ. л. 9.53

Дата выхода в свет 28.02.2020 г.

Уч.-изд. л. 9.75

Цена свободная

Учредители: Российская академия наук,
 Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Издатель: ООО «ТЕМАТИЧЕСКАЯ РЕДАКЦИЯ»,
 125252, г. Москва, ул. Зорге, д. 19, этаж 3, помещ. VI, комн. 44

Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
 390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151