ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 10, с. 81–94

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НА СЕТЧАТЫХ ПОКРЫТИЯХ[1]

© 2025 г. Д. А. Швецов[a], *, В. И. Жуков[a, b], А. Н. Павленко[a]

[a] *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия*

[b] *Новосибирский государственный технический университет, просп. К. Маркса, д. 20, г. Новосибирск, 630073 Россия*

**e-mail: shvetsov.kh301@ya.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2025 г.
После доработки 02.06.2025 г.
Принята к публикации 04.06.2025 г.

В иммерсионных двухфазных системах охлаждения микро- и силовой электроники, где допустимая температура нагрева не должна превышать 85°C, широко используется диэлектрическая жидкость HFE-7100. Для увеличения значений коэффициента теплоотдачи (КТО) и критического теплового потока (КТП) при кипении жидкости HFE-7100 применяются сетчатые покрытия. Представлены результаты систематических опытов на однослойных и многослойных сетчатых покрытиях из нержавеющей стали при кипении жидкости HFE-7100 в горизонтальных слоях. Высота слоя жидкости изменялась в диапазоне от 1.5 до 25.0 мм при давлениях 100 и 50 кПа. В опытах использовались сетки из проволоки диаметром 100 и 220 мкм с размерами стороны ячейки в свету 230 и 401 мкм соответственно. Значения коэффициента теплоотдачи, полученные на многослойном сетчатом покрытии, выше, чем таковые на поверхности без сеток, на 35% при всех рассмотренных давлениях. При давлении насыщения 100 кПа увеличение значений критического теплового потока q_{cr} на сетчатых покрытиях составляет почти 60%, а при давлении насыщения 50 кПа – около 214% по сравнению с q_{cr} на поверхностях без сеток. Максимум значений критического теплового потока на однослойных сетчатых покрытиях смещается в сторону более тонких слоев жидкости высотой 8 мм по сравнению со значением q_{cr} на слое высотой 16 мм на гладкой поверхности.

Ключевые слова: двухфазные системы охлаждения, теплообмен, кипение, критический тепловой поток, коэффициент теплоотдачи, тонкий слой жидкости, жидкость HFE-7100, сетчатые покрытия

DOI: 10.56304/S0040363625600417

Кипение – это наиболее эффективный способ отвода тепла от теплоотдающей поверхности. Задача увеличения коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока при кипении жидкостей является в настоящее время чрезвычайно важной, что связано с возрастающими требованиями к условиям охлаждения и устойчивого безопасного термостатирования элементов микросиловой и в некоторых случаях силовой электроники при допустимой температуре их нагрева примерно 85°C.

Диэлектрическая жидкость HFE-7100 (далее HFE-7100) температурой насыщения 61°C при атмосферном давлении – весьма распространенный теплоноситель, она применяется в иммерсионных двухфазных системах охлаждения. Теплообмен при кипении HFE-7100 в большом объеме хорошо изучен в широком диапазоне давлений [1–4]. При модификации поверхности нагрева с помощью различных покрытий существенно увеличиваются значения КТО и КТП при кипении HFE-7100 [5–11]. В работе [12] показано, что применение поверхностей теплообмена, состоящих из участков с различной теплопроводностью, способствует регуляризации процесса кипения HFE-7100, при этом КТП увеличивается на 20%.

При использовании горизонтальных слоев жидкости повышается КТП, сокращается расход теплоносителя и уменьшаются массогабаритные характеристики теплообменного оборудования. Краткий обзор исследований влияния высоты слоя жидкости на теплообмен при кипении и испарении приведен в работе [13]. Влияние капиллярно-пористых покрытий на интенсификацию

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00245).

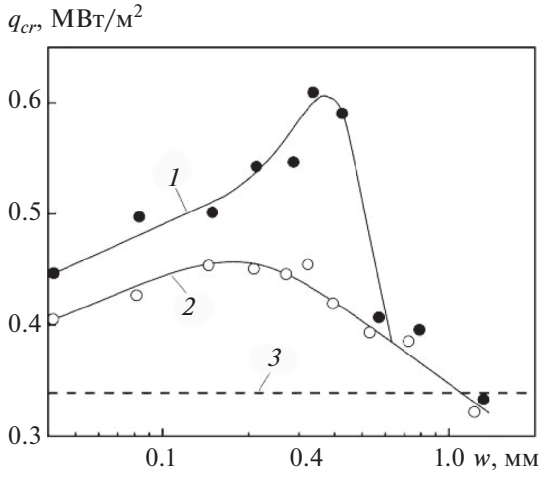


Рис. 1. Зависимость критического теплового потока q_{cr} от размера стороны ячейки в свету w при кипении ацетона при атмосферном давлении в большом объеме (*1*), слое высотой 3 мм (*2*), большом объеме на гладкой поверхности (*3*) [17]

теплообмена при кипении HFE-7100 в тонких слоях изучено в предыдущих работах авторов [14, 15].

Модификация поверхности нагрева с помощью сетчатых покрытий обладает, по сравнению с другими методами, рядом таких преимуществ, как доступность сеток, большой выбор их размеров и материалов, серийность производства. Сетки можно наносить как на малые, так и на протяженные поверхности нагрева. Обзор исследований по теплообмену при кипении на сетчатых покрытиях представлен в [16].

В работе [17] экспериментально исследовали теплообмен и КТП при испарении и кипении жидкости (воды) в тонком слое на различных капиллярно-пористых покрытиях, прижатых к поверхности нагрева. В опытах были использованы структуры, выполненные из металлических сеток саржевого плетения, перфорированных экранов и медного войлока (всего 35 типов структур). Эксперименты показали, что, меняя оптимальные капиллярные структуры в тонких слоях жидкости, можно отводить тепловые потоки при значениях КТП, превышающих таковые при кипении жидкости в большом объеме на поверхности без покрытия. Установлено, что на покрытии из нержавеющей стали наиболее высокие КТП достигались на сетке с размерами ячеек 0.36 × 0.41 мм. В работе [17] приведена экспериментальная зависимость влияния зазора между сеткой и поверхностью нагрева на КТП, из которой следует, что наличие даже небольшого зазора, соизмеримого с диаметром проволоки сетки, приводит к заметному уменьшению КТП. Стоит отметить, что при снижении давления влияние зазора на КТП становится менее значительным.

В работе [18] рассмотрено влияние высоты слоя на КТП при давлении насыщения 100 кПа для воды и ацетона. Значение капиллярной постоянной для ацетона составляет 1.6 мм, для воды – 2.5 мм. Получено, что на поверхности без сеток максимум экспериментальной зависимости КТП от высоты слоя жидкости находится в диапазоне двух-трех капиллярных постоянных (3–5 мм) для обеих жидкостей. На рис. 1 показана зависимость КТП от размера стороны ячеек при кипении ацетона в большом объеме и в тонком слое высотой 3 мм на однослойных сетчатых покрытиях. На этом рисунке видно, что с увеличением размера стороны ячейки от 0.04 до 0.40 мм значения КТП возрастают, но в дальнейшем снижаются. Увеличение количества прижатых один к другому слоев сеток для всех исследованных покрытий приводит к уменьшению КТП. Причина этого заключается в том, что паровые пузыри в процессе роста в пористой структуре при определенной ее толщине сливаются один с другим внутри нее и удерживаются там капиллярными силами [18].

В зарубежных литературных источниках, посвященных исследованиям кипения на сетчатых покрытиях, используется параметр mesh – количество отверстий на линейный дюйм (25.4 мм). Для сеток с квадратными ячейками mesh рассчитывается следующим образом:

$$\text{mesh} = \frac{25.4}{d + w}, \qquad (1)$$

где d – диаметр проволоки, мм.

Например, для mesh 10 параметры сетки составляют: $d = 640$ мкм, $w = 1910$ мкм, для mesh 50 – $d = 160$ мкм, $w = 356$ мкм. Так как параметр mesh показывает только количество отверстий в сетке по формуле (1), то при одних и тех же значениях данного параметра сетки, используемые разными авторами, могут иметь различные значения d и w. Далее, если это специально не оговаривается, применяются также значения mesh для обозначения размеров сеток.

Авторы работы [19] исследовали теплообмен при кипении воды в широком диапазоне изменения высоты слоя жидкости (от 2 до 60 мм) с использованием одного слоя сетки из нержавеющей стали. В работе [19] рассмотрены сетки mesh 16 ($d = 300$ мкм, $w = 1287.5$ мкм), mesh 24 ($d = 550$ мкм, $w = 508.3$ мкм) и mesh 50 ($d = 170$ мкм, $w = 338.0$ мкм). Наиболее высокие значения КТО были получены при кипении в слое высотой 5 мм на сетке mesh 16. Значения КТО, полученные на этой сетке, почти в 2 раза выше, чем на поверхности без сеток.

Авторы [20] исследовали кипение метанола и HFE-7100 в большом объеме на однослойных сетчатых покрытиях из нержавеющей стали. В экспериментах с HFE-7100 использовались сетки

mesh 10 (d = 630 мкм, w = 1910 мкм), mesh 12 (d = 580 мкм, w = 1537 мкм), mesh 16 (d = 300 мкм, w = 1288 мкм) и mesh 50 (d = 338 мкм, w = 170 мкм). Наиболее высокие значения КТО и КТП были получены на сетке mesh 10. В работе [20] на всех исследованных сетках значения КТП ниже, чем на поверхности без сеток.

В работе [21] исследовали кипение диэлектрической жидкости R141b в большом объеме на сетках из нержавеющей стали, латуни, меди и алюминия. Диаметр проволоки варьировался от 0.1 до 1.0 мм, размер стороны ячейки – от 0.1 до 2.5 мм с изменением всех параметров сетки (включая методы укладки слоев сеток). Авторы работы [21] предложили аналитическую зависимость для расчета КТП и установили следующее:

начало кипения на сетчатых покрытиях происходит при меньших значениях температурного напора по сравнению с кипением на гладкой поверхности;

значения КТО существенно возрастают, особенно при низких тепловых потоках (более чем в 2 раза), в большинстве рассмотренных конфигураций сеток значения КТО превышают значения, полученные на поверхности без сеток, примерно на 40%;

наибольшая интенсификация теплообмена при кипении наблюдается на низкотеплопроводных сетчатых покрытиях из нержавеющей стали;

упорядоченное (ориентированное) расположение сеток одна над другой для многослойных сетчатых покрытий более эффективно, чем случайное;

наиболее значительный результат получен на сеточном покрытии, состоящем из трех слоев крупной сетки (d = 0.40 мм, w = 2.12 мм), наложенных поверх одного слоя более мелкой сетки (d = 0.23 мм, w = 1.45 мм).

В работе [22] рассмотрен теплообмен при кипении воды в большом объеме на 1-, 4- и 8-слойных сетчатых покрытиях размерами mesh 50, mesh 80 и mesh 145 при давлениях 20, 30, 50 и 100 кПа. Наиболее высокие значения КТО и КТП при всех давлениях получены на 8-слойной сетке mesh 145. При этой конфигурации сеточного покрытия наблюдалась 10-кратная интенсификация теплообмена при давлении 100 кПа и 22-кратная при давлении 50 кПа по сравнению с интенсификацией на поверхности без сеток.

Высокие значения КТО [261 кВт/(м^2 · K)] и КТП (2719 кВт/м^2) получены в работе [23] при использовании градиентных многослойных сетчатых покрытий из меди. Эксперименты проводились в большом объеме воды при атмосферном давлении. Многослойное сетчатое покрытие структурой типа “дымоход” (chimney) состояло из мелких ячеек в нижней части и крупных в верхней. В нижней части покрытия использовалась сетка mesh 300 (d = 40 мкм, w = 84.7 мкм), в верхней – mesh 100 (d = 50 мкм, w = 254 мкм). При такой структуре повышается возможность роста пузырей и значительно облегчаются прохождение их через покрытия и отрыв от него за счет резкого расширения размеров ячеек (в 3 раза), увеличиваются значения КТО и КТП.

Режимы испарения в стекающих пленках на различных модифицированных поверхностях, в том числе с сетчатыми покрытиями, рассмотрены в [24]. В работе [25] изучен теплообмен при кипении в стекающих пленках смеси хладагентов R114/R21 на микроструктурированной поверхности и прижатой к ней сетке из нержавеющей стали. В [25] наиболее значительная интенсификация теплообмена была получена на сетке mesh 80 (d = 100 мкм, w = 220 мкм).

Способ крепления сетчатых покрытий к поверхности нагрева и метод изготовления этих покрытий существенно влияют на значения КТО и КТП. Можно выделить несколько методов крепления сеток между собой и с подложкой: прижатие [17–19, 21], спекание [26–28], диффузионная сварка [22, 23]. На прижатых сетках значение КТП для воды достигает примерно 1.5 МВт/м^2, на приваренных сетках – 2.7 МВт/м^2. На сетчатых покрытиях, изготовленных методами спекания и диффузионной сварки, можно получить более высокие значения КТО и КТП при увеличении числа слоев сеток. При креплении сеток методом прижатия при числе их слоев семь-восемь может происходить как рост, так и снижение значений КТО и КТП.

Таким образом, на основе анализа приведенных ранее литературных данных можно сформулировать следующие выводы:

для органических жидкостей (ацетон, смесь фреонов R114 и R21, этиловый спирт) при атмосферном давлении оптимальный размер стороны ячеек, при котором обеспечиваются высокие значения КТО и КТП, составляет 0.2–0.4 мм;

в тонких слоях жидкостей высотой две-три капиллярные постоянные (3–5 мм) при давлениях ниже атмосферного на сетчатых покрытиях могут достигаться более высокие значения КТО и КТП по сравнению с таковыми при кипении в большом объеме за счет увеличения вклада испарительной составляющей теплообмена;

при наличии зазора между сетчатым покрытием и подложкой снижается КТП, при уменьшении давления влияние зазора на значение КТП становится менее существенным.

При кипении воды в большом объеме на градиентных сетчатых покрытиях [23] значения КТО [261 кВт/(м^2 · K)] и КТП (2719 кВт/м^2) сравнимы с таковыми при кипении на наиболее эффектив-

ных модифицированных поверхностях, например с осажденными электрохимическим способом пористыми покрытиями [29] [125 кВт/(м^2 · K) и 3976 кВт/м^2 соответственно], микроструктурированными методом деформирующего резания поверхностями [30] [224 кВт/(м^2 · K) и 1857 кВт/м^2 соответственно], на медных поверхностях с микроканавками, полностью заполненными эпоксидной смолой [31] [210 кВт/(м^2 · K) и 2295 кВт/м^2 соответственно]. При кипении HFE-7100 в большом объеме на поверхностях с сетчатыми покрытиями [20] наиболее высокие значения КТО [19.6 кВт/(м^2 · K) и КТП (190 кВт/м^2)] сравнимы, например, с полученными при кипении на шероховатых поверхностях с искусственными центрами парообразования [9] [16 кВт/(м^2 · K) и 290 кВт/м^2 соответственно]. В работе [15] при кипении HFE-7100 в тонких слоях на капиллярно-пористых покрытиях значения КТО и КТП достигали 37.5 кВт/(м^2 · K) и 310 кВт/м^2 соответственно.

В настоящей работе представлены результаты систематических опытов на двух однослойных сетчатых покрытиях (mesh 80 и mesh 40) и двух многослойных сетчатых покрытиях со случайным и ориентированным расположением сеток одна над другой при кипении HFE-7100 в горизонтальных слоях при различных давлениях. Диапазон изменения геометрических параметров сеток выбирали, ориентируясь на максимум значений КТП, полученный в работе [17] при кипении ацетона в слое высотой 3 мм (см. рис. 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

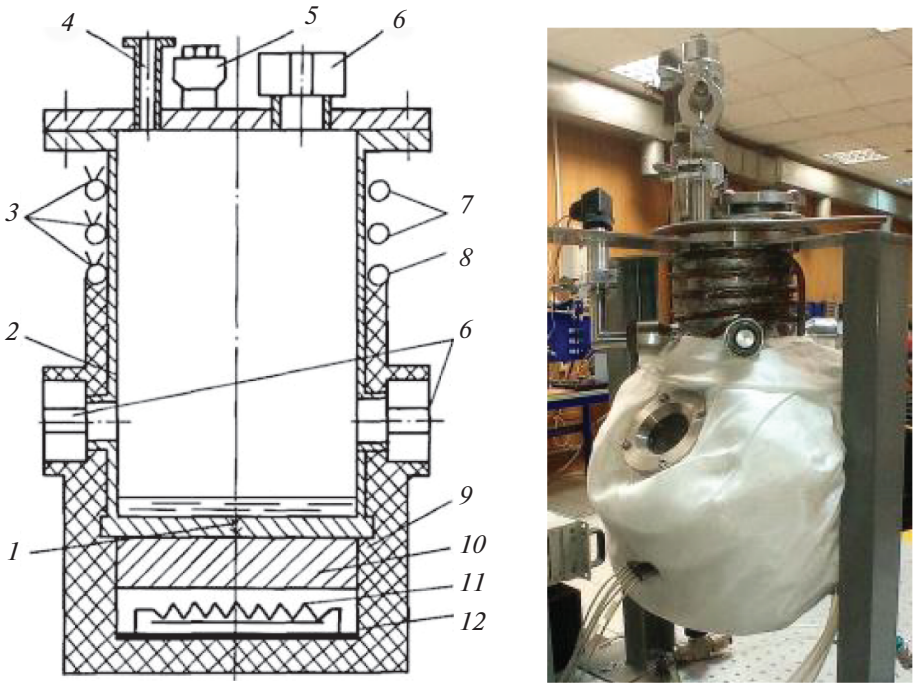
Исследования процессов кипения HFE-7100 выполняли на экспериментальной установке, состоявшей из рабочей камеры, а также систем охлаждения, измерения давления и температуры, сбора и обработки данных испытаний, управления мощностью и питанием нагревателя. Рабочая камера была выполнена в виде термосифона (рис. 2). Она представляла собой цилиндрический сосуд внутренним диаметром 120 мм, высотой 300 мм и толщиной вертикальной цилиндрической стенки 1 мм, изготовленный из стали 12Х18Н10Т. Между дном и нагревателем мощностью 3 кВт помещалась высокотеплопроводная медная пластина толщиной 30 мм для выравнивания температуры нижнего торца поверхности нагрева. Зазор между дном камеры и пластиной заполнялся специальной пастой для уменьшения контактного термического сопротивления. По бокам и сверху рабочая камера была оборудована окнами из кварцевого стекла для визуальных наблюдений.

Температуру насыщения T_s рассчитывали по давлению пара в рабочей камере, которое поддерживалось постоянным. Для измерения давления использовался вакуумметр Edwards ASG, который состоит из деформационного датчика и контроллера, объединенных в один компактный прибор. Вакуумметр ASG-2000 (использовался в данной работе) имеет диапазон измерений 0.2 МПа–0.1 кПа с неопределенностью измерений давления ±0.2% всей шкалы, т.е. при полной шкале 0.2 МПа точность измерения давления равна ±400 Па. При T_s = 314 K для HFE-7100 это составляет неопределенность измерения температуры насыщения ±0.43°C. Показания давления вакуумметра Edwards ASG сравнивали с показаниями более точного деформационно-ионизационного вакуумметра Setra-730 (диапазон рабочих давлений от 0.033 до 1.2 кПа) в области перекрытия их диапазонов измерения.

Для измерения тепловых потоков в днище рабочей камеры толщиной 12 мм сбоку на различной высоте было просверлено пять отверстий диаметром 1.5 мм с расстоянием 2.0 мм одно от другого. В эти отверстия были вставлены медь-константановые термопары в нержавеющих капиллярах диаметром 1.5 мм. Расстояние от оси отверстия под верхнюю термопару до теплоотдающей поверхности составляло 2.0 мм. Теплопроводность днища, в котором измерялся градиент температур, была меньше теплопроводности кабельной термопары. Такое сочетание теплопроводностей было выбрано с целью уменьшить искажения поля температур. Спай кабельных термопар располагался по центру канала, в котором находилась термопара, поэтому неопределенность, вызываемая эксцентриситетом термопары в канале, была практически равна нулю. Кроме того, отверстия для термопар в днище были просверлены по радиусам со смещением. Глубина погружения термопар внутрь была достаточной для того, чтобы не учитывать перетечки по длине термопары.

Градиент температуры в днище определяли по показаниям пяти термопар, установленных на различной высоте по толщине днища. Значения температуры с соответствующими координатами интерполировали прямой линией методом наименьших квадратов с использованием модели линейной регрессии. Температуру поверхности нагрева T_w также определяли по линейной экстраполяции профиля температур в днище методом наименьших квадратов. Температурный напор рассчитывали как разность между температурой поверхности нагрева T_w и температурой насыщенных паров T_s, тепловой поток – по уравнению Фурье. Более подробно методика измерения температуры и оценки неопределенности измерений представлена в работе [32].

Неопределенность измерения теплового потока q составляет около ±16% при $q = 10^3$ Вт/м^2, око-



а) *б*)

Рис. 2. Схема (*а*) и общий вид (*б*) рабочей камеры.
1 – термопары для измерения температуры дна камеры; *2* – корпус; *3* – термопары для измерения температуры охлаждающей воды; *4* – патрубок для крепления систем откачки и измерения давления; *5* – вакуумный ввод; *6* – смотровое окно; *7* – змеевик охлаждения; *8* – змеевик нагрева; *9* – слой теплоизоляции; *10* – медная пластина; *11* – электронагреватель; *12* – кожух электронагревателя

ло ±10% при $q = 10^4$ Вт/м^2 и ±4% при $q = 10^5$ Вт/м^2. Расчетная относительная неопределенность измерения значений КТО при тепловых потоках больше 100 кВт/м^2 не превышала 15%.

В качестве рабочей жидкости использовали метоксинонафторбутан $C_4F_9OCH_3$ (HFE-7100) молярной массой 250 г/моль. Свойства HFE-7100 при давлениях 100 и 50 кПа приведены в таблице.

Теплофизические свойства жидкости HFE-7100 [33–35]

Показатель	Рабочее давление, кПа	
	100	50
Температура насыщения паров T_s, K	334	323
Плотность, кг/м^3:		
жидкости ρ_l	1419	1474
пара ρ_v	9.006	4.789
Скрытая теплота парообразования h_{lg}, Дж/кг	1.117×10^5	1.145×10^5
Кинематический коэффициент вязкости ν, м^2/с	3.011×10^{-7}	3.751×10^{-7}
Коэффициент поверхностного натяжения σ, Н/м	9.945×10^{-3}	0.012
Теплопроводность λ, Вт/(м · K)	0.062	0.066
Удельная теплоемкость c_p, Дж/(кг · K)	1255	1215
Приведенное давление p_s/p_{cr}	4.5×10^{-2}	2.2×10^{-2}
Капиллярная постоянная l_σ, м	0.8×10^{-3}	0.9×10^{-3}

Примечание. p_s и p_{cr} – давление насыщения и критическое давление, соответственно.

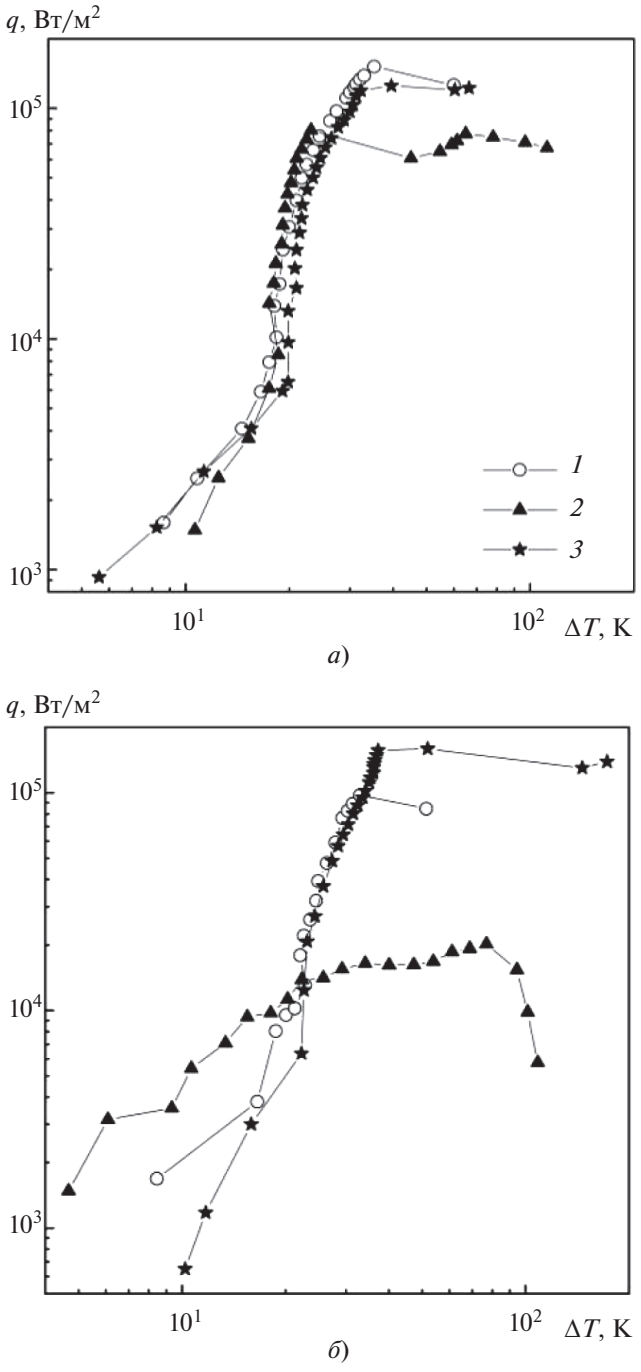


Рис. 3. Кривые кипения HFE-7100 в слое высотой 10 мм при $p_s = 100$ кПа (*а*) и $p_s = 50$ кПа (*б*) на поверхности без сетки (*1*) и с сеткой mesh 80, прикрепленной к поверхности нагрева с помощью эпоксидного клея (*2*) и клея ВС-10Т (*3*)

Перед началом экспериментов на дно рабочей камеры заливали рабочую жидкость для создания слоя нужной высоты. Жидкость тщательно дегазировалась путем кипячения при пониженном давлении в течение нескольких часов. В ходе экспериментов в стационарных режимах теплообмена регистрировались температуры по толщине обогреваемой стенки и давление над слоем жидкости в рабочей камере, а также выполнялась видеосъемка процесса высокоскоростной видеокамерой. Эксперименты проводили при давлениях 100 и 50 кПа и высоте слоя жидкости в диапазоне 1.5–25.0 мм. Результаты исследований сравнивали с данными [14], полученными при кипении на поверхности без сеток.

В настоящей работе использовали сетки из нержавеющей стали mesh 80 ($d = 100$ мкм, $w = 220$ мкм) и mesh 40 ($d = 230$ мкм, $w = 401$ мкм), которые крепили к поверхности нагрева с помощью эпоксидного клея и термостойкого клея ВС-10Т.

Эпоксидный клей (торговое название “холодная сварка”) – смесь эпоксидных и аминовых смол с добавлением минеральных наполнителей, наносили на заранее обезжиренную сетку каплями размером 1.5–2.0 мм по углам квадратов (стенки размером 25 × 25 мм). Затем сетку прижимали к поверхности нагрева пластиной из органического стекла, диаметр которой равнялся диаметру поверхности нагрева, в течение суток. Рассматривались способы нанесения эпоксидного клея как под сеткой, так и над ней. В первом случае сетка крепко держалась на поверхности нагрева, но зазор около 100 мкм между сеткой и поверхностью нагрева, создаваемый эпоксидным клеем, приводил к уменьшению КТП. Во втором случае зазор практически устранялся, но при нагреве сетка могла частично отделяться от поверхности нагрева, что также вызывало резкое снижение КТП. По этой причине был рассмотрен также вариант крепления сетки с помощью жидкого клея.

Клей ВС-10Т представляет собой смесь растворов поливинилформальэтилалевой смолы и фенолоформальдегидной смолы новолачного типа в органических растворителях (спирт этиловый и этилацетат) с добавкой тетраэтоксилана, уротропина и хинолина. Клей ВС-10Т аналогичным образом наносили на заранее обезжиренную сетку, которую для плотного крепления прижимали к поверхности нагрева кольцом из фторопласта. После прижатия сетки осуществлялся ее нагрев при температуре 180–200°C в течение 2 ч для полимеризации клея.

На рис. 3 показаны зависимости теплового потока q от температурного напора $\Delta T = T_w - T_s$ (здесь и далее – кривые кипения), полученные при кипении HFE-7100. На рисунке видно, что на сетке, прикрепленной к поверхности нагрева с помощью термостойкого клея ВС-10Т, кризис кипения происходит при более высоких тепловых потоках, чем на сетке, присоединенной с помощью эпоксидного клея, вследствие отсутствия зазора между сеткой и поверхностью нагрева. Кро-

ме того, сетка, прикрепленная с помощью клея ВС-10Т, была более устойчива к частичному отделению от поверхности нагрева при тепловых потоках более 100 кВт/м^2. Поэтому в дальнейших экспериментах применяли крепление сетки с помощью клея ВС-10Т.

Многослойное сетчатое покрытие состоит из трех сеток mesh 80 и трех сеток mesh 40. Более крупная сетка (mesh 40) находится сверху, а мелкая (mesh 80) – снизу, из-за чего образуется структура "дымохода" (chimney), способствующая эффективному образованию пузырьков [23]. В работе рассмотрены случайное и ориентированное расположения слоев сеток один над другим. При ориентированном расположении сетки устанавливались соосно отверстиями (ячейками) одна к другой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены кривые кипения HFE-7100 в горизонтальных слоях на однослойном сетчатом покрытии mesh 80. На рисунке видно, что изменение высоты слоя жидкости слабо влияет на теплоотдачу при кипении при $q <$ < 80 кВт/м^2. При $q > 80$ кВт/м^2 наклоны кривых, полученных для слоев жидкости разной высоты, различаются. В слоях жидкости высотой 1.5 и 2.5 мм вследствие возникновения сухих участков на поверхности нагрева значения КТП почти на порядок меньше, чем в более толстых слоях. Тем не менее, при интенсивном испарении в зоне сухих пятен наблюдается интенсификация теплообмена по сравнению с испарением в более толстых слоях жидкости, что хорошо видно по кривой кипения в слое жидкости высотой 2.5 мм (см. рис. 4, *а*). В слоях жидкости высотой более 4.0 мм значения КТП становятся соизмеримыми с КТП, полученными при кипении большого объема жидкости (слой высотой 25.0 мм). В слое жидкости высотой 8.0 мм значения КТП на 200–240% выше, чем в слое жидкости высотой 25.0 мм, при $p_s = 100$ и 50 кПа.

При кипении на однослойном сетчатом покрытии mesh 40 в слоях жидкости высотой 1.5 и 2.5 мм уже при тепловом потоке около 2 кВт/м^2 по центру поверхности нагрева возникало сухое пятно. При давлении 50 кПа в слое жидкости высотой 2.5 мм значение КТП было соизмеримо с таковым для сетки mesh 80 (примерно 20 кВт/м^2). В слоях жидкости высотой более 8.0 мм на сетке mesh 40 при $p_s = 100$ и 50 кПа с увеличением высоты слоя значения температурного напора уменьшались (рис. 5).

На рис. 6 представлены кривые кипения HFE-7100 в слоях на двух многослойных сетчатых

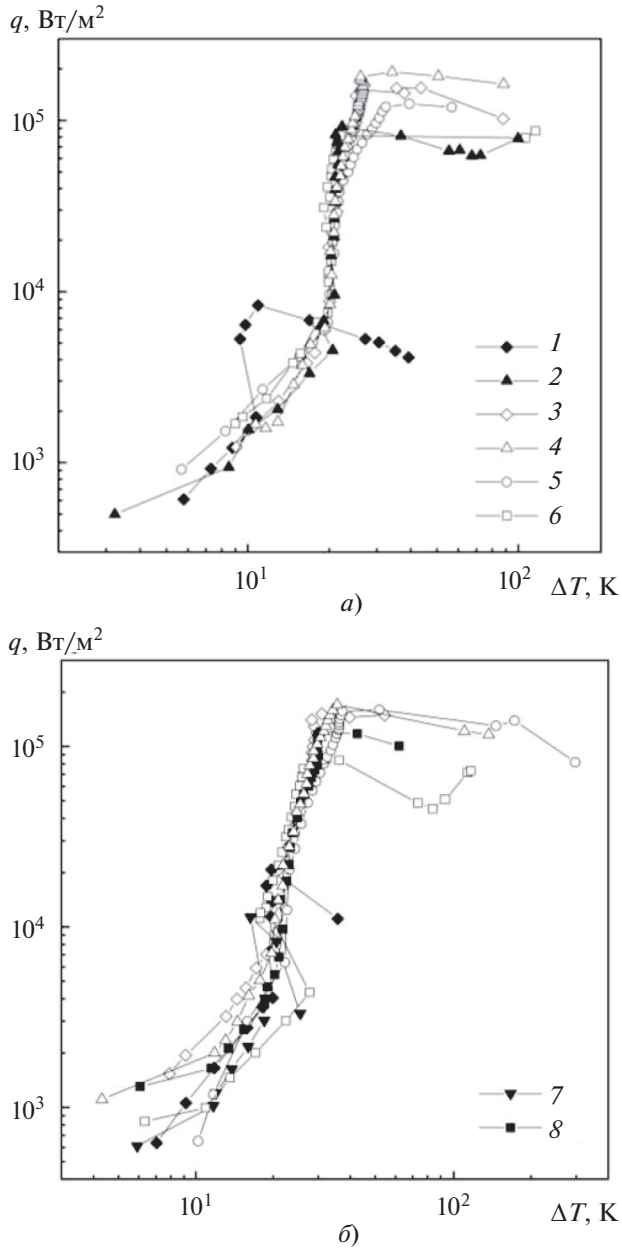


Рис. 4. Кривые кипения HFE-7100 в слоях различной высоты h на сетчатом покрытии mesh 80 при $p_s =$ $= 100$ кПа (*а*) и $p_s = 50$ кПа (*б*).
h, мм: *1* – 2.5; *2*, *8* – 4.0; *3* – 6.0; *4* – 8.0; *5* – 10.0; *6* – 25.0; *7* – 1.5

покрытиях при $p_s = 100$ и 50 кПа. В ходе экспериментов было установлено, что на многослойном сетчатом покрытии со случайным расположением сеток значения температурного напора начала кипения более низкие. Значение КТП на этом покрытии меньше, чем на покрытии с ориентированным расположением сеток. При $q \approx 20$ кВт/м^2 внутри сетчатого покрытия со случайным расположением сеток формируется паровая прослой-

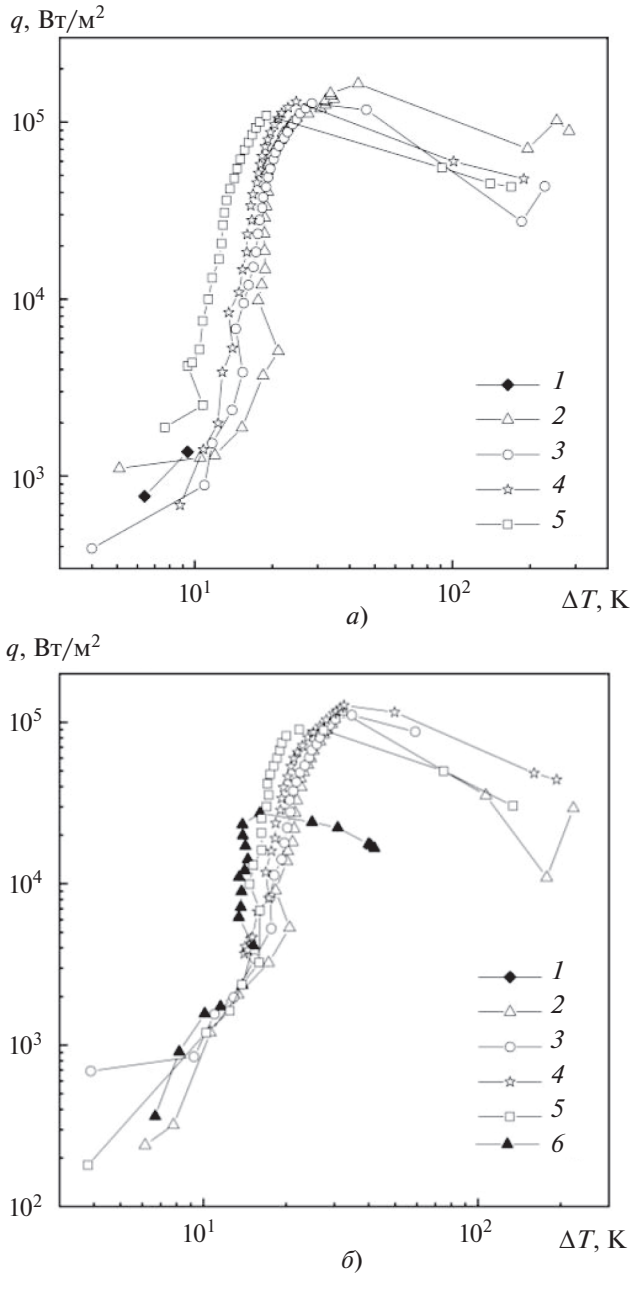


Рис. 5. Кривые кипения HFE-7100 в слоях различной высоты h на сетчатом покрытии mesh 40 при p_s = = 100 кПа (*а*) и p_s = 50 кПа (*б*).
h, мм: *1* – 1.5; *2* – 8.0; *3* – 10.0; *4* – 16.0; *5* – 25.0; *6* – 2.5

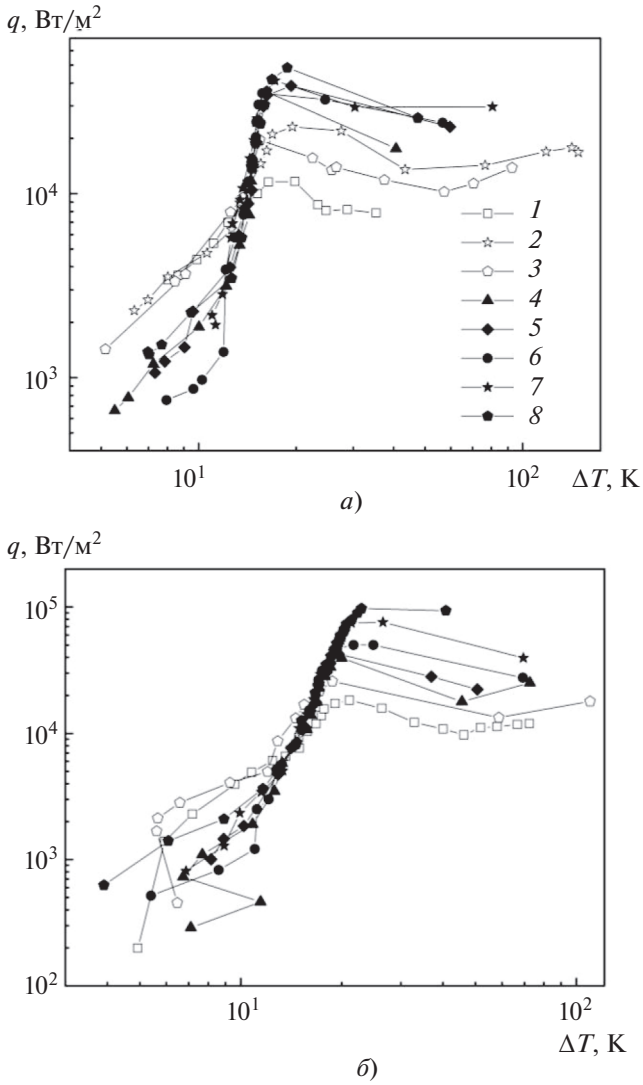


Рис. 6. Кривые кипения HFE-7100 в слоях различной высоты h на многослойных сетчатых покрытиях при p_s = 100 кПа (*а*) и p_s = 50 кПа (*б*).
h, мм: *1* – 1.5; *2*, *7* – 8.0; *3*, *8* – 25.0; *4* – 2.5; *5* – 4.0; *6* – 6.0.
Расположение ячеек: *1–3* – случайное; *4–8* – ориентированное

ка, блокирующая подпитку жидкостью, и возникает неконтролируемый рост температуры, приводящий к кризису кипения. На многослойном сетчатом покрытии с ориентированным расположением сеток были получены значения КТП в 2–4 раза более высокие по сравнению с таковыми при случайном расположением сеток. Этот результат согласуется с выводами, приведенными в [21].

На рис. 7 представлена зависимость значений КТО α при q = 35 кВт/м^2 от высоты слоя жидкости h. Данные, полученные с применением однослойных сетчатых покрытий и многослойного сетчатого покрытия с ориентированным расположением ячеек, сравниваются с результатами [14], полученными на поверхности нагрева без сеток. Установлено, что высота слоя жидкости слабо влияет на значения КТО на поверхности без сеток, на однослойном сетчатом покрытии mesh 80 и многослойном сетчатом покрытии. На однослойном сетчатом покрытии mesh 40 с увеличением высоты слоя жидкости от 6 до 25 мм значе-

ние КТО увеличивается примерно на 36%. В слоях жидкости высотой менее 25 мм наиболее высокие значения КТО получены на многослойном сетчатом покрытии. По сравнению с однослойными сетчатыми покрытиями и поверхностью без сеток на многослойном сетчатом покрытии наблюдается высокая плотность центров парообразования, которая приводит к увеличению значений КТО примерно на 35% при всех рассмотренных давлениях. В слое жидкости высотой 25 мм при давлении 100 кПа наиболее высокие значения КТО получены на однослойном сетчатом покрытии mesh 40. Значения КТО на сетке mesh 40 выше примерно на 44%, чем на поверхности без сеток. При давлении 50 кПа значения КТО, полученные на сетке mesh 40 и многослойном сетчатом покрытии, примерно равны и выше на 45%, чем на поверхности без сеток.

При визуальных наблюдениях установлено, что в слое высотой 25 мм по мере роста плотности теплового потока значительно увеличивается в размерах паровая прослойка между сетчатым покрытием и верхней границей слоя жидкости. На рис. 8, *а* видно, что при предкризисном тепловом потоке $q \approx 82$ кВт/м^2 пузыри распределены, в целом, равномерно по высоте в слое жидкости, так как на всей поверхности нагрева обеспечиваются отвод пара и подпитка жидкостью. При дальнейшем увеличении теплового потока пар внутри сетки блокирует поступление подпитывающей жидкости и температура поверхности резко возрастает. В центре поверхности нагрева возникает двухфазная структура из поднимающихся вверх перемешанных струй жидкости и пара с выраженной вершиной по центру (см. рис. 8, *б*). Данная структура наблюдается на всем протяжении стадии развития кризиса кипения вплоть до отключения нагревателя и охлаждения поверхности нагрева. При кипении на сетке mesh 40 в предкризисных режимах, так же как и на сетке mesh 80, возникает двухфазная структура с выраженной вершиной по центру, но при этом достигаются более высокие значения КТП (примерно на 34%). По-видимому, из-за большего размера ячеек на сетке mesh 40 обеспечивается лучшее разделение потоков жидкость – пар. На многослойных сетчатых покрытиях при возникновении кризиса кипения образуются зоны с невысокой плотностью пузырей, вызванные появлением паровых прослоек внутри структуры покрытия. Эти паровые прослойки блокируют подпитку жидкостью и препятствуют организованному отводу пара на многослойных сетчатых покрытиях.

Экспериментальные значения КТП сравнивались с расчетными значениями по следующим

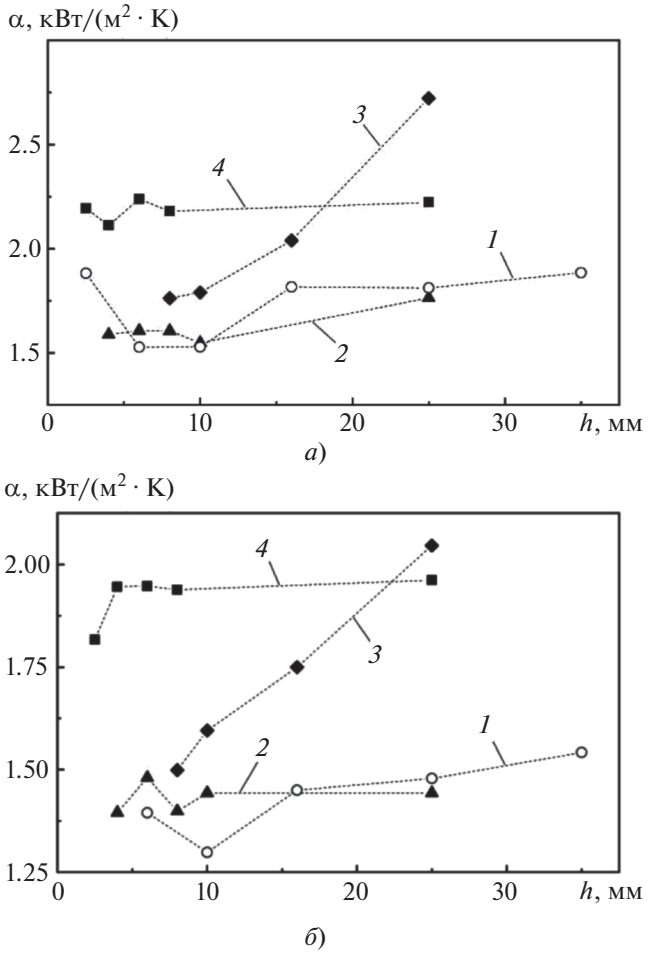


Рис. 7. Зависимость КТО α от высоты слоя HFE-7100 h при кипении при $q = 35$ кВт/м^2, $p_s = 100$ кПа (*а*) и $p_s = 50$ кПа (*б*) на поверхностях без сеток (*1*), однослойных сетчатых покрытиях mesh 80 (*2*) и mesh 40 (*3*) и многослойном сетчатом покрытии с ориентированным расположением ячеек (*4*)

известным моделям кризиса кипения в большом объеме жидкости:

модель гидродинамического кризиса Кутателадзе [36]

$$q_{cr} = 0.16 h_{lg} \sqrt{\rho_v} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}, \qquad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2;

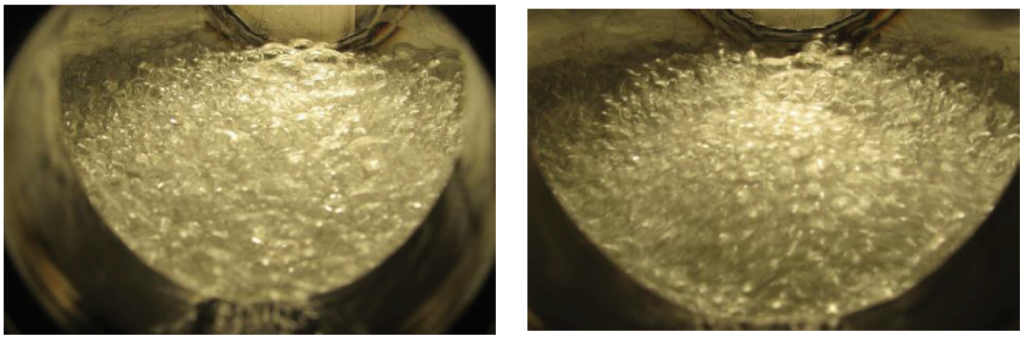
модель гидродинамического кризиса Зубера [37]

$$q_{cr} = 0.131 h_{lg} \sqrt{\rho_v} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}; \qquad (3)$$

модель кризиса для сетчатых покрытий [21]

$$q_{cr} = 0.33 h_{lg} \rho_v^{3/4} \left(\sigma g \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l} \right)^{1/4} \left(1 + \frac{w}{d} \right)^{1/4}. \qquad (4)$$

При увеличении размера ячейки от mesh 80 ($d_1 = 100$ мкм, $w_1 = 220$ мкм) до mesh 40 ($d_2 = 230$ мкм,



а) *б*)

Рис. 8. Фотоснимки процессов кипения HFE-7100 в слое высотой 25 мм при p_s = 100 кПа на однослойном сетчатом покрытии mesh 80.
а – развитое кипение при q = 81.6 кВт/м^2, ΔT = 21.4 K; *б* – кризис кипения при q = 86.8 кВт/м^2, ΔT = 115.6 K

w_2 = 401 мкм) отношения w_1/d_1 = 2.2 и w_2/d_2 = = 1.743 различаются на 26%, но расчетное значение КТП по формуле (4) изменяется всего на 2.5%, поэтому для сравнения выбрано только отношение w_1/d_1.

На однослойных сетчатых покрытиях значения КТП в диапазоне высот слоя жидкости от 4 до 8 мм выше, чем на поверхности без сеток (рис. 9). Так, при p_s = 100 кПа рост значений КТП в слое высотой 6 мм на сетчатых покрытиях составляет примерно 60%, а при p_s = 50 кПа – около 214% по сравнению с КТП на поверхности без сеток. При увеличении высоты слоя жидкости от 1.5 до 8.0 мм значения КТП возрастают почти на порядок, причем в слое жидкости высотой 8.0 мм достигается максимум значений КТП. В слоях жидкости высотой более 10.0 мм значения КТП на сетке mesh 40 больше, чем на сетке mesh 80. Однако в слоях жидкости высотой более 10.0 мм значения КТП, полученные на однослойных сетчатых покрытиях, меньше, чем на поверхности без сеток, при всех давлениях.

На многослойном сетчатом покрытии с ориентированным расположением ячеек значения КТП выше в 2–4 раза, чем на покрытии со случайным расположением (см. рис. 9). При p_s = 100 кПа изменение высоты слоя жидкости слабо влияет на значение КТП на всех многослойных сетчатых покрытиях. При p_s = 50 кПа с увеличением высоты слоя от 2.5 до 25.0 мм значения КТП для ориентированного многослойного сетчатого покрытия повышаются почти в 2 раза, достигая значений КТП таких же, как на поверхности без сеток.

Максимум КТП, полученный на сетке mesh 80, выше значений, рассчитанных по формуле (2) (см. рис. 9). В слоях жидкости высотой более 8 мм значения КТП при p_s = 100 кПа ниже, чем по формуле (4), на всех сетчатых покрытиях. При p_s = 50 кПа значения, определенные по формуле (4), близки к экспериментальным значениям, полученным на сетке mesh 40. Прослеживается закономерность, прогнозируемая формулой (4): при кипении в большом объеме жидкости с увеличением размера ячейки сетки повышается значение КТП. На многослойном сетчатом покрытии с ориентированным расположением ячеек результаты, полученные в слое жидкости высотой 25 мм при p_s = 50 кПа, также совпадают с вычисленными по формуле (4) (см. рис. 9, *б*).

При кипении на однослойных сетчатых покрытиях максимум КТП смещается в сторону более тонких слоев жидкости по сравнению с КТП на поверхности без сеток (см. рис. 9). На поверхности без сеток максимум КТП наблюдается в слое высотой 16 мм, на сетчатых покрытиях – в слое высотой 8 мм. Наиболее высокие значения КТП в слоях жидкости высотой от 4 до 8 мм были получены на сетке mesh 80.

Далее приведен расчет изменения давления в слое жидкости на сетке mesh 80 при одном и том же значении p_s.

Капиллярное давление Δp_c, возникающее внутри сетки mesh 80, составляет $\Delta p_c = 2\sigma/r_{eff}$ = 124.3 Па, где $r_{eff} = (d + w)/2$ – эффективный радиус пор, м.

Гидростатическое давление в слое жидкости высотой h = 8 мм равно $p = \rho gh$ = 111.3 Па.

Изменение давления в слое жидкости на сетке составляет 111.3 – 124.3 = –13 Па. Таким образом, при снижении высоты слоя приток жидкости ко всем зонам кипения (к зонам мениска в окрестности растущих паровых пузырей) на теплоотдающей поверхности сохраняется за счет отрицательного капиллярного давления на сетке. Гидростатическое давление уменьшается, но

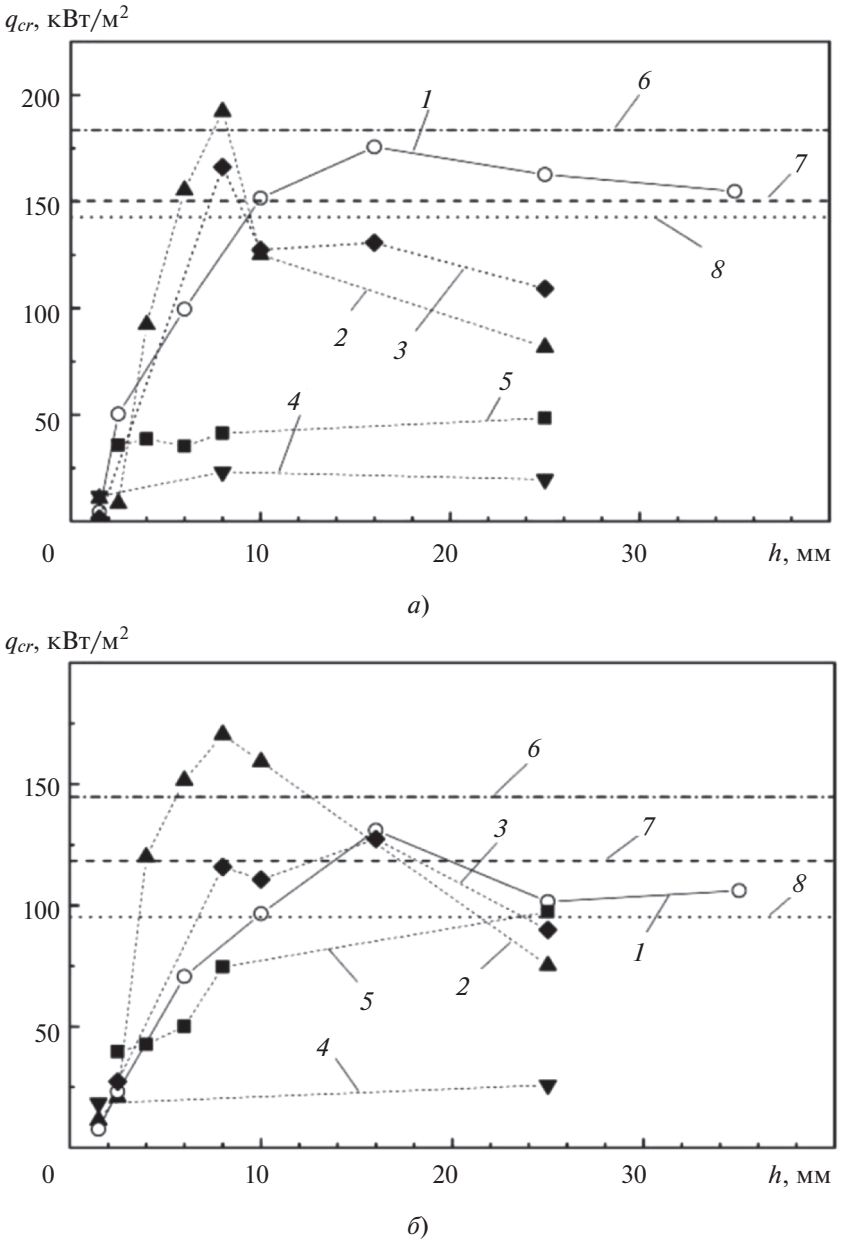


Рис. 9. Зависимость критического теплового потока q_{cr} от высоты слоя HFE-7100 h при кипении на сетчатых покрытиях и гладкой поверхности при p_s = = 100 кПа (*а*) и p_s = 50 кПа (*б*).
1 – поверхность без сеток; *2* – mesh 80; *3* – mesh 40; *4*, *5* – сетчатое покрытие со случайным и ориентированным расположением ячеек; *6* – [36]; *7* – [37]; *8* – [21]

приток не изменяется, поскольку капиллярные силы способствуют притоку жидкости (как насос/фитиль). В результате кризис осушения поверхности, покрытой сеткой, фиксируется при высоте слоя жидкости менее 2.5 мм, тогда как на поверхности без сеток кризис осушения наблюдался в слоях жидкости высотой до 6 мм. Это приводит к более высоким значениям КТП (примерно до 50%) в слоях жидкости высотой от 2.5 до 8.0 мм на сетке mesh 80 по сравнению с поверхностью без сеток. При p_s = 50 кПа капиллярное давление Δp_c увеличивается на 19% вследствие роста поверхностного натяжения, что приводит к еще более высоким значениям КТП (примерно до 100%) в слоях жидкости высотой менее 8 мм по сравнению с поверхностью без сеток (см. рис. 9, *б*).

Анализ процесса кипения на многослойных сетчатых покрытиях осложнен образованием паровых прослоек внутри сетчатой структуры. При

этом следует отметить, что с увеличением высоты слоя жидкости на таком покрытии значения КТП при p_s = 100 кПа практически не изменяются, а при p_s = 50 кПа увеличиваются.

ВЫВОДЫ

1. В слоях жидкости HFE-7100 высотой менее 25 мм при кипении значения КТО на многослойном сетчатом покрытии выше, чем на поверхности без сеток, примерно на 35% при всех рассмотренных давлениях. В слое жидкости высотой 25 мм при давлении 100 кПа на сетке mesh 40 значения КТО выше на 44%, чем на поверхности без сеток. При давлении 50 кПа значения КТО, полученные на сетке mesh 40 и многослойном сетчатом покрытии, примерно равны и выше на 45%, чем на поверхности без сеток.

2. При давлении 100 кПа увеличение значений КТП в слое жидкости HFE-7100 высотой 6 мм при кипении на сетчатых покрытиях составляет до 60%, а при давлении 50 кПа – до 214% по сравнению с поверхностью без сеток. Максимум значения КТП, полученный на сетке mesh 80 в слое жидкости высотой 8 мм, выше значений, рассчитанных по формуле Кутателадзе. Значения КТП, полученные в слое жидкости высотой 25 мм, близки к КТП, прогнозируемым по модели кризиса для сетчатых покрытий.

3. При кипении на однослойных сетках максимум значений КТП смещается в сторону более тонких слоев жидкости (6–8 мм) по сравнению с гладкой поверхностью (16 мм). На многослойных сетчатых покрытиях при давлении 100 кПа высота слоя жидкости практически не влияет на значение КТП, а при давлении 50 кПа значение КТП повышается с увеличением высоты слоя жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Experimental** investigation of the CHF of HFE-7100 under pool boiling conditions on differently roughened surfaces / P.F. Alvariño, M.L.S. Simón, M. dos Santos Guzella, J.M.A. Paz, J.M.S. Jabardo L.C. Gómez // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. l. P. 139. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.142
2. **Experimental** and analytical study on the influence of saturation pressure and surface roughness on pool boiling CHF of HFE-7100 / X. Fan, S. Gu, J. Lei, G. Luo, F. Meng, L. Wu, S. Gu // Int. J. Chem. Eng. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/4875208
3. **Pressure** effect on pool boiling heat transfer characteristics of high-volatile liquids with structured surface / I.A. Khaziev, M.D. Filippov, A.V. Tupotilova, Yu.V. Lyulin, A.V. Dedov // Interfacial Phenom. Heat Transfer. 2024. V. 12. Is. 2. https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2024051781
4. **Yu J., Chen Z., Utaka Y.** Critical heat flux characteristics in pool boiling at low pressure for dielectric fluid Novec 7100 // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. V. 232. P. 125959. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125959
5. **Bubble** dynamics and nucleate pool boiling heat transfer on microporous copper surfaces / S.J. Thiagarajan, R. Yang, C. King, S. Narumanchi // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 89. P. 1297–1315. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.013
6. **Effect** of copper foam thickness on pool boiling heat transfer of HFE-7100 / L.L. Manetti, A.S.O.H. Moita, R.R. de Souza, E.M. Cardoso // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 152. P. 119547. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119547
7. **Effect** of microfin surfaces on boiling heat transfer using HFE-7100 as working fluid / I.S. Kiyomura, J.M. Nunes, R.R. de Souza, S.S. Gajghate, S. Bhaumik, E.M. Cardoso // J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng. 2020. V. 42. P. 1–13. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02439-7
8. **Pool** boiling performance of HFE-7100 on hierarchically structured surfaces / E. dos Santos Filho, I.S. Kiyomura, B.A. de Andrade, E.M. Cardoso // Case Stud. Therm. Eng. 2021. V. 28. P. 101536. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101536
9. **Mlakar G., Huang C.N., Kharangate C.** Effects of surface modifications on pool boiling heat transfer with HFE-7100 // Int. J. Thermofluids. 2023. V. 17. P. 100286. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100286
10. **Saturated** pool boiling heat transfer of HFE-7100 on sintered copper powder and wire mesh microporous surfaces: A comparison study / Y. Jiang, G. Zhou, J. Zhou, F. Zhou, X. Huai // Appl. Therm. Eng. 2022. V. 216. P. 119067. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119067
11. **Lum L.Y.X., Leong K.C., Ho J.Y.** Optimizing additively manufactured macro-fin structure designs for enhanced pool boiling of dielectric fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. V. 219. P. 124883. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124883
12. **Дедов А.В., Филиппов М.Д.** Простой способ увеличения критического теплового потока при кипении // Теплоэнергетика. 2024. № 1. С. 99–108. https://doi.org/10.56304/S0040363624010028
13. **Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А.** Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81–97. https://doi.org/10.56304/S0040363622110078
14. **Shvetsov D.A., Pavlenko A.N., Zhukov V.I.** Heat transfer during boiling in horizontal layers of HFE-7100 on smooth and modified surfaces // J. Eng. Thermophys. 2024. V. 33. Is. 2. P. 250–268. https://doi.org/10.1134/S1810232824020024

15. **Shvetsov D.A., Zhukov V.I., Pavlenko A.N.** Heat transfer enhancement during boiling in horizontal layers of HFE-7100 on 2D modulated capillary-porous coatings // Appl. Therm. Eng. 2025. V. 263. P. 125344. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125344

16. **Volodin O.A., Pavlenko A.N., Pecherkin N.I.** Heat transfer enhancement on multilayer wire mesh coatings and wire mesh coatings combined with other surface modifications – A review // J. Eng. Thermophys. 2021. V. 30. Is. 4. P. 563–596. https://doi.org/10.1134/S1810232821040020

17. **Предельные** плотности теплового потока при испарении жидкости в капиллярах фитилей низкотемпературных тепловых труб / В.И. Толубинский, В.А. Антоненко, Ю.Н. Островский, Е.Н. Шевчук // ТВТ. 1980. Т. 18. № 2. С. 367–373.

18. **Толубинский В.И., Антоненко В.А., Иваненко Г.В.** Влияние толщины слоя жидкости на критические тепловые нагрузки при кипении // Промышленная теплотехника. 1988. Т. 10. № 2. С. 3–6.

19. **Tsay J.Y., Yan Y.Y., Lin T.F.** Enhancement of pool boiling heat transfer in a horizontal water layer through surface roughness and screen coverage // Heat Mass Transfer. 1996. V. 32. P. 17–26. https://doi.org/10.1007/s002310050086

20. **Liu J.W., Lee D.J., Su A.** Boiling of methanol and HFE-7100 on heated surface covered with a layer of mesh // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. V. 44. Is. 1. P. 241–246. https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00078-8

21. **Franco A., Latrofa E.M., Yagov V.V.** Heat transfer enhancement in pool boiling of a refrigerant fluid with wire nets structures // Exp. Therm. Fluid Sci. 2006. V. 30. Is. 3. P. 263–275. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.07.002

22. **Sloan A., Penley S., Wirtz R. A.** Sub-atmospheric pressure pool boiling of water on a screen-laminate enhanced surface // Proc. of the 25th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose, California, USA, 15–19 March 2009. P. 246–253. https://doi.org/10.1109/STHERM.2009.4810771

23. **Extraordinary** boiling enhancement through microchimney effects in gradient porous micromeshes for high-power applications / S. Zhang, X. Jiang, Y. Li, G. Chen, Y. Sun, Y. Tang, C. Pan // Energy Convers. Manage. 2020. V. 209. P. 112665. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112665

24. **Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Володин О.А.** Теплообмен и кризисные явления в стекающих пленках жидкости при испарении и кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.

25. **Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A.** Combining microstructured surface and mesh covering for heat transfer enhancement in falling films of refrigerant mixture // Energies. 2023. V. 16. Is. 2. P. 782. https://doi.org/10.3390/en16020782

26. **Li C., Peterson G.P., Wang Y.** Evaporation/boiling in thin capillary wicks (I) – wick thickness effects // ASME J. Heat Transfer. 2006. V. 128. Is. 12. P. 1312–1319. https://doi.org/10.1115/1.2349507

27. **Li C., Peterson G.P., Wang Y.** Evaporation/boiling in thin capillary wicks (II) – effects of volumetric porosity and mesh size // ASME J. Heat Transfer. 2006. V. 128. Is. 12. P. 1320–1328. https://doi.org/10.1115/1.2349508

28. **Pool** boiling performance of multilayer micromeshes for commercial high-power cooling / K. Tang, J. Bai, S. Chen, S. Zhang, J. Li, Y. Sun, G. Chen // Micromachines. 2021. V. 12. Is. 8. P. 980. https://doi.org/10.3390/mi12080980

29. **Ultrascalable** three-tier hierarchical nanoengineered surfaces for optimized boiling / J. Li, W. Fu, B. Zhang, G. Zhu, N. Miljkovic // ACS Nano. 2019. V. 13. Is. 12. P. 14080–14093. https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06501

30. **Shchelchkov A.V., Popov I.A., Zubkov N.N.** Boiling of a liquid on microstructured surfaces under free-convection conditions // J. Eng. Phys. Thermophys. 2016. V. 89. Is. 5. P. 1152. https://doi.org/10.1007/s10891-016-1478-5

31. **Rahman M.M., Pollack J., McCarthy M.** Increasing boiling heat transfer using low conductivity materials // Sci. Rep. 2015. V. 5. P. 13145. https://doi.org/10.1038/srep13145

32. **Теплообмен** при кипении в тонком слое диэлектрической жидкости HFE-7100 на капиллярно-пористых покрытиях / Д.А. Швецов, А.Н. Павленко, А.Д. Назаров, В.И. Жуков // ТВТ. 2024. Т. 62. № 7. С. 865–876. https://doi.org/10.31857/S0040364424060088

33. **3M™ Novec™** engineered fluid HFE-7100 physical properties. 2002.

34. **Density**, surface tension, and kinematic viscosity of hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500 / M.H. Rausch, L. Kretschmer, S. Will, A. Leipertz, A.P. Fröba // J. Chem. Eng. Data. 2015. V. 60. Is. 12. P. 3759–3765. https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691

35. **Lee J., Mudawar I.** Fluid flow and heat transfer characteristics of low temperature two-phase micro-channel heat sinks – Part 1: Experimental methods and flow visualization results // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. Is. 17–18. P. 4315–4326. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.02.012

36. **Кутателадзе С.С.** Гидромеханическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // ЖТФ. 1950. Т. 20. № 11. С. 1389–1392.

37. **Zuber N.** On the stability of boiling heat transfer // Trans. ASME. 1958. V. 80. P. 711–720.

Influence of Layer Height on Heat Transfer during Boiling of Dielectric Liquid on Mesh Coatings

D. A. Shvetsov[a, *], B. I. Zhukov[a, b], and A. N. Pavlenko[a]

[a] *Kutateladze Institute of Thermal Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

[b] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073 Russia*

**e-mail: shvetsov.kh301@ya.ru*

Abstract—In immersion, two-phase cooling systems for micro- and power electronics, where the permissible heating temperature should not exceed 85°C, dielectric liquid HFE-7100 is widely used. To increase the heat-transfer coefficient (HTC) and critical heat flux (CHF) values during boiling of HFE-7100 liquid, mesh coatings are used. The results of systematic experiments on single-layer and multilayer mesh coatings made of stainless steel with boiling liquid HFE-7100 in horizontal layers are presented. The liquid layer height varied in the range from 1.5 to 25.0 mm at pressures of 100 and 50 kPa. The experiments were performed using wire meshes with a diameter of 100 and 220 μm with clear cell side dimensions of 230 and 401 μm, respectively. The heat-transfer coefficient values obtained on the multilayer mesh coating are higher than those on the surface without meshes by 35% at all pressures considered. At a saturation pressure of 100 kPa, the increase in the critical heat flux values q_{cr} on mesh coatings is almost 60%, while that at a saturation pressure of 50 kPa is approximately 214% compared to q_{cr} on surfaces without grids. The maximum values of the critical heat flux on single-layer mesh coatings shifts towards thinner liquid layers of 8 mm in height compared to the value q_{cr} on a 16-mm-high layer on a smooth surface.

Keywords: two-phase cooling systems, heat exchange, boiling, critical heat flux, heat-transfer coefficient, thin liquid layer, HFE-7100 liquid, mesh coverings