

УДК 536.248

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ И ИСПАРЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

© 2021 г. О. А. Володин¹ *, Н. И. Печеркин¹, А. Н. Павленко¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, г. Новосибирск, Россия

*E-mail: volodin_o@mail.ru

Поступил в редакцию 25.06.2020 г.

После доработки 01.10.2020 г.

Принят к публикации 14.10.2020 г.

Представлен обзор современных исследований по интенсификации теплообмена (включая подробное рассмотрение российских исследований, зачастую не представленных в зарубежных обзорных работах) с использованием передовых пассивных и полупассивных методов интенсификации. Дано краткое историческое вступление. Рассматриваются исследования по интенсификации кипения и испарения с использованием коммерческих поверхностей, а также перспективных разработок, полученных различными способами модификации: как механическими (деформирующее резание, применение сеточных покрытий и т.д.), так и более ресурсоемкими современными методами и их комбинациями, применяемыми при создании мультимасштабных, бифильных и прочих микро- и наноструктурированных поверхностей и покрытий. Показано, что известные механические способы обработки и новейшие методы структурирования поверхностей позволяют достигать значительных результатов по интенсификации теплообмена. В первую очередь уделяется внимание исследованиям с применением относительно простых и доступных в реализации методов модификации поверхностей, обладающих потенциалом для применения в современном теплообменном оборудовании уже сегодня.

DOI: 10.31857/S0040364421020149

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Механические методы обработки для создания интенсифицирующих поверхностей кипения и испарения

1.1. Применение коммерческих интенсифицирующих поверхностей

1.2. Авторские поверхности, полученные механической обработкой

1.3. Интенсификация кипения и испарения с помощью проволочных/сеточных покрытий

1.4. Применение различных видов оребрения, изменение шероховатости поверхности, влияние материала

1.5. Моделирование кипения и испарения на модифицированных поверхностях

2. Теплообмен на модифицированных поверхностях, полученных комбинированными методами обработки

2.1. Комбинированные методы макро/мезо/микро- и наномодификации поверхности

2.2. Пористые покрытия, микродуговое оксидирование и лазерное спекание

2.3. Влияние смачиваемости поверхности на теплоотдачу

Заключение

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время передовой тенденцией развития исследований теплообмена при кипении и испарении является изучение интенсификации теплообмена с использованием структурирования теплоотдающей поверхности на различных масштабах (макро/микро/нано), включая комбинированные методы модификации и применение поверхностей с контрастной смачиваемостью. Анализ тематики докладов на профильных международных конференциях (например, 16-й Международной конференции по теплообмену в Пекине “ИТС-16”, 2018 г.) показывает, что значительная часть представленных на них работ посвящена исследованиям интенсификации теплообмена с использованием модифицированных поверхностей. Повышенный интерес к изучению способов интенсификации теплообмена (в первую очередь в режиме кипения) связан с возрастающими требованиями по отводу тепла в современных вычислительных модулях, потребностями силовой электроники, задачами атомной энергетики и т.д. Характерные тепловые

потоки, которые требуется отводить в указанных случаях, имеют величину порядка 100–1000 Вт/см².

Несмотря на то что основная часть методов интенсификации заложена в двадцатом веке, развитие технологий обработки поверхностей и методов измерения характеристик нестационарных процессов, а также возможностей моделирования позволяет проводить современные исследования на принципиально новом уровне, давая, к примеру, возможность детально проследить динамику развития отдельно взятых пузырей при различных физических условиях [1]. Усовершенствованные методы механической обработки поверхности позволяют достигать поразительных значений плотности микроштырьков (до 400 шт. на мм²) [2]. Современные методы плазменного и ионного напылений, химические технологии обработки, а также различные методики создания наноразмерных покрытий и их комбинирование с микротекстурами позволяют создавать принципиально новые типы мультимасштабных структурированных поверхностей, получать недоступные ранее “рекордные” результаты по интенсификации [3].

Поскольку основные методы интенсификации теплообмена известны примерно с середины прошлого века, имеет смысл кратко остановиться на истории развития исследований. Первые эксперименты по интенсификации процесса пузырькового кипения воды в условиях большого объема проведены Якобом и Фрицем в 1931 году¹, и уже тогда использование микроструктурированной медной поверхности с квадратными фрезерованными пазами 0.016 × 0.016 мм с шагом 0.48 мм, а также шероховатой медной поверхности (полученной обработкой пескоструйным аппаратом) позволило добиться приблизительно трехкратного возрастания коэффициента теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью [4]. Однако выяснилось, что из-за старения текстуры эффект интенсификации начинал снижаться уже через часы и пропадал спустя несколько дней, в результате методика была признана бесперспективной с точки зрения практического применения [5]. Интерес к исследованиям интенсификации кипения с использованием модифицированных поверхностей вернулся в 1950-х годах и был связан с развитием технологий, в частности появлением станков с числовым программным управлением (ЧПУ), что давало возможность автоматизировать процесс и повысить точность обработки материалов, получая поверхности со сложной геометрией. Примерно в это же время начались

активные исследования с применением в теплообменных аппаратах различных хладонов.

Исследования теплообмена при кипении различных жидкостей (в том числе с использованием хладонов) в условиях большого объема на гладких поверхностях также были начаты в 1950-х. Можно упомянуть пионерские отечественные работы Толубинского [6], Лабунцова [7], Даниловой [8], Даниловой и Куприяновой [9, 10], Поволоцкой [11], Куприяновой [12], Гогонина [13], Ягова и Лабунцова [14], а также работы Зубера [15], Янга [16], Бергlsa и Розенау [17], обеспечившие получение большого массива опытных данных по теплоотдаче и способствовавшие развитию приближенной теории теплообмена при пузырьковом кипении и разработке теплообменников погружного типа. В качестве итога названных выше отечественных исследований можно назвать выход в 1973 г. в печати первого издания книги Даниловой и др. “Теплообменные аппараты холодильных установок” [18], в которой была собрана максимально полная информация по теории теплообмена, конструкциям и методикам расчета теплообменных аппаратов, применяемых в холодильной технике.

Уже в первых работах, посвященных исследованию теплообмена при кипении жидкостей на шероховатых, оребренных и пористых поверхностях (Якоб и др. [4, 19], Уэстуотер [20], Кларк и др. [21], Курихара, Майерс [22], Антуфьев, Гусев [23], Дюндин [24], Данилова, Бельский [25], Николаев, Токалов [26], Кузма-Кичта и др. [27] и т.д.), было показано, что интенсификация теплообмена при кипении связана с появлением дополнительных центров парообразования, и установлено, что увеличение количества центров приводит к снижению температурного напора закипания. Применение хладонов в качестве рабочей жидкости позволило уменьшить остроту проблемы, связанной со снижением эффективности микроструктурированных поверхностей при их длительном использовании.

Оглядываясь на исследования, проведенные в период 1950-х–2000-х гг., с точки зрения разработки практических приложений (в первую очередь совершенствования конструкций теплообменников), можно проследить переход от изучения кипения в “большом объеме” к более прикладным исследованиям кипения на гладкотрубном пучке и далее к исследованиям по интенсификации кипения за счет применения различных покрытий (металлизация, очехление, оребрение и т.д.). В качестве очередной вехи в отечественных исследованиях можно указать появление монографии Гоголина и др. [28] “Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин”, в которой были собраны пионерские на момент публикации решения в области интенсификации.

¹ Строго говоря, первой работой по интенсификации теплообмена, по-видимому, можно считать классическую работу Джоуля 1861 г. по конденсации пара на наружной стенке трубы, обмотанной по спирали проволокой.

фикации теплообмена при кипении. Результаты проведенных за указанный период исследований по интенсификации теплообмена, связанных с различными практическими приложениями: от разработки компактных теплообменников до охлаждения электронных устройств, — представлены также в известных работах и монографиях Антуфьева, Гусева, [23]; Вилемаса, Воронина, Дзюбенко, Дрейцера [29]; Калинина, Дрейцера, Коппа, Мякочина [30], а также Тоума [31], Уэбба [32], Берглса [33] и др. Согласно статистике, приведенной Берглсом и соавторами в [34], к концу минувшего века число ежегодных публикаций по интенсификации теплообмена составляло около 350 в год.

В совокупности упомянутые исследования заложили прочные основы для дальнейшего изучения методов интенсификации теплоотдачи и повышения критического теплового потока, а полученные в них результаты остаются актуальными по сей день.

С 2000 года и по настоящее время по теме интенсификации опубликованы десятки новых обзорно-аналитических статей и монографий: Бэдждана, Крауса [35]; Тоума [36]; Уэбба [37]; Рибатски, Якоби [38]; Дзюбенко, Кузма-Кичты, Леонтьева, Федика, Холпанова [39]; Попова, Махянова, Гуреева [40]; Овсянника [41]; Аттингера и др. [42]; Бхавнани и др. [43]; Маккарти и др. [44]; Кима и др. [45]; Шоджайна, Кошара [46]; Павленко и др. [47]; Суртаева и др. [48]; Гогонина [49]; Лиэн, Мудавара [50] и т.д.

В монографии Бэдждана и Крауса [35] кратко описаны принципы интенсификации теплообмена, рассмотрены методы интенсификации, используемые при различных условиях теплообмена (однофазные потоки, кипение, конденсация), показаны примеры структурированных поверхностей кипения, полученных с помощью разных методик обработки (механической обработки, формовки, осаждения частиц и т.д.). Приведено сравнение кривых кипения и коэффициентов теплоотдачи, полученных на различных модифицированных поверхностях кипения (см. главы 9, 14 Дж.Р. Тоума и Р.М. Манглика в [35]). Близким по содержанию к указанным главам [35] является работа Тоума [36].

В монографии Попова и др. [40], содержащей обширное историческое введение с большим числом технических иллюстраций, дан подробный обзор исследований по интенсификации теплообмена в условиях однофазной конвекции при кипении (в том числе на микро- и наноструктурированных поверхностях) и конденсации. Описаны физические основы интенсификации теплообмена, рассмотрены многочисленные примеры промышленного применения различных методов интенсификации. Авторами отмечается

противоречивость полученных в современных исследованиях результатов по интенсификации теплообмена. В качестве важного вывода указывается, что “при производстве в России теплотехнического оборудования редко используются другие способы интенсификации помимо развития поверхности за счет различного типа оребрения. Необходимы популяризация методов интенсификации на основе дальнейшего анализа мирового опыта, технико-экономических обоснований внедрения интенсификаторов теплообмена в существующем оборудовании и создание новых образцов оборудования с изначально заложенными в проект решениями по интенсификации теплоотдачи”.

Овсянником в монографии “Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей” [41] обобщены и систематизированы результаты экспериментальных и теоретических исследований по интенсификации теплообмена при кипении на гладких и развитых горизонтальных пучках труб, включая большой пласт работ, посвященных исследованию кипения жидкости на трубах с пористыми покрытиями (см. [27, 51–54] и др.). Приведены результаты экспериментальных исследований автора по теплообмену при кипении хладона R134a на гладких изотермических и оребренных неизолированных поверхностях для условий испарителей теплонасосных и холодильных установок. Предложена модель теплообмена при кипении на неизолированной оребренной поверхности, при решении которой получены соотношения, позволяющие определять интенсивность теплоотдачи без привлечения экспериментальных данных. Единственное замечание, которое можно адресовать данной, несомненно полезной, охватывающей большое число исследований работе, связано с тем, что в ней в основном цитируются и обобщаются исследования 70-х и 80-х годов.

В обзорной работе Маккарти и др. [44] описаны используемые материалы, методы создания и схемы производства микро- и наноструктурированных поверхностей, предназначенных для интенсификации межфазного теплообмена, включая процессы напыления тонкопленочных покрытий, литографии и травления (рассматриваются как методы создания нанопокровов с подложкой, так и без нее). Кроме того, авторами анализируются методы создания комплексных, иерархических и гетерогенных структурированных поверхностей с использованием современных технологий.

Аттингером и др. [42] также рассматриваются многочисленные методы модифицирования поверхностей и различные типы современных интенсифицирующих структур с характеристиками от нано- до сантиметрового (т.е. “макро”) мас-

штаба. На основе проведенного обзора делается вывод о том, что оптимальные поверхности должны учитывать конкретные особенности межфазного теплообмена и в этом смысле соответствовать одному из следующих пунктов:

- быть мультимасштабными (учет мультимасштабности процесса теплообмена);
- обладать неоднородной смачиваемостью (учет двухфазной природы фазового перехода);
- быть адаптивными (учет развития переходных процессов и смены режимов теплообмена).

В обзоре Кима и др. [45] рассмотрены современные исследования по интенсификации процесса кипения на микро- и наноструктурированных поверхностях. Описание имеющихся в литературе результатов разбито авторами по разделам в зависимости от применяемых способов обработки поверхности: механического, нанесения покрытий, химической обработки (оксидирование, травление и т.д.) или применения микро/наноэлектромеханических технологий (в том числе для создания мультимасштабных поверхностей), — и систематизировано в таблицах. К сожалению, в сводных таблицах не приводится информации о полученной в цитируемых работах интенсификации. В обзоре также представлены современные модели расчета критического теплового потока (КТП) для микро- и наноструктурированных поверхностей.

Монография Павленко и др. [47] посвящена исследованиям теплообмена при испарении и кипении в стекающих пленках низкокипящих жидкостей на гладких и структурированных поверхностях. В работе описаны результаты экспериментального исследования гидродинамики и теплообмена при течении пленок азота на гладких поверхностях, а также приведены данные о влиянии различных видов структурирования поверхности на теплообмен и гидродинамику пленочного течения маловязких жидкостей (хладоны и их смеси). Предложена модель расчета КТП для стекающих по гладкой поверхности пленок жидкости. Показано, что простые в изготовлении сеточные покрытия могут способствовать интенсификации теплообмена в режиме испарения пленок жидкости. Значения КТП для исследованных авторами поверхностей с ромбовидной текстурой и сеточными покрытиями в области умеренных чисел Рейнольдса (Re) также заметно превышают значения КТП для гладкой и оребренной поверхностей.

В первой части работы Суртаева и др. [48] представлен детальный обзор исследований, посвященных использованию микро- и наномодифицированных поверхностей и покрытий для интенсификации теплообмена и повышения КТП при кипении жидкости. Во второй части работы авторами рассмотрены основные методы созда-

ния микро- и наноструктурированных поверхностей. В частности, отмечено, что наилучшие показатели при кипении жидкости на рассмотренных микроструктурированных поверхностях наблюдались на пористых покрытиях, полученных методом спекания металлических частиц.

Авторами Лиэн и Мудаваром [50] проведен подробный обзор современных исследований по интенсификации теплоотдачи в условиях большого объема с использованием плоских теплоотдающих поверхностей, структурированных на макро/микро- и наномасштабе, проанализированы также результаты мультимасштабного структурирования поверхности и модификации ее смачиваемости. Показано, что рассмотренные известные методы обработки (нанесение шероховатости, применение металлических покрытий высокой пористости, оребрение и т.д.), как и ультрасовременные методы структурирования поверхностей (включая гибридные техники макро/микро- и наномодификации), ведут к значительному увеличению коэффициента теплоотдачи и критического теплового потока.

Не останавливаясь подробно на всех перечисленных выше обзорных работах и монографиях, опубликованных в первые декады 2000-х, можно заключить, что исследование интенсификации теплообмена с использованием модифицированных поверхностей является одним из наиболее востребованных направлений в теплофизике и теплотехнике.

В предлагаемом обзоре наряду с исследованиями по интенсификации кипения в условиях большого объема с помощью пассивных методов также рассматриваются исследования интенсификации кипения и испарения в стекающих пленках жидкости (их можно отнести к так называемым полупассивным методам интенсификации²), актуальность которых в первую очередь связана с перспективами перехода от погружных к более экономичным и эффективным пленочным теплообменникам. Описание механизма пузырькового кипения в стекающих пленках, как и способы его интенсификации, могут быть в значительной мере заимствованы из исследований для большого объема (с учетом характерных особенностей пленочного течения). Но интенсификация испарения в стекающих пленках происходит за счет роста вклада конвекции, связанного с развитием теплообменной поверхности и сопутствующим воздействием на гидродинамику течения (турбулизация потока жидкости в пристенной области). В части современных работ также учитывается вклад испарения микрослоя менис-

² Поскольку необходимо использование насоса для поддержания требуемого уровня жидкости в баке постоянного уровня.

ков, образующихся при течении пленки жидкости по микрорельефу.

В обзоре выполнен также анализ современных исследований по интенсификации теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях, включая краткое рассмотрение наиболее перспективных методов модификации теплообменных поверхностей.

1. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КИПЕНИЯ И ИСПАРЕНИЯ

Доступными для широкого применения и при этом эффективными в плане интенсификации теплоотдачи при кипении и испарении являются различные промышленные и авторские способы создания микроструктурированных двух- и трехмерных поверхностей с применением накатки, фрезерования, резания и прочих методов механической обработки материалов (включая использование проволочных/сеточных покрытий), увеличивающих площадь, пористость и шероховатость теплообменной поверхности.

Вернувшийся в 1950-х гг. интерес к исследованиям по интенсификации кипения с помощью модифицированных поверхностей привел к регистрации в 1970-х гг. серии патентов на структурированные поверхности кипения, полученные с помощью механической обработки и имеющие воспроизводимую микроструктуру (последнее является немаловажным фактором для промышленного производства), такие как Thermoexcel-E [55], GEWA-T [56], Turbo-B [57] и т.д. Это положило начало “буму” разработки и применения в промышленных масштабах интенсифицирующих поверхностей кипения (а также испарения/конденсации) различной геометрии. Эволюция интенсифицирующих поверхностей хорошо видна при сравнении свойств запатентованных в разные десятилетия коммерческих труб: в 1997 году авторами Торсом и др. [58] был зарегистрирован патент на поверхность Turbo-BIII, которая была на 70% эффективнее, чем первоначально разработанная версия Turbo-B [57], при этом теплоотдача Turbo-B уже в три раза превышала теплоотдачу для гладкой поверхности [59]. Это достаточно высокие показатели.

Примерно в это же время (1996 г.) был зарегистрирован патент Зубкова и Овчинникова [60], описывающий разработанный российскими учеными метод создания микроструктурированных поверхностей с помощью прецизионной механической обработки — так называемый метод деформирующего резания (МДР). Позже в 2007 и 2013 гг. были зарегистрированы совместные патенты Торса и Зубкова [61, 62], описывающие усовершенствованную методику обработки по-

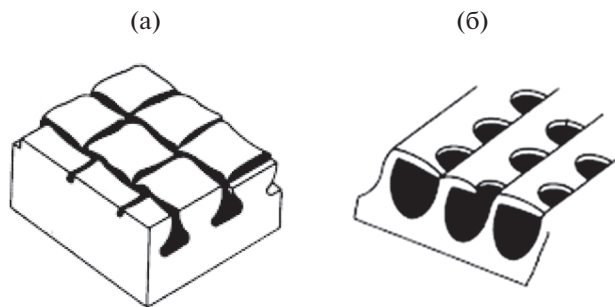


Рис. 1. Схематическое изображение поверхностей, интенсифицирующих процесс кипения: Turbo-B (а) и Thermoexcel-E (б), см. патенты [55, 57].

верхностей МДР. Процесс совершенствования механических методов прецизионной обработки пластичных материалов продолжается в настоящее время [2].

Ниже рассмотрены экспериментальные и обобщающие работы по интенсификации теплообмена с использованием как известных коммерческих труб³, получивших к настоящему времени широкое распространение, так и разработанных авторами (т.е., как правило, не имеющих запатентованных наименований и технологий воспроизводства) модифицированных поверхностей.

1.1. Применение коммерческих интенсифицирующих поверхностей. В [63] измерялись коэффициенты теплоотдачи (КТО) при кипении хладонов HCFC22, HFC134a, HFC125 и HFC32 на низкоресистой трубе, а также коммерческих трубах Turbo-B и Thermoexcel-E (рис. 1а, 1б) при их горизонтальной ориентации в условиях свободной конвекции. Длина труб составляла 152 мм, внешний диаметр — 18.6–19 мм, эксперименты проводились при температуре насыщения 7°C. Тепловые потоки изменялись в диапазоне 10–80 кВт/м². Параметры структур тестируемых труб приведены в табл. 1. Диапазоны увеличения коэффициента теплоотдачи при кипении на низкоресистой трубе, Turbo-B и Thermoexcel-E составили соответственно 1.09–1.68, 1.77–5.41 и 1.64–8.77 раз.

В работе Кристианса и Тоума [64] сравниваются полученные опытные данные при кипении в большом объеме и в стекающих пленках для современных интенсифицирующих труб Turbo-B5

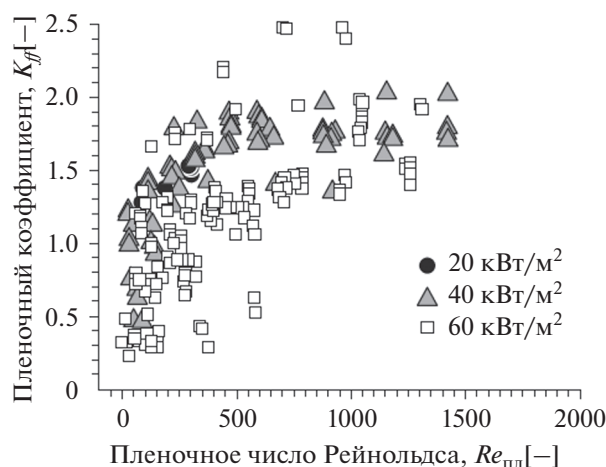
³ Базовым методом создания коммерческих интенсифицирующих труб является накатка ребер с использованием блока накатных роликов (так называемые радиальная или поперечно-винтовая прокатка). Ключевыми производителями оребренных труб являются Salem Tube, Tulsa Fin Tube, Wolverine Tube Inc., Fintube (США), Wieland Thermal Solutions (Германия), Profins, AESSEAL (Великобритания), Hitachi (Япония) и др. В России технологическое оборудование для накатывания ребер на трубах разрабатывается в ОАО АХК “ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова” (Москва).

Таблица 1. Характеристики модифицированных труб [63]

Труба	Гладкая	Низкорребристая	Turbo-B	Thermoexcel-E
Ребер/м (ребер/дюйм)	—	1023 (26)	1653 (42)	1929 (49)
Высота ребер (мм)	—	1.21	0.44	0.49

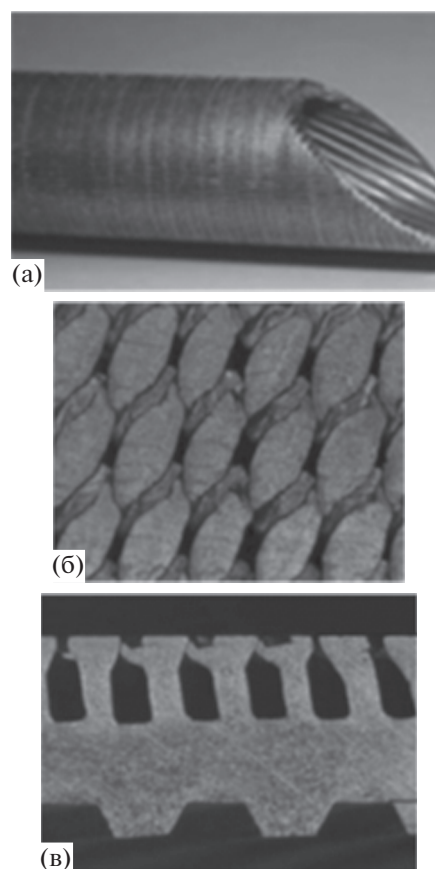
(Wolverine Tube Inc.) и Gewa-B5 (Wieland Thermal Solutions) с использованием хладонов R134a и R236fa. Авторами проводились эксперименты как на одиночной горизонтальной трубе, так и на пучках труб. Пленочное число Рейнольдса изменялось в диапазоне 0–3000. Получено увеличение коэффициента теплоотдачи в стекающих пленках по сравнению с условиями большого объема как для одиночной трубы, так и пучка труб примерно в 1.5–2 раза в зависимости от применяемого хладона и типа модифицированной трубы (рис. 2). На основе полученных результатов авторы делают вывод, что большие значения пленочного коэффициента K_{ff} , как правило, наблюдаются при больших тепловых потоках и связывают это со снижением производительности, наблюдаемым при повышении тепловой нагрузки при кипении в большом объеме, не отмеченном для стекающих пленок. Значения КТП, найденные для трубы Gewa-B5 в [64], близки к ранее полученным данным для Gewa-B4 [65], то же верно и для трубы Turbo-B5 при сравнении с данными для поверхности предыдущего поколения Turbo-EDE2 [65].

В работе Чена [66] описаны результаты экспериментального исследования пузырькового кипения хладона R123 на интенсифицирующей поверхности — горизонтально ориентированной трубе с трехмерной микроструктурой, произведенной Wolverine Tube, Inc. (рис. 3). Эксперименты проводились в условиях свободной конвекции

**Рис. 2.** Зависимость коэффициента увеличения теплоотдачи K_{ff} от числа Рейнольдса (Turbo-B5, $T_{\text{нас}} = 5^\circ\text{C}$, тестовая жидкость — R236fa) [64].

при трех значениях давления, соответствующих температурам насыщения: 4.4, 11.1 и 17.8°C. Наименование трубы и характеристики ее микроструктуры авторами не указаны. Сообщается об увеличении теплоотдачи при кипении на модифицированной трубе по сравнению с эталонной гладкой от шести до десяти раз.

Ли и другими [67] проводились экспериментальные исследования теплообмена при испарении пленок, стекающих по пакету из шести горизонтальных модифицированных труб в условиях вакуума. Были протестированы новые интенсифицирующие трубы двух типов: Turbo-SAB (с количеством штырьков 19 и 26 шт./дюйм) и

**Рис. 3.** Снимки экспериментальной трубы: (а) — сегмент трубы, демонстрирующий ее наружную и внутреннюю поверхности; (б) — увеличенное изображение наружной микроструктурированной поверхности; (в) — увеличенное изображение поперечного разреза стенки трубы [66].

Korodense при изменении пленочного числа Рейнольдса Re от 10 до 110 (рис. 4). Режим пузырькового кипения не рассматривался. Сообщается, что трубы, имеющие помимо внешней, также внутреннюю структуру (т.е. Korodense), показали наилучшие результаты по теплоотдаче при испарении. В работе также предложены корреляции для расчета КТО и величин интенсификации для модифицированных труб, описывающие полученные опытные данные с точностью $\pm 30\%$ ⁴.

В обобщающей работе Хуана (Heat Transfer Research Inc.) [68] предложены полуэмпирические корреляции, описывающие с точностью $\pm 25\%$ данные по кипению на большом количестве известных промышленных поверхностей, произведенных Wieland Thermal Solutions (GEWA-SE, GEWA-T, GEWA-TX, GEWA-TX19, GEWA-TWX, GEWA-YX26, GEWA-B, GEWA-PB и GEWA-B5), Wolverine Tube, Inc. (Turbo-B, Turbo-BII LP, Turbo-BII HP и Turbo-B5) и Hitachi (Thermoexcel-E). Тестовые жидкости включают широко используемые хладоны: R11, R12, R22, R113, R123, R236fa и R134a так же, как и углеводороды, в том числе изопропиловый спирт, пропан, пентан и п-ксилол. Опытные данные, разбитые авторами на две группы по типу зависимости теплоотдачи от теплового потока, покрывают диапазон приведенных давлений от 0.011 до 0.222 и тепловых потоков от 0.13 до 446.5 кВт/м². Полуэмпирические корреляции, предложенные в [68], имеют следующий вид:

$$h_{nb1} = 180 \left(\frac{\lambda'}{\Lambda^*} \right) \left(\frac{q\Lambda^*}{\lambda' T_s} \right)^{0.36} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.3} \left(\frac{P_{fin}}{\Lambda^*} \right)^{-0.2} \left(\frac{\delta_{gap}}{\Lambda^*} \right)^{-0.5}, \quad (1)$$

$$h_{nb2} = 0.35 \left(\frac{\lambda'}{\Lambda^*} \right) \left(\frac{q\Lambda^*}{\lambda' T_s} \right)^{-0.05} \left(\frac{L(\Lambda^*)^2}{\alpha'^2} \right)^{0.2} \times \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.3} \left(\frac{P_{fin}}{\Lambda^*} \right)^{-0.2} \left(\frac{\delta_{gap}}{\Lambda^*} \right)^{-0.5}. \quad (2)$$

Здесь λ' – теплопроводность жидкости, q – плотность теплового потока, L – теплота парообразования, α' – температуропроводность жидкости, T_s – температура насыщения, ρ – плотность, P_{fin} – шаг микрооребра, δ_{gap} – межреберный паз, $\Lambda^* = \left(\frac{2\sigma}{g(\rho' - \rho'')} \right)^{0.5}$ – характерный масштаб, используемый автором.

⁴ В данном обзоре не рассматриваются подробно многочисленные исследования по применению модифицированных труб (зачастую имеющих также внутреннюю структуру поверхности) в трубчатых теплообменниках. Детальное рассмотрение таких работ, как и существующих зависимостей для расчета коэффициента теплоотдачи при различных режимах орошения трубного пакета, – предмет отдельных обзорно-аналитических работ.

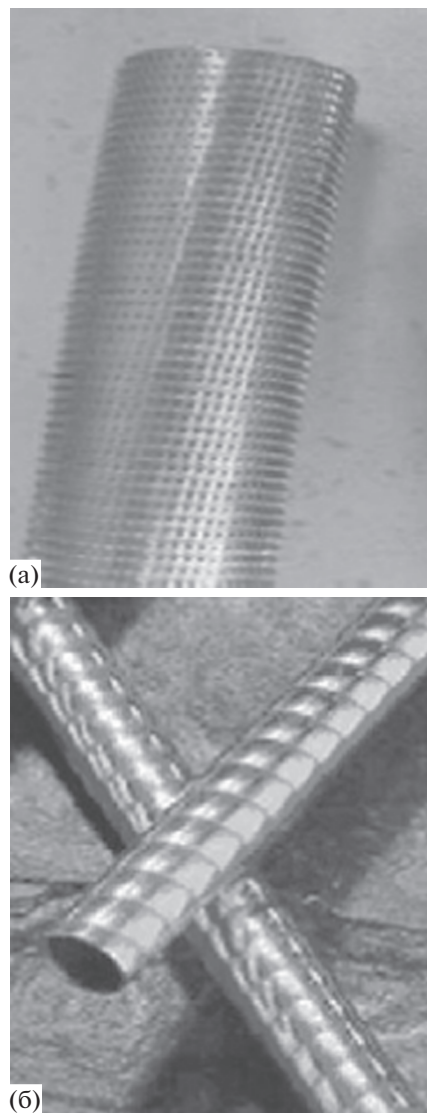


Рис. 4. (а) – Turbo-CAB (19 шт./дюйм), (б) – Korodense [67].

Согласно [68], корреляция (1) описывает данные, полученные для поверхностей, имеющих классическую зависимость КТО от теплового потока (КТО возрастает с ростом теплового потока, как в случае гладкой поверхности), это касается, например, поверхностей GEWA-T и Turbo-B. Корреляция (2) предложена для описания данных, полученных на современных поверхностях, таких как GEWA-B5 и Turbo-B5, коэффициент теплоотдачи для которых остается постоянным либо слабо уменьшается с ростом теплового потока.

Исследования теплообмена при кипении и испарении жидкостей на коммерческих интенсифицирующих поверхностях также проводились в работах [65, 69–72] при различных числах труб в пакете, их ориентации, характеристиках текстуры поверхности и условиях проведения эксперимента.

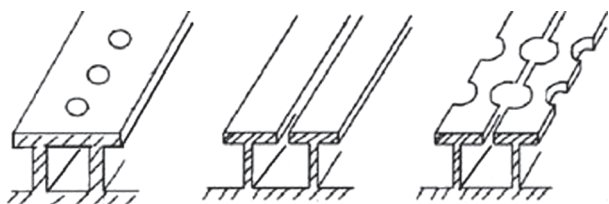


Рис. 5. Геометрия интенсифицирующих поверхностей с полужакрытыми полостями [73].

1.2. Авторские поверхности, полученные механической обработкой. Кимом и Чоем [73] исследовались интенсифицирующие трубы различной конфигурации с полужакрытыми порами и тоннелями, полученные на базе микрооребранных труб с помощью резания и упрочнения накаткой (рис. 5). Геометрия исследуемых авторами труб близка к геометрии трубы Turbo-B. Три типа структур (см. рис. 5) с диаметром пор 0,2, 0,23 и 0,27 мм тестировались при кипении различных хладагентов (R11, R123 и R134a) для подбора оптимального сочетания размера пор и жидкости. Для R134a максимальное значение КТО было получено для размера пор 0,27 мм. Для R11 и R123 оптимальный размер пор был равен 0,23 мм. Теплообменные характеристики исследуемых микроструктурированных труб оказались сравнимыми с характеристиками известных коммерческих поверхностей. При тепловом потоке 4 Вт/см^2 и температуре насыщения $4,5^\circ\text{C}$ коэффициент теплоотдачи исследуемых в работе труб был, соответственно, в шесть с половиной (для R11), шесть (для R123) и пять (для R-134a) раз выше, чем коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности.

В работах [74, 75] проводились экспериментальные исследования интенсификации теплообмена при испарении R11, воды и водно-солевых смесей на гладкой горизонтальной трубе, а также пучках горизонтальных структурированных труб двух типов: низкореебристой трубе и структурированной трубе с трехмерной текстурой. Результаты исследования показали, что поверхность с трехмерной текстурой может заметно интенсифицировать теплообмен, давая во всем исследованном диапазоне изменения тепловых потоков результаты по увеличению теплоотдачи, сопоставимые с коммерческими интенсифицирующими трубами GEWA-T, GEWA-TE и GEWA-HF. Показана возможность трехкратной интенсификации коэффициента теплоотдачи (в зависимости от режима теплообмена) на структурированной трубе по сравнению с гладкой трубой для воды и водно-солевых смесей и увеличения КТО для R11 в 7–10 раз.

Авторы [76, 77] исследовали теплообмен с применением горизонтальных структурированных медных труб четырех типов (с внешней и

внутренней текстурами), отличающихся микрохарактеристиками (внешний вид исследованных труб подобен трубе, изображенной на рис. 3). В качестве рабочих жидкостей применялись хладагенты R134a, R123, R32 и R410A. Авторами исследовано влияние расхода жидкости на теплоотдачу при пленочном течении хладагентов на пакетах интенсифицирующих труб. Проведено сопоставление полученных результатов по теплоотдаче для различных хладагентов. В частности, показано, что для всех исследованных типов труб R134a обеспечивает примерно в два-три раза больший коэффициент теплоотдачи, чем R123.

В качестве конкурентоспособного отечественного метода создания интенсифицирующих теплообменных поверхностей можно назвать упомянутый выше МДР. Это доступный и эффективный метод прецизионной механической обработки пластичных материалов, основанный на подрезании поверхностного слоя материала заготовки и последующей его деформации с формированием макро- и микрорельефа в виде ребер, шипов, ячеек или резьбовых профилей. Он дает возможность создавать сложные поверхности для интенсификации теплообмена при кипении (рис. 6а) с увеличением площади обрабатываемой поверхности до 12 раз (см. [61, 62, 78, 79]), а с учетом нового патента Зубкова, Битюцкой [2] и вплоть до 48 раз, позволяя создавать сверхплотные микроштырьковые структуры с количеством штырьков до 400 шт./мм кв. (рис. 6б). Подробное описание метода приведено в [80].

Интенсификация кипения воды в условиях свободной конвекции на структурированных поверхностях, полученных МДР, исследовалась в работах Щелчкова и др. [81], Попова и др. [82] и еще ряде работ данной исследовательской группы. Авторами разработано и подготовлено с использованием МДР большое количество экспериментальных участков с различными двух- и трехмерными микротекстурами. Наибольшее увеличение коэффициентов теплоотдачи (в 4–6 раз [81]) и критических тепловых потоков (до шести раз [81, 82]) получено на поверхностях с трехмерным микрооребрением, имеющих зазоры шириной 120–180 мкм при высоте ребер 340–570 мкм и продольном шаге оребрения 240–400 мкм.

В работе Антоненковой и др. [83] представлены результаты испытаний теплонасосной установки (ТНУ), в испарителе и конденсаторе которой были установлены пучки труб, обработанных по технологии деформирующего резания. Произведена оценка повышения эффективности кипения и конденсации фреона в рассматриваемых аппаратах по сравнению с аналогичными процессами на гладких трубах. Показано, что при вынужденном течении хладагента в межтрубном

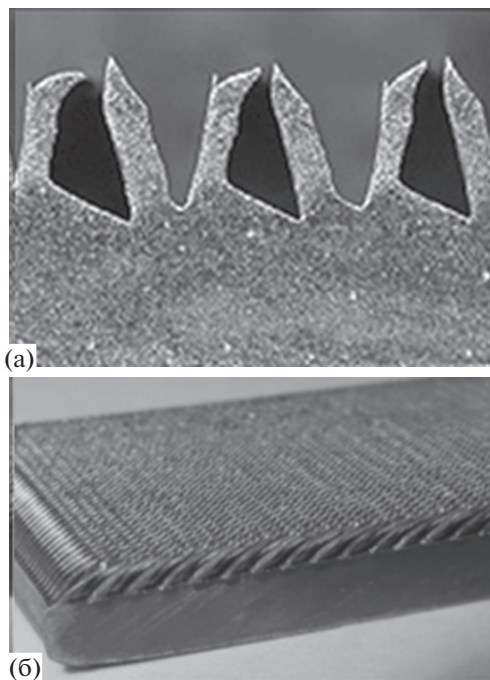


Рис. 6. (а) — микроструктурированная поверхность кипения, полученная МДР [82]; (б) — сверхплотная микроштырьковая структура, полученная МДР, патент Зубков, Битюцкая [2].

пространстве испарителя коэффициенты теплоотдачи при кипении возрастают в 3–5 раз, а при конденсации пара на ошпикованной поверхности — в 9–21 раз по сравнению с гладкими трубами. Причиной столь существенного повышения эффективности теплоотдачи конденсирующегося фреона может служить появление капиллярного эффекта на пучке труб конденсатора вследствие особенностей макрорельефа поверхности.

В работе Володина и др. [84] исследовались два типа структур тепловыделяющей стенки, полученных МДР: микрообребрение с полузакрытыми подповерхностными порами (для интенсификации кипения) и микроштырьковые структуры (развитие поверхности для интенсификации испарения). В качестве рабочей жидкости использовалась смесь хладонов R114/R21. Течение пленки бинарной смеси осуществлялось по наружной поверхности вертикальных обогреваемых цилиндров в ламинарно-волновом режиме. Схематическое изображение МДР-структуры с полузакрытыми порами и наблюдаемая картина развитого пузырькового кипения на ней, а также сравнение с кипением на гладкой поверхности при одинаковых тепловых потоках и сопоставимых расходах жидкости отражены на рис. 7.

Авторами показано, что поверхности с полузакрытыми полостями имеют преимущество в интенсификации теплоотдачи в режиме кипения (интенсификация КТО — до четырех раз по сравнению с гладкой поверхностью), в то время как микроштырьковые структуры способствуют увеличению теплоотдачи в режиме испарения (до двух раз по сравнению с гладкой поверхностью). Продемонстрировано значительное снижение температурного напора закипания на обоих типах поверхностей. Наибольшие значения по интенсификации кипения получены на микроструктурированной поверхности с шагом ребрения 100 мкм, высотой ребер 220 мкм и шагом продольной накатки 318 мкм. На рис. 8а приведено сравнение опытных данных [84] с результатами для интенсифицирующих коммерческих поверхностей GEWA-K19 и GEWA-T19D, полученными при кипении R-113 в большом объеме Аюбом, Берглсом [69, 85]. На рис. 8б представлено сравнение результатов по теплоотдаче, полученных

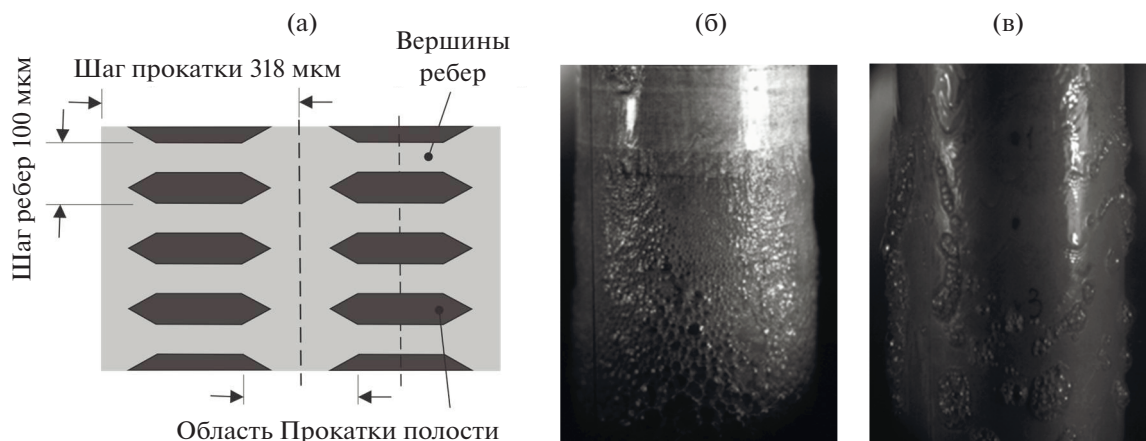


Рис. 7. (а) — пропорциональное реальным размерам изображение МДР-структуры с полузакрытыми полостями (вид сверху); (б) — кипение смеси R114/R21 на структурированной МДР-поверхности ($Re_{пл} = 370$, $q = 3.5$ Вт/см²); (в) — кипение R114/R21 на гладкой поверхности ($Re_{пл} = 320$, $q = 3.5$ Вт/см²), [84].

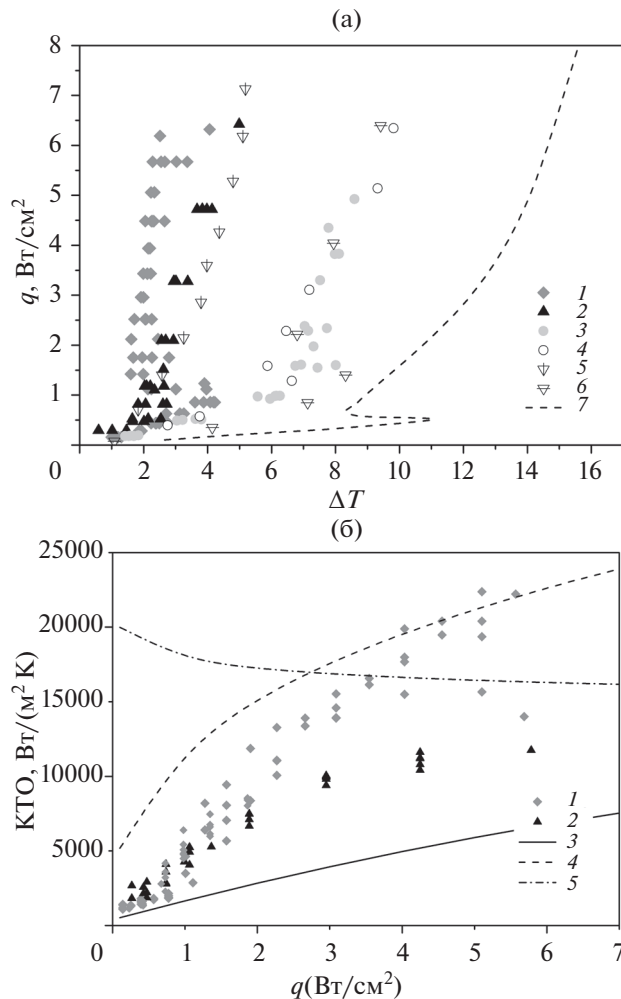


Рис. 8. Сравнение опытных данных для МДР-поверхностей с данными для GEWA-K19 и GEWA-T19D [69] (а): 1–3 – средний, большой и малый размер пор МДР-поверхностей; 4 – гладкая труба (стекающие пленки); 5–7 – GEWA-T19D, GEWA-K19 и гладкая труба (большой объем) [69]; (б) – сопоставление данных для МДР-поверхностей с расчетом по корреляциям, предложенным в [68]: 1, 2 – средний и большой размер пор; 3 – корреляция Гогонина из [86], описывающая опытные данные [84] для гладкой поверхности; 4, 5 – корреляции (1) и (2) [68].

для МДР-поверхностей с полужакрытыми порами с приведенными выше зависимостями (1), (2) из [68], обобщающими данные для коммерческих интенсифицирующих поверхностей. Видна корреляция между полученными опытными данными для наиболее эффективной МДР-поверхности с расчетом по формуле (1) при выборе расчетных параметров МДР-структуры: $P_{\text{fin}} = 200$ мкм и $\delta_{\text{gap}} = 100$ мкм. Опытные данные по теплоотдаче для гладкой поверхности были обобщены с помощью расчетной зависимости, предложенной Гогониным в [86].

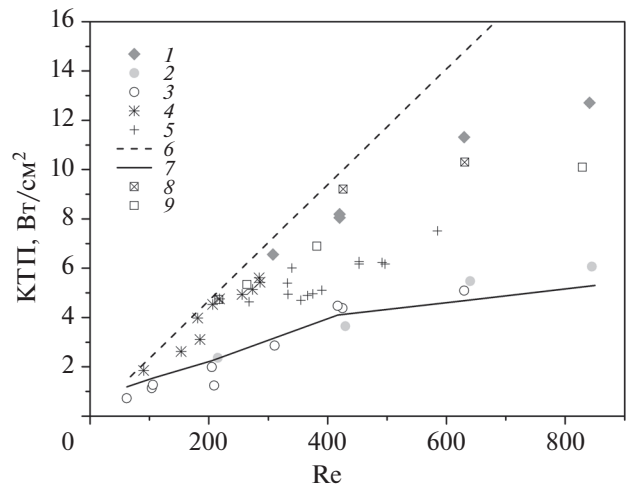


Рис. 9. Зависимость КТП от числа Рейнольдса для различных поверхностей: 1–3 – данные для МДР-поверхностей со средним и малым размером пор, а также для гладкой поверхности [84]; 4, 5 – данные для GEWA-B5 (жидкости R236fa и R134a) [64]; 6 – расчет полного испарения жидкости; 7 – корреляция для расчета КТП для стекающих по гладкой поверхности пленок жидкости [87]; 8, 9 – данные для микроштырьковых МДР-поверхностей (высота штырьков – 250 и 500 мкм).

На рис. 9 приведено сравнение опытных данных по критическому тепловому потоку для МДР-поверхностей с данными, полученными в [64], и расчетными зависимостями. Из графика видно, что значения КТП для МДР-поверхностей до трех раз превышают соответствующие значения для гладкой поверхности, а также КТП [64] для пленок хладонов, стекающих по горизонтальным пучкам труб GEWA-B5 в диапазоне чисел Рейнольдса 300–600. В области умеренных расходов жидкости ($Re \leq 400$) данные по КТП для наиболее эффективной МДР-поверхности (с высотой ребер 220 мкм) близки к расчетной линии полного испарения, что говорит о высокой “устойчивости” микроструктурированных поверхностей с полужакрытыми полостями к развитию кризисных явлений.

Исследования по интенсификации теплообмена с применением модифицированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, также проводились в работах Попова и др. [88], Володина и др. [89–93], Павленко и др. [94], а также Степанова и др. [95].

1.3. Интенсификация кипения и испарения с помощью проволочных/сеточных покрытий. Применение сеточных покрытий является достаточно простым и доступным и в то же время не слишком популярным способом интенсификации теплоотдачи. Тем не менее развитие данного метода в современных экспериментальных работах, как будет показано ниже (например, в [96–98]), поз-

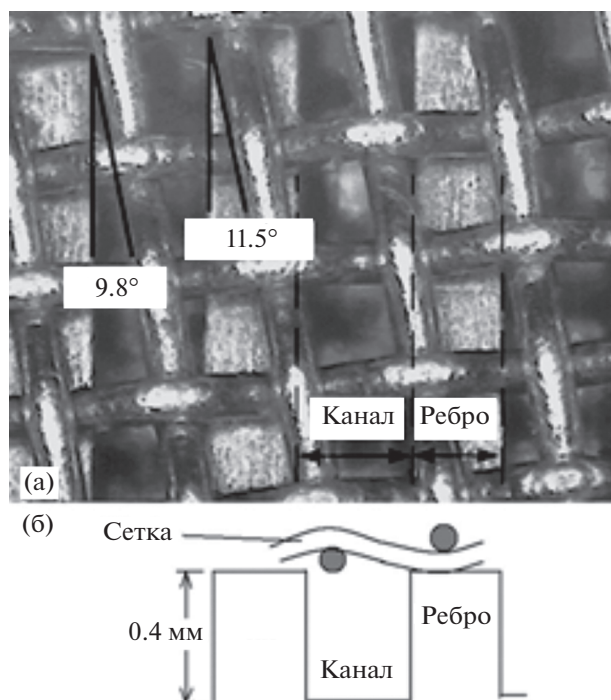


Рис. 10. Комбинированное покрытие (оребрение + сетка) [96]: (а) — фотоснимок, вид сверху; (б) — схематическое изображение, вид сбоку.

воляет добиваться результатов сопоставимых, а в отдельных случаях и превышающих результаты, полученные с применением специализированных коммерческих поверхностей кипения или авторских микроструктурированных поверхностей, полученных более сложными методами.

За период приблизительно с 1975 г. по настоящее время вышло заметное, хотя и не слишком большое количество работ по исследованию влияния на теплообмен сеточных покрытий применительно к различным приложениям — от теплообменных аппаратов до охлаждения микроэлектроники. В этих работах варьируются материал и диаметр проволоки сетки, число слоев покрытия, способы монтажа сеточных покрытий на теплоотдающих поверхностях, а также условия постановки экспериментов. Ниже рассмотрены некоторые из современных исследований с применением сеточных покрытий.

Чьен, Цай [96] исследовали теплообмен при кипении и испарении хладагента R245fa на горизонтальных медных модифицированных трубах. Эксперименты проводились как при пленочном течении хладагента, так и в условиях большого объема при температурах насыщения 5°C (что актуально для промышленных морозильных установок) и 20°C. Тепловые потоки изменялись в диапазоне от 4.5 до 48.5 кВт/м². Были протестированы оребренная труба с высотой ребер 0.4 мм и частотой оребрения 60 ед./дюйм, а также труба с комбини-

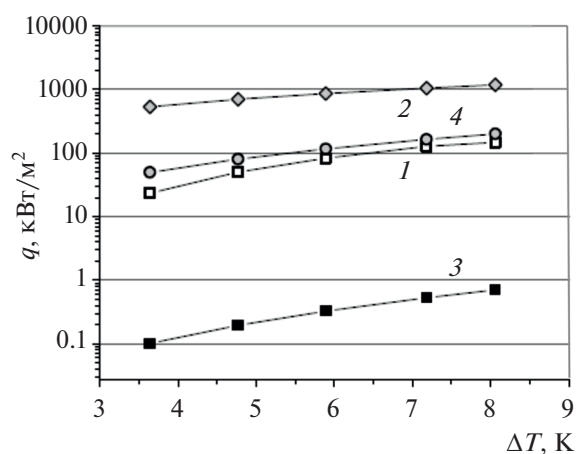


Рис. 11. Экспериментальные данные [97] (1) и результаты расчетов по моделям для двухслойной сетки (2–4): 2 — Нишикава и др. [102], 3 — Ранненберг и Бир [103], 4 — модифицированная модель Сина и Чао [104].

рованной поверхностью — сеточным покрытием поверх микрооребрения (рис. 10). Показано, что для комбинированного покрытия получены четырех- и семикратные значения интенсификации теплоотдачи при кипении в большом объеме хладагента R245fa при температурах насыщения 5°C и 20°C соответственно. Авторами также предложены новые корреляции для расчета КТО при испарении в стекающих по гладкой поверхности пленках жидкости как при наличии, так и при отсутствии пузырькового кипения.

В работе Домбек и др. [97] исследовалась интенсификация теплообмена при применении тонких металлических сеток с различным количеством слоев (от одного до четырех). Рабочей жидкостью служил спирт. Авторами достигнута значительная интенсификация теплоотдачи в режиме кипения — около восьми раз (рис. 11), продемонстрировано значительное снижение температурного напора. Показано, что применение четвертого слоя сетки ухудшает теплоотдачу. Приведенные в работе модели, кроме модифицированной модели Сина и Чао [104], не описывают полученных авторами опытных данных.

В работе Чжана и др. [98] с целью интенсификации кипения применялись многослойные медные сеточные покрытия с градиентной пористостью. Обнаружено, что “эффект тяги” (“microchimney effect”), возникающий в градиентных сетках, обеспечивает более быстрый отрыв пузырьков малых диаметров. Исследованная структура дала возможность получить впечатляющие значения КТП — вплоть до 2719 кВт/м² и КТО до 261 кВт/м² К. На рис. 12 приведены фотоснимки градиентных сеточных покрытий, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, а также схемы применяемых авторами по-

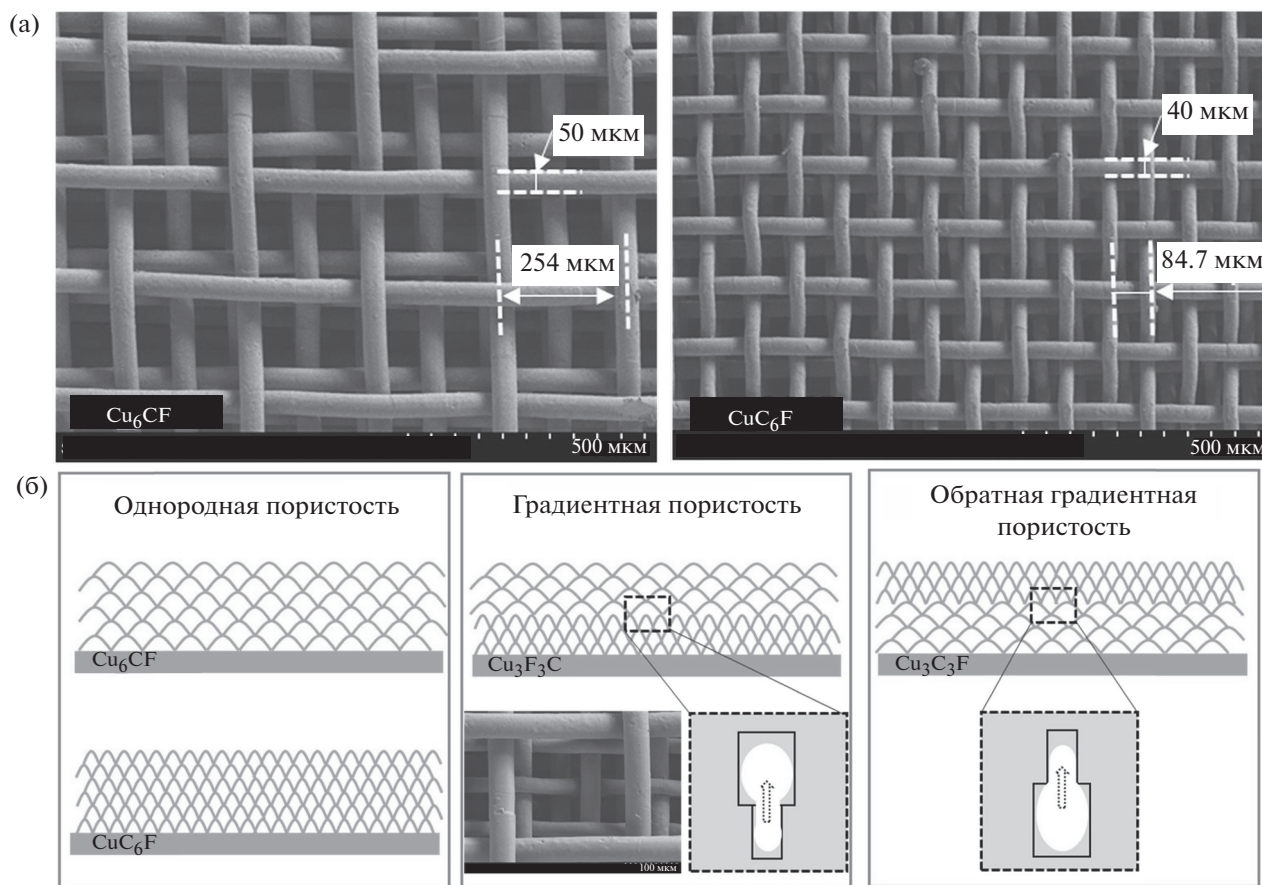


Рис. 12. Фотографии двух типов микросеток (а) и схемы многослойных градиентных сеточных покрытий (б) [98].

крытий. Максимальные увеличения КТО и КТП получены авторами при использовании градиентного покрытия из трех мелких и трех более грубых сеток (наложенных сверху) и составили 6.6 и 3 раза соответственно.

В экспериментальной работе Сальванини и Такуэды [99] авторы исследовали влияние проволочных интенсификаторов на испарение стекающей со спутным потоком газа пленки воды, для чего внутри трубы с внутренним диаметром 51 мм и длиной 1.5 м по периметру было установлено стальное сеточное покрытие прямоугольной формы с диаметром проволоки 0.25 мм. Параметры ячеек сетки авторами не указаны. Результаты измерений показали, что для диапазона изменения входного расхода жидкости 0.72–1 г/с интенсивность испарения пленки воды, благодаря интенсификаторам, увеличивается до трех раз по сравнению с гладкой трубой.

Герлахом и Джоши [100] проводились исследования по интенсификации кипения с использованием диэлектрического фторуглерода PF5060. Эксперименты проводились как в условиях большого объема, так и в геометрически ограниченных условиях, в которых сетка была прикрыта

пластинкой из поликарбоната. Использовались три типа проволочных покрытий (из меди или бронзы) с параметрами 8 проволок/см (диаметр – 406 мкм), 20 проволок/см (диаметр – 229 мкм) и 59 проволок/см (диаметр – 66 мкм). Покрытия припаивались к верхней части медного стержня, представляющей собой площадку $0.9 \times 0.9 \text{ см}^2$. Наибольшее увеличение коэффициента теплоотдачи достигало четырех раз по сравнению с гладкой поверхностью и наблюдалось для покрытия, содержащего 20 проволок/см.

Франко и другими [101] также исследовалась возможность интенсификации теплообмена за счет применения сеточных покрытий при кипении диэлектрической жидкости R141b в условиях большого объема и при атмосферном давлении. Работа, помимо экспериментальных исследований, содержит аналитическую часть с предложенной В.В. Яговым формулой для расчета КТП

$$q_{cr} = 0.33 h_{LG} \rho_G^{3/4} \left(\sigma g \frac{\Delta \rho}{\rho_L} \right)^{1/4} (1 + L/\Phi)^{1/4}, \quad (3)$$

где h_{LG} – теплота парообразования, L – апертюра сетки, Φ – диаметр сетки.

Авторы работы варьировали материал проволоки сетки, ее диаметр, а также размер ячейки и число слоев сеточного покрытия, что позволило им провести систематизированное исследование и прийти к следующим выводам:

- Начало кипения при наличии сеточных покрытий происходит при значительно более низких перегревах, чем на гладкой поверхности.
- КТО значительно возрастает, особенно при низких тепловых потоках (более 100%).
- КТП в большинстве рассмотренных конфигураций превышает значения для гладкой поверхности (вплоть до 40%).

Авторами исследования также наблюдался гораздо более медленный переход к режиму устойчивого пленочного кипения на поверхностях с сеточными покрытиями (до десяти минут) по сравнению с гладкой поверхностью (несколько секунд).

Интенсификация испарения в стекающих пленках жидкости на вертикальной трубе с крупными поперечными интенсификаторами (см. рис. 13а) исследовалась в работе Окесьё и др. [105]. В качестве рабочей жидкости использовались водные смеси с молочным порошком различной концентрации. Максимальная интенсификация составила 2.5 раза по сравнению с данными для гладкой трубы. Печеркиным и др. в [106], а также в последующих работах коллектива [47, 89] были представлены схожие результаты при исследовании интенсификации теплоотдачи с помощью сеточных покрытий с диаметром проволоки (0.4–0.7) мм и размером ячеек (1.6–6) мм (пример используемого покрытия показан на рис. 13б) при испарении стекающих по вертикальным обогреваемым цилиндрам пленок смеси R114/R21. Применение в уже упомянутой работе [84] микроштырьковых поверхностей, полученных МДР и имеющих существенно меньшие характерные размеры (высота штырьков – 150 мкм, шаг – 250 мкм (рис. 13в)), при аналогичных условиях постановки эксперимента также показало двукратное увеличение коэффициента теплоотдачи в режиме испарения стекающих пленок жидкости [84, 107].

1.4. Применение различных видов оребрения, изменение шероховатости поверхности, влияние материала. С помощью относительно простых методов модификации поверхностей (накатка, фрезерование, шлифование) также можно заметно интенсифицировать теплоотдачу при кипении и испарении жидкости и увеличить значения критического теплового потока.

В диссертационной работе Авилес [108] “Экспериментальное исследование испарения в пленках смеси вода–этиленгликоль, стекающих по поверхности с продольными канавками” показано, что при испарении пленки жидкости, стекаю-

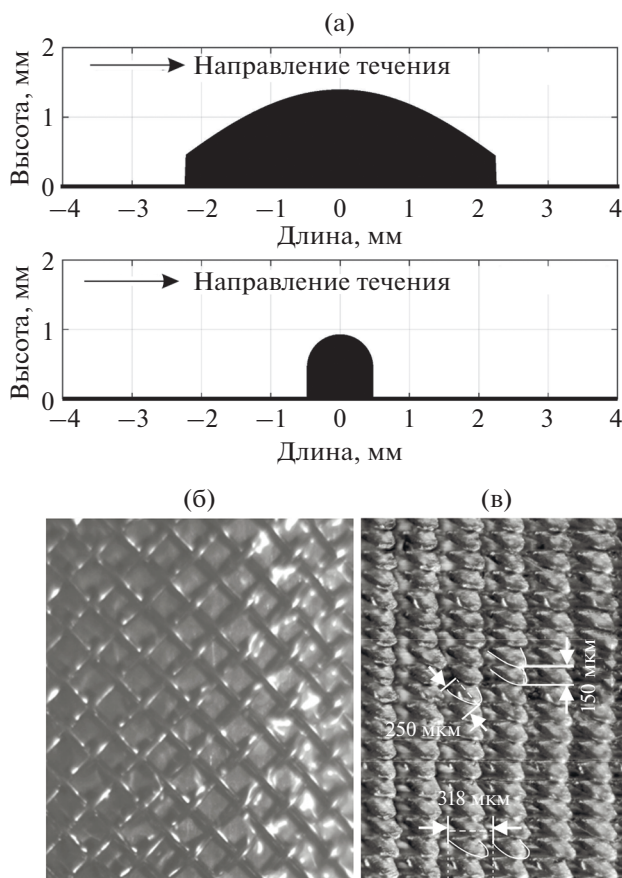


Рис. 13. (а) – интенсификаторы, использовавшиеся авторами [105]; (б) – сеточное покрытие [106]; (в) – микроштырьковая структура [84].

щей по пластине с вертикальными канавками, наблюдается увеличение теплоотдачи до 60% по сравнению с испарением пленки на гладкой пластине. Выявленная интенсификация связывается автором с изменением волновых характеристик пленки: согласно измерению толщины пленки, амплитуда волн на оребренной поверхности гораздо больше, в то время как остаточный слой между крупными волнами гораздо тоньше по сравнению с течением пленки на гладкой поверхности.

Исследования Зайцева и др. [109], проведенные на поверхностях с продольными канавками в условиях недогрева жидкости, показывают, что такие поверхности предотвращают распространение “сухих пятен” по всей тепловыделяющей области, что может существенно затягивать наступление кризиса теплоотдачи. Авторами отмечен рост КТП, достигающий 100%.

В [110] исследовалось кипение хладона R134a в большом объеме на гладкой и микроороберенной поверхностях в диапазоне давлений 6.1–12.2 бар (рис. 14). Основываясь на измерениях локальных температур стенки, авторы предложили описание

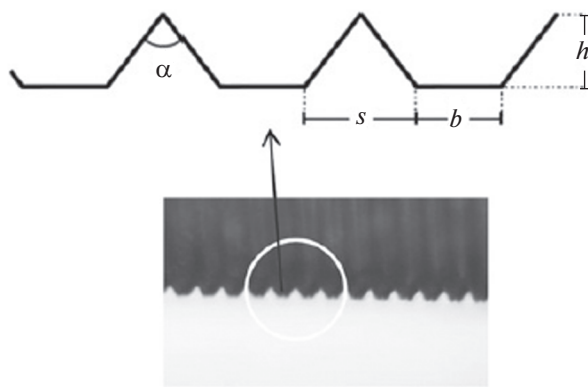


Рис. 14. Микрооребренная поверхность с канавками треугольной формы [110]: высота ребер $h = 148$ мкм, межреберный зазор $b = 172$ мкм, основание ребра $s = 228$ мкм, $\alpha = 75^\circ$.

физического механизма, отвечающего за интенсификацию теплоотдачи благодаря микроребрам. Показано, что теплоотдача для микрооребренной трубы с канавками треугольной формы несколько выше, чем для гладкой. Однако наблюдаемая интенсификация заметна только при относительно высоких тепловых потоках и лишь на нижней части трубы. Это, как предполагают авторы, связано с тем, что при высоких тепловых потоках в нижней части гладкой трубы наблюдается рост крупных пузырей с “сухими пятнами” в их основании, тогда как в случае микрооребренной поверхности часть жидкости продолжает удерживаться в канавках, затягивая развитие кризиса пузырькового кипения.

Еще одним хорошо известным и доступным способом интенсификации кипения является создание шероховатости поверхности, получаемое с помощью пескоструйной обработки, шлифования, химического травления и т.д. Еще в 1962 г. Беренсоном [111] сообщалось об увеличении теплоотдачи при кипении на шероховатых поверхностях до 600%. Исследования по уточнению влияния шероховатости на интенсификацию теплообмена в настоящее время продолжают в отдельных работах.

Джонсом и др. [112] изучалось влияние микрошероховатости при кипении воды и FC-77 на микрошероховатых поверхностях, полученных методом электрического разряда, с диапазоном среднего арифметического отклонения профиля R_a 1.08–10.0 мкм. Показано значительное влияние используемой рабочей жидкости на получаемую интенсификацию. Теплоотдача при кипении FC-77 сильнее зависела от степени шероховатости, чем в случае кипения воды. Для FC-77 наиболее шероховатая поверхность показала увеличение КТО на 210% в сравнении с полированной,

тогда как для воды наблюдалась более умеренная интенсификация на 100%.

Применение наношероховатых поверхностей (без комбинирования с другими методами обработки) не дает возможности достичь высоких значений интенсификации. В соответствующих современных исследованиях речь идет скорее об уточнении влияния наноразмерной шероховатости на теплоотдачу. Стоит отметить, что данный вид наномодификации поверхности все еще может быть получен обработкой наждачной бумагой или схожими методами механической обработки. Авторами [113] проводилось исследование влияния наношероховатости поверхности на теплоотдачу при кипении воды в большом объеме. Эталонная гладкая труба имела осредненную величину шероховатости 15 нм, в то время как обработанная труба – 61 нм. Показано, что при изменении ориентации трубы с горизонтальной на вертикальную эффект интенсификации возрастает. Также отмечено, что рост отношения длины трубы к диаметру увеличивает эффект интенсификации теплоотдачи на обработанной поверхности. В определенных условиях отражена возможность достижения более чем 100% увеличения теплоотдачи.

В заключение стоит отметить, что для корректной постановки экспериментов и сопоставления опытных данных важно учитывать влияние материала поверхности (особенно при высоких тепловых потоках) и толщины стенки на теплоотдачу. Данный вопрос не раз становился предметом дискуссий. Например, Григорьевым и др. [114] показано, что теплообмен при кипении криогенных жидкостей существенно зависит от теплофизических характеристик стенки и ее толщины, в то время как Кутепов и др. [115] считают, что при кипении обычных жидкостей на поверхностях из латуни, меди, мельхиора и нержавеющей стали материал не оказывает влияния на теплоотдачу. Гогонин [116] на основании рассмотрения большого количества экспериментальных данных по теплообмену при кипении фреонов и азота на толстостенных трубах демонстрирует, что теплофизические свойства тепловыделяющей поверхности могут существенно влиять на теплообмен не только криогенных жидкостей, но и хладонов.

Хоссейни и др. [117] было проведено скрупулезное экспериментальное исследование по выявлению влияния материала поверхности на теплоотдачу при пузырьковом кипении хладона R113 в условиях свободной конвекции. Опыты проводились на горизонтальных поверхностях из латуни, меди и алюминия в диапазоне изменения теплового потока 8–200 кВт/м². Все поверхности были отшлифованы одинаковым способом и имели близкие измеренные значения шероховатости. Полученные результаты продемонстрировали за-



Рис. 16. Взаимодействие пузырьков, образующихся при высоких тепловых потоках на полостях разного размера [121].

отрыв одиночного пузырька. Также было изучено взаимодействие пузырей, отделившихся от двух соседних центров, при различных вариациях плотности распределения и размеров полостей (рис. 16).

Моделирование теплообмена при испарении стекающих по горизонтальным рифленным трубам ламинарных пленок жидкости проводилось в известной работе Фудзиты [122]. Расчет теплоотдачи для хладона R11 основан на модели увеличения мениска межфазной поверхности в частично затопленной жидкостью треугольной канавке. В авторской модели учитывается влияние ширины канавки, ее глубины и контактного угла смачивания. Показано, что интенсификация теплообмена зависит от размера канавки: меньшие размеры канавок дают ббльшие коэффициенты теплоотдачи.

В работе Гамбарян–Ройзман, Стефана [123] приводится модельный расчет теплоотдачи, проведенный для ламинарно-волновых пленок хладона R11, стекающих по вертикальной медной пластине с продольными треугольными канавками (ширина канавки – 0.5 мм, угол между гранями – 60°) в режиме испарения. Модель интенсификации теплоотдачи основана на учете двух факторов: доминирующем вкладе увеличения теплоотдачи в области микрослоя жидкости (рис. 17) и гидродинамической неустойчивости пленки, волновое движение которой вызывает периодическое осушение и повторное смачивание отдельных участков стенки очень тонким испаряющимся слоем жидкости.

Проведенный авторами анализ результатов показывает, что расчетные значения коэффициента теплоотдачи для рассмотренной рифленной поверхности превышают значения, рассчитанные по модели Нуссельта для гладкой стенки, до восьми раз. Указанные расчеты сопоставляются

авторами с данными экспериментального исследования Лоренца, Янга [124]. Стоит отметить, что результаты других экспериментальных исследований с использованием близких по геометрии поверхностей [108, 125, 126], как и модель Фудзиты [122], с аналогичной геометрией канавок и рассматриваемой жидкостью (не учитывающая вклада испарения микрослоя), не показывают такого существенного возрастания КТО, описывая увеличение теплоотдачи при испарении на 30–90%. С другой стороны, авторы [75] сообщают об увеличении КТО при испарении R11 в 7–10 раз (на трубе с трехмерной ромбовидной структурой, имеющей близкую к обсуждаемой геометрию

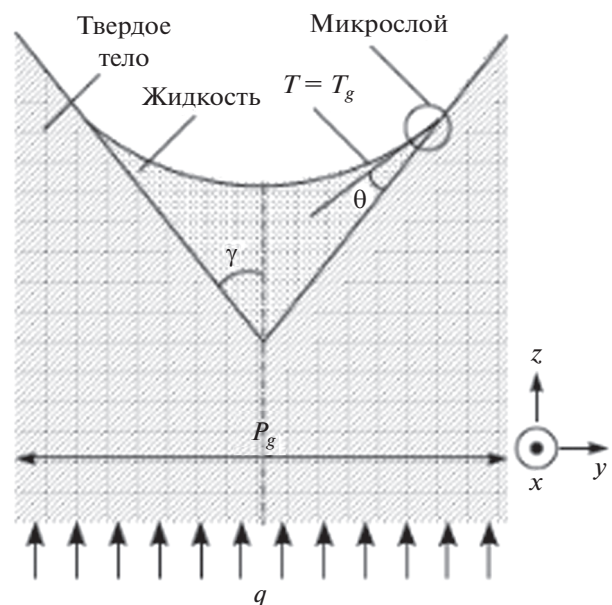


Рис. 17. Геометрия канавки и граничные условия в модели Гамбаряна–Ройзман и Стефана [123].

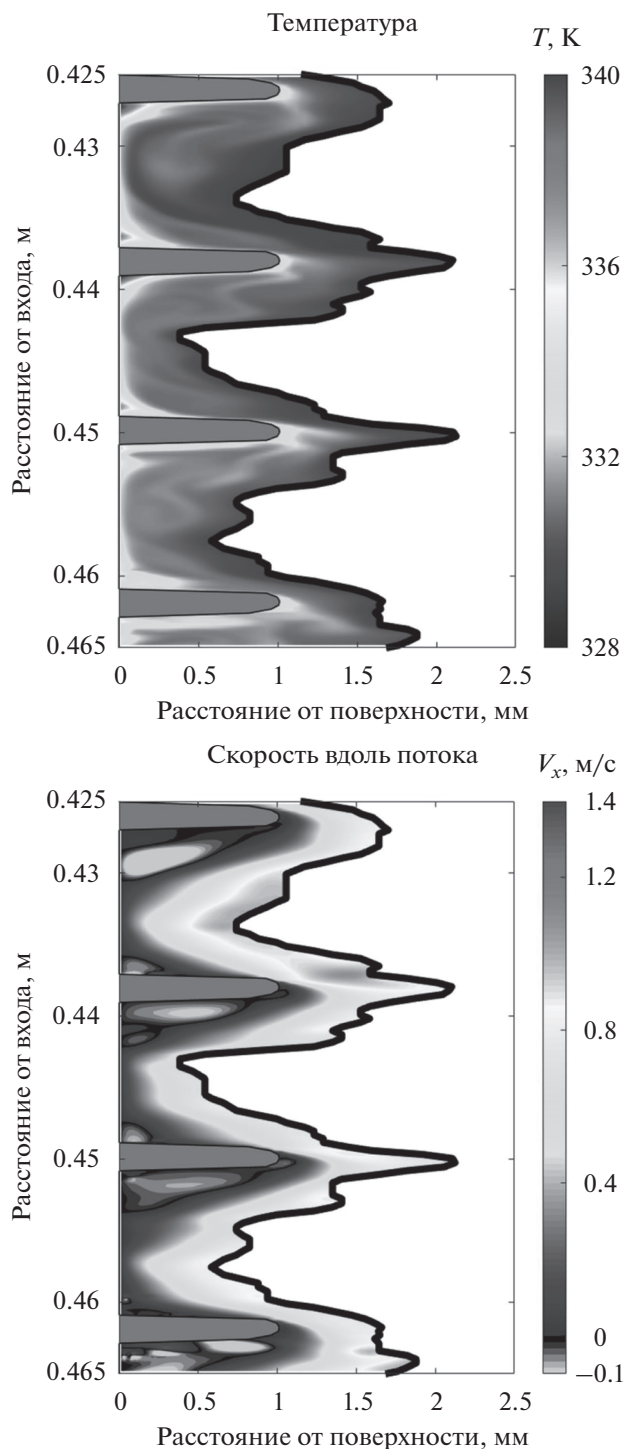


Рис. 18. Зависимости температуры и продольной скорости от длины для оребренной трубы: расход жидкости – 0.471 кг/(м с), $Re = 181$, число Капицы (Ka) = 574, число Прандтля (Pr) = 18 [105].

(полученную, по всей видимости, двойной накаткой оребрения).

В упоминаемой работе Окесьё и др. [105] представлена расчетная модель, связывающая рост

теплоотдачи при испарении пленки на рассматриваемых модифицированных поверхностях с турбулизацией потока в пристенном слое (вплоть до появления областей с возвратным течением жидкости) за перпендикулярными к поверхности вертикальной трубы интенсификаторами (рис. 18). Результаты моделирования хорошо согласуются с авторскими экспериментальными данными (рост коэффициента теплоотдачи при испарении стекающей пленки жидкости в 2.5 раза по сравнению с гладкой трубой), а также коррелируют с данными, приведенными в [84, 89, 106, 127].

В настоящее время в теплотехнической литературе можно найти модели расчета теплообмена при кипении жидкости на гладкой поверхности как в условиях большого объема [128, 129], так и для пленочного течения [86], однако сопоставить полученные опытные данные с расчетными значениями теплоотдачи для случая кипения жидкости на модифицированных поверхностях заданной геометрии будет затруднительно. Существующие модели, помимо обобщающих полуэмпирических корреляций, дающих довольно размытые результаты (например, [68]), в основном отталкиваются от модели Накаямы [118] (см. [119, 120, 130, 131]) и требуют предварительного знания эмпирических характеристик, т.е. являются скорее интерпретационными, чем предиктивными.

Для расчета теплоотдачи при испарении стекающих по гладкой поверхности пленок жидкости также предложено достаточно много полуэмпирических корреляций (см., например, Рибатски, Якоби [38]), отражающих несколько различающиеся подходы. Как правило, это зависимости, имеющие вид $Nu = f(Re, Pr, Ar)$, где Nu – число Нуссельта, Pr – число Прандтля, Ar – число Архимеда. Однако, как и в случае моделирования кипения, в литературе представлено ограниченное количество аналитических и полуэмпирических корреляций или численных моделей (например, [122, 123]) для расчета теплоотдачи при испарении стекающих по модифицированным поверхностям пленок жидкости. Также следует отметить, что предиктивная способность существующих расчетных моделей не всегда подтверждается при сопоставлении с результатами экспериментов.

Говоря об интенсификации критического теплового потока, можно отметить, что наблюдаемый в рассмотренных работах с использованием микроструктурированных поверхностей рост КТП связан в первую очередь с лучшим удержанием жидкости в порах (полостях, каналах) микротекстуры за счет капиллярных сил и вследствие этого более равномерным отводом тепла от стенки (в отдельных случаях эффективно осуществляющимся вплоть до полного испарения жидкости,

см. [84]). Помимо формулы (3), предложенной В.В. Яговым [101] для расчета КТП на поверхностях с сеточными покрытиями, в литературе практически отсутствуют модели развития кризиса для созданных механическими способами мини/мезо/микро-модифицированных поверхностей. Корреляции, предложенные либо адаптированные различными авторами для расчета значений КТП на микро- и наноструктурированных поверхностях (не рассматривающихся в данном разделе), приведены в [45, 46].

На основе результатов рассмотренных выше исследований с применением интенсифицирующих поверхностей кипения и испарения, полученных механическими методами обработки, можно заключить:

- Максимальные КТО при кипении в большом объеме и в стекающих пленках жидкости с увеличением до 9–12 раз [63, 70] получены при использовании поверхностей с полужакрытыми полостями (Thermoexel-E – одна из наиболее эффективных поверхностей кипения). Применение многослойных сеточных покрытий дает возможность увеличить теплоотдачу до 7–8 раз [97, 98]. Использование поверхностей, полученных весьма перспективным методом деформирующего резания, на данный момент демонстрирует возможность достижения 4–6-кратного увеличения теплоотдачи в режиме кипения [81, 82, 84].

- КТО при испарении стекающих пленок жидкости, как правило, может быть увеличен в 2–2.5 раза по сравнению с результатами для гладкой поверхности (за счет нанесения продольных канавок [125, 126] или применения сеточных [89, 106, 127] и проволочных покрытий [105]). Отдельные экспериментальные [75], а также расчетные работы, учитывающие вклад испарения микро-слоя [123], сообщают о возможности десятикратной интенсификации теплоотдачи при испарении стекающих пленок жидкости.

- В работах [81, 82, 84, 98] и др. сообщается о возможности увеличения КТП при кипении в большом объеме или в стекающих пленках жидкости в 3–6 раз (в том числе на поверхностях, полученных методом деформирующего резания или с помощью сеточных покрытий).

- На данный момент существует ограниченное число моделей и корреляций для расчета коэффициентов теплоотдачи при кипении и испарении жидкостей на модифицированных механическими методами обработки поверхностях. Их точность при описании опытных данных зачастую не является удовлетворительной в силу слишком общего характера корреляций или недостаточной проработанности расчетных моделей, описывающих развитие процессов на тепловыделяющих поверхностях конкретной геометрии.

Рассмотренные результаты по интенсификации кипения и испарения на модифицированных с помощью механических методов обработки поверхностях обобщены в сводной табл. 2.

2. ТЕПЛООБМЕН НА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ОБРАБОТКИ

В разделе рассматриваются современные исследования, проведенные на перспективных интенсифицирующих поверхностях кипения (как правило, созданных с помощью комбинированных методов, включая наномодификацию поверхности), дающих возможность управлять сложной совокупностью процессов, происходящих при пузырьковом кипении (микроконвекцией, подводом жидкости и эвакуацией пара, воздействием на форму межфазной поверхности и т.д.)⁵. За последние годы было опубликовано заметное число несомненно актуальных обзоров и монографий, рассматривающих тему интенсификации кипения на микро- и наномодифицированных поверхностях [40, 43–46, 48, 50, 133, 134]. Задачей данной части обзора является краткое представление как передовых российских исследований, зачастую недостаточно освещенных в литературе, так и некоторых наиболее весомых с точки зрения полученных результатов зарубежных работ, очерчивающее перспективы будущего направления исследований по интенсификации теплообмена.

2.1. Комбинированные методы макро/мезо/микро- и наномодификации поверхности. В работе Джайкумара, Кандликара [3], авторы которой использовали комбинирование методов микро- и наномодификации для создания трех типов отличающихся по реализующимся на них механизмам теплообмена покрытий, применялась обработка поверхности на станке с ЧПУ для нанесения микрооребрения и процессы печати либо спекания – для получения пористого слоя. Сообщается о весьма впечатляющем результате по интенсификации теплоотдачи при кипении воды в большом объеме (вплоть до 4361%) и увеличении КТП (на 228%) в сравнении с гладкой поверхностью для микрооребренной поверхности с пористым покрытием внутренней поверхности прямоугольных микроканалов шириной 300 мкм (рис. 19). Полученное авторами значение теплоотдачи

⁵ Принятое в обзоре разделение на простые и сложные методы обработки (и соответствующие им типы поверхностей) несколько условно. Например, поверхности с полужакрытыми порами, полученные методом МДР, как и многослойные градиентные сеточные покрытия, рассмотренные ранее, оказывают существенное влияние на процесс пузырькового кипения на микромасштабе.

Таблица 2. Результаты исследований по интенсификации теплообмена при кипении и испарении жидкостей на поверхностях, полученных механическими способами обработки

Работы (по годам)	Структура поверхности	Условия эксперимента	Рабочая жидкость	Интенсификация
Kang, 2000 [113]	Наношероховатость, полученная шлифовкой (61 нм)	Большой объем, кипение при атмосфер- ном давлении в условиях насыщения	Вода	КТО до 100%
Kim, Choi, 2001 [73]	Поверхности с полузакрытыми микрополостями	Кипение в большом объеме при температурах насыщения 4.5 и 26.8°C	R11, R123 и R134a	КТО в 6.5 раз (R11), 6 раз (R123) и 5 раз (R-134a)
Liu, Yi, 2001 [74]	Низкорребристая труба и труба с трехмерной текстурой	Пучки труб, атмосферное давление	R11	КТО (испарение) в 7–10 раз
Liu, Yi, 2002 [75]	Низкорребристая труба и труба с трехмерной текстурой	Пучки труб, атм. давле- ние, недогрев 0.3–0.2 К, $q = 1–50 \text{ Вт/см}^2$	Вода, водно- солевые смеси	КТО до 3 раз
Jung et al., 2004 [63]	Низкорребристая труба, коммерческие трубы Turbo-B и Thermoexcel-E	Большой объем, температура насыщения 7°C, $q = 1–8 \text{ Вт/см}^2$	HCFC22, HFC134a, HFC125, HFC32	КТО в диапазонах 1.09–1.68, 1.77–5.41 и 1.64–8.77 раз (для указанных труб при использовании разных жидкостей)
Salvagnini, Takueda, 2004 [99]	Прямоугольная сетка, диаметр проволоки – 0.25 мм	Испарение стекающей со спутным потоком газа пленки жидкости	Вода	Интенсивность испарения пленки увеличивается до 3 раз
Gerlach, Joshi, 2005 [100]	Проволочные покрытия из меди и бронзы: 8 × 8 проволочек/см ² (406 мкм диаметром), 20 шт./см (229 мкм), 59 шт./см (66 мкм)	Кипение в большом объеме (на медной площадке 0.9 × 0.9 см ²)	PF5060	КТО до 4 раз для покрытия, содержащего 20 проволок/см
Franco et al., 2006 [101]	Сеточные покрытия с варьированием материала и диаметра проволоки, размера ячеек и количества слоев	Кипение в условиях большого объема при атмосферном давлении	R141b	КТО (при низких q) более 100%, КТП до 40%
Zaitsev et al., 2007 [109]	Продольные микроканавки	Пленочное течение, недогрев	Вода	КТП до 100%
Lozano Aviles, 2007 [108]	Продольные микроканавки	Испарение в пленках бинарной смеси	Вода– этиленгликоль	КТО до 60%
Jones et al., 2009 [112]	Микрошероховатые поверхности, $R_a = 1.08–10.0 \text{ мкм}$	Кипение в большом объеме	FC-77, вода	КТО на 210% (FC-77), КТО на 100% (вода)
Chien, Tsai, 2011 [96]	Оребренная труба с высотой ребер 0.4 мм (60 ребер/дюйм), труба с сеточным покрытием поверх микрооребрения	Пленочное течение и б. о. при температурах насыщения 5 и 20°C, $q: 0.45–4.85 \text{ Вт/см}^2$.	R-245fa	КТО на комбини- рованном покрытии до 4 и 7 раз (для 5 и 20°C, соответственно)

Таблица 2. Окончание

Работы (по годам)	Структура поверхности	Условия эксперимента	Рабочая жидкость	Интенсификация
Li et al., 2011 [67]	Turbo-SAB (19 штырьков/дюйм и 26 шт./дюйм) и Korodense	Испарение в условиях вакуума, пучок из 6 труб, $Re_{пл} = 10-110$	Вода	Наилучшие резуль- таты показала труба Korodense
Christians, Thome, 2012 [64]	Turbo-B5, Gewa-B5	Пленочное течение ($Re_{пл} = 0-3000$) и большой объем	R-134a и R-236fa	КТО в стекающих пленках до 2 раз по сравнению с большим объемом
Chen, 2013 [66]	Неидентифицирован- ная труба кипения с микротекстурой снаружи и оребрением внутри	Свободная конвекция при температуре насыщения 4.4, 11.1 и 17.8°C	R123	КТО в 6–10 раз
Rocha et al., 2013 [110]	Микрооребрение	Большой объем, диапазон давлений: 6.1–12.2 бар	R134a	Незначительная интенсификация КТО в области малых q
Pecherkin et al., 2015 [127]	Микрооребрение, ромбовидная поверхность, сеточные покрытия	Стекающие по вертикаль- ным цилиндрам пленки жидкости, условия насыщения, 2 бар	Смесь R114/R21	КТО (испарение) – до 2 раз (сетки), КТП до 2 раз (ромбовидная поверхность, сетки)
Dąbek et al., 2016 [97]	Многослойные тонкие металлические сетки (1–4 слоя)	Кипение в условиях большого объема при атмосферном давлении	Спирт	КТО до 8 раз
Shchelchikov et al., 2016 [81]	Двух- и трехмерные МДР-поверхности	Кипение в условиях большого объема при атмосферном давлении, $q = 1-350 \text{ Вт/см}^2$	Вода	КТО до 6 раз, КТП до 6 раз
Антаненкова и др., 2016 [83]	Трубы, обработанные МДР	ТНУ авторской разработки, вынужденное течение жидкости	R22	КТО в 3–5 раз
Åkesjö et al., 2019 [105]	Поперечные макроин- тенсификаторы	Пленочное течение жидкости по вертикаль- ной трубе с поперечными интенсификаторами	Водные смеси с молочным порошком	КТО до 2.5 раз (испарение)
Volodin et al., 2020 [84]	Поверхности с полужакрытыми микрополостями (МДР)	Пленочное течение жидкости в условиях насыщения, 2 бар, q до 7 Вт/см ²	Смесь хладо- нов R114/R21	КТО (кипение) до 4 раз, КТП до 3 раз
Volodin et al., 2020 [84]	Микроштырьковые поверхности (МДР)	Пленочное течение жидкости в условиях насыщения, 2 бар, q до 7 Вт/см ²	Смесь хладо- нов R114/R21	КТО (испарение) до 2 раз, КТП до 2 раз
Zhang et al., 2020 [98]	Многослойные медные сеточные покрытия с градиентной пористостью	Кипение в большом объеме, условия насыщения	Вода	Для сетки из 6 слоев (3 + 3): КТО до 6.6 раз (261 кВт/м ² К), КТП до 3 раз (271.9 Вт/см ²)

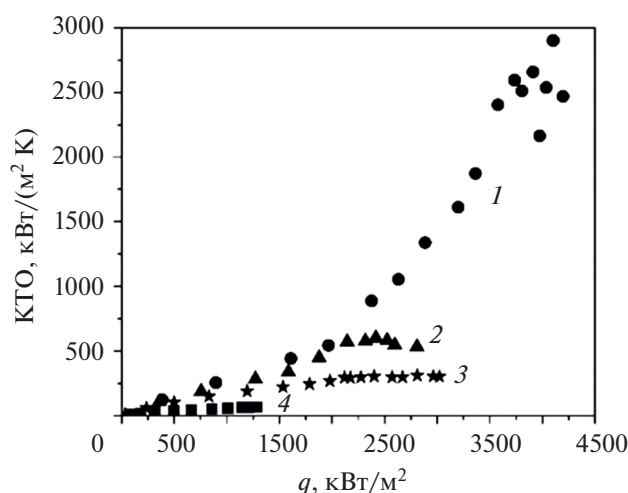


Рис. 19. Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока для различных комбинационных микро/наноструктурированных покрытий [3]: 1 — 300 мкм, 2 — 500, 3 — 762, 4 — гладкий образец.

2.9 МВт/м²К является максимальным из имеющихся в литературе для случая кипения воды в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении. Механизм полученной интенсификации связывается авторами с разделением путей движения пара и жидкости в процессе пузырькового кипения на разработанных комбинационных поверхностях (см. рис. 20). Для достижения полученных значительных результатов, по-видимому, важен точный выбор геометрических характеристик открытых микроканалов (в зависимости от свойств рабочей жидкости), а также области нанесения нанопокрyтия. На данный момент нами не обнаружено публикаций, повторяющих или содержащих сопоставимые с данными [3] результаты по интенсификации теплоотдачи (рис. 19).

В более раннем исследовании тех же авторов [135] также были получены заметные, хотя и гораздо более умеренные, чем в [3], значения интенсификации теплоотдачи — до 6.5 раз и КТП до 2.4 раз по сравнению с гладкой поверхностью при кипении воды в большом объеме на трех типах

комбинированных поверхностей, близких по геометрии к покрытиям, описанным в [3], но отличающихся геометрическими характеристиками микроканалов. В работе [136] Джайкумаром и Кандликармом исследовалась интенсификация теплообмена при кипении FC72 в большом объеме на схожих по геометрии с описанными в [3, 135] комбинационных поверхностях, но с нанесением пористого покрытия только на внешнюю часть поверхности прямоугольных микроканалов, в результате чего было получено увеличение КТП на 270%.

Авторы [137, 138], комбинируя мезооробрение с пористым покрытием либо осажденным слоем наночастиц серебра, также получили заметные результаты по интенсификации теплоотдачи и КТП. Бай и др. [139] сообщают о рекордном значении КТП, полученном при кипении воды на оребренной медной поверхности, покрытой микропористой медной пластиной толщиной 2 мм. Применение данного типа покрытия также позволило разделить пути движения жидкости и пара, что дало возможность достичь значения КТП 610 Вт/см².

Кимом и др. [140] приведены результаты исследования по интенсификации КТП с применением комбинационного микро/наноструктурированного покрытия — однослойной тонкопроволочной сетки с полученной электрохимическим травлением пористой наноструктурой поверхности. Результаты экспериментов по кипению воды в условиях большого объема показали умеренный рост КТП вплоть до 84% по сравнению с гладкой поверхностью. Исследования динамики распространения межфазной границы продемонстрировали, что наличие проволочной сетки и гидрофильный характер ее структуры способствуют удерживанию жидкости внутри данного типа покрытия, препятствуя распространению сухих пятен, а также способствует более эффективному отводу тепла от стенки. Авторы полагают, что применение таких покрытий позволит уменьшить происходящие со временем изменения теплофизических и химических свойств теплообменных поверхностей (процессы деградации) и



Рис. 20. Механизмы двухфазного теплообмена на различных типах комбинационных микро/наноструктурированных покрытий [3].

считают данные покрытия перспективными для использования в некоторых видах теплообменников.

В работе Шустова и др. [141] приведены результаты исследования кипения воды в микроканале (высотой 0.2 мм, шириной 3 мм и длиной 13.7 мм) с прозрачной верхней стенкой как с гладкой поверхностью нагрева, так и с покрытием из наночастиц оксида алюминия. Обнаружено, что кризис теплоотдачи в микроканале с покрытием из наночастиц возникает при существенно более высокой тепловой нагрузке, чем в канале без покрытия. Показан рост теплоотдачи для модифицированного покрытия в области переходного кипения.

2.2. Пористые покрытия, микродуговое оксидирование и лазерное спекание. Кузма-Кичтой и др. [142] представлены результаты исследования интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом. Для получения нанорельефа на опытном участке авторами использовались наножи́дкости на основе частиц карбида кремния и оксида алюминия. В результате получалась структура, которую можно охарактеризовать как пористое покрытие. Эксперименты проводились при атмосферном давлении в большом объеме. Показано, что использование поверхности с микро- и нанорельефом позволяет заметно повысить критическую тепловую нагрузку и коэффициент теплоотдачи при кипении благодаря изменению смачиваемости поверхности.

Результаты исследования по интенсификации кипения хладона R21 на трубках с трехмерным капиллярно-пористым покрытием приведены Суртаевым и др. в работе [143]. Авторами продемонстрирована возможность более чем двухкратного увеличения теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью на покрытиях толщиной 500 мкм. В [144] той же группой авторов исследовались интенсифицирующие свойства новых иерархических пористых структур: данные покрытия были получены с помощью модифицированной технологии плазменного напыления и имели различную толщину, морфологию и степень пористости. Максимальные значения интенсификации теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью — до четырех раз при кипении жидкого азота и до 3.5 раз при кипении воды получены на пористых покрытиях толщиной более 800 мкм в области низких тепловых потоков (рис. 21). Основным механизмом интенсификации теплообмена для пористых покрытий в случае кипения азота связывается авторами с увеличением вклада в теплоотдачу доли тепла, отводимого при интенсивном испарении многочисленных жидких менисков, формирующихся в каналах пористого покрытия в процессе роста и отделения

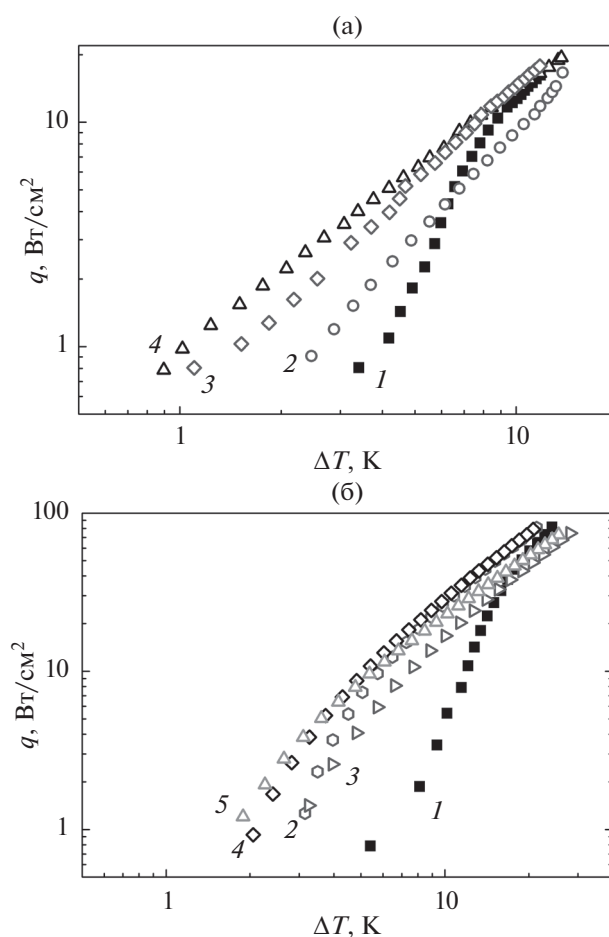


Рис. 21. Кривые кипения для образцов с пористыми покрытиями, имеющими различные характеристики [144] (указана толщина пористого слоя): (а) — азот: 1 — без покрытия, 2 — 400 мкм, 3 — 800, 4 — 1390; (б) — вода: 1 — без покрытия, 2 — 500 мкм, 3 — 540, 4 — 800, 5 — 1390.

крупномасштабных паровых конгломератов. В то же время в случае кипения воды интенсификация теплоотдачи связывается с наблюдаемым значительным ростом плотности центров зародышеобразования.

Васильевым и др. [145] выполнено исследование характеристик процесса и теплоотдачи при кипении воды, недогретой до температуры насыщения, на мезоструктурированных поверхностях, полученных методом микродугового оксидирования (МДО) титановой фольги с образованием слоя оксида титана и осаждением частиц оксида алюминия из кипящей наножи́дкости. Опыты проведены при вынужденном течении воды в вертикальном прямоугольном канале 21×5 мм. Плотность теплового потока изменялась в диапазоне 70–500 Вт/см². Измерено число действующих центров парообразования $(70\text{--}80) \times 10^5 \text{ л}/(\text{м}^2 \text{ с})$ при изменении теплового потока в диапазоне

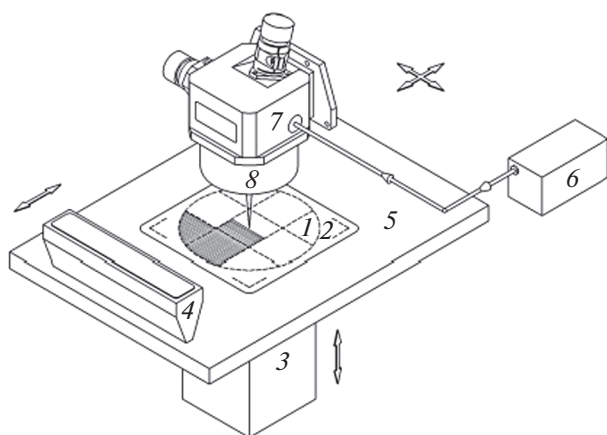


Рис. 22. Схема системы аддитивного формирования пористых покрытий с 2D- и 3D-модуляцией на плоских подложках: 1 – подложка, 2 – рабочая платформа, 3 – привод вертикального перемещения, 4 – блок подачи и разравнивания, 5 – стол, 6 – лазер, 7 – сканирующая гальванометрическая головка, 8 – объект [146].

150–200 Вт/см². Применение покрытия, образованного методом МДО оксидирования, интенсифицировало теплоотдачу на 20–30%. В условиях высоких недогревов жидкости до температуры насыщения тепловые потоки на гладкой поверхности и поверхностях с покрытием оказались достаточно близкими.

В работе Бессмельцева и соавторов [146] предложен метод селективного послойного лазерного спекания металлических порошков для нанесения капиллярно-пористых покрытий заданной пористости на тепловыделяющую поверхность (рис. 22). Реализация предложенного метода интенсификации кипения позволяет широко варьировать основные параметры и внешнюю форму получаемых трехмерных капиллярно-пористых покрытий, давая возможность создавать гибридные структуры. Авторами продемонстрировано, что применение данной технологии может увеличить теплоотдачу при кипении на полученных модифицированных поверхностях в несколько раз по сравнению с гладкой поверхностью.

В настоящем обзоре практически не рассматриваются многочисленные исследования с использованием различных методов наноструктурирования поверхности вне комбинирования с другими видами структурирования. Подробные обзоры современных исследований с использованием микро- и наномодифицированных поверхностей для интенсификации теплообмена проведены, например, в работах Суртаева, Сердюкова, Павленко [48] и Дедова [133]. Кратко приведем основные выводы, сделанные авторами [48]:

- В большинстве исследований показано, что основное влияние на теплообмен и кризисные

явления оказывает осаждение наночастиц на поверхность нагревателя в процессе кипения наножидкости, причем формирование такого покрытия в основном оказывает негативное влияние на интенсивность теплоотдачи.

- КТП растет с повышением концентрации осажденных частиц вплоть до предельного значения концентрации, после чего дальнейшего увеличения КТП не наблюдается.

- Увеличение КТП связано не только с уменьшением контактного угла смачивания, но и с дополнительным влиянием капиллярного увлажнения, способствующих более эффективному замыванию несмоченных зон в предкризисных режимах.

К приведенным выше выводам [48], основываясь на обзоре [133] и других современных работах (например, [147]), можно добавить, что, хотя применение нанопокровов и дает возможность в отдельных специфических условиях получить увеличение КТО и КТП в три раза и более по сравнению с гладкой поверхностью, использование наножидкостей/наноструктурирования поверхности для увеличения КТО и КТП без комбинирования с другими методами обработки (т.е. нанесение нанопокровов на гладкие поверхности), по-видимому, не является перспективным. Также остается актуальной проблема недолговечности данных покрытий (хотя следует отметить, что в настоящее время активно развиваются методики увеличения адгезии и стойкости нанопокровов). Значения увеличения КТО и КТП, реализуемые в процессе кипения наножидкости/применения нанопокровов, зачастую могут быть достигнуты с использованием более простых методов: МДО, МДР, создания микрошероховатости и т.д. То же касается и пористых покрытий. Некоторыми исследователями отмечалось [108], что интенсификация теплоотдачи, достигаемая с применением пористых покрытий, также может быть получена или превышена за счет использования поверхностей, создаваемых с помощью более доступных методов, например, применения сеточных покрытий [97, 98].

Таким образом, можно заключить, что, несмотря на перспективные результаты, полученные на поверхностях, созданных с применением различных современных методов наномодификации в комбинации с хорошо известными методами микро/мини/мезомодификации поверхности [3, 135–138], на данный момент преждевременно прекращать “классические” исследования по интенсификации теплообмена с применением микро/мезо/макромодифицированных поверхностей (т.е. поверхностей с порядком характерных размеров текстуры от ~1 мкм до ~1000 мкм), которые, демонстрируя достаточно высокие значения коэффициентов теплоотдачи, в то же время

гораздо более стойки к процессам деградации, менее чувствительны к загрязнению, более просты в получении и т.д.

2.3. Влияние смачиваемости поверхности на теплоотдачу. Еще одним методом интенсификации, активно развивающимся в настоящее время, является воздействие на смачиваемость поверхности. Первые эксперименты с использованием поверхностей со смешанной смачиваемостью были проведены еще в 1960-х авторами работ [148, 149], которые показали эффективность данного подхода для интенсификации теплоотдачи. В частности, в работе Янга, Хаммела (1964 г.) показано, что на покрытой точечными пятнами смолы поверхности кипение происходит заметно интенсивнее и начинается при меньших температурных напорах, чем на поверхности без покрытия [148].

В цикле работ Такаги и соавторов [150–153] изучалось влияние смачиваемости на смешанных гидрофобно-гидрофильных (бифильных) поверхностях. Например, в [153] проводились эксперименты по интенсификации теплоотдачи при кипении в большом объеме на бифильных поверхностях, когда гидрофобные участки миллиметровых размеров наносились на гидрофильное покрытие в шахматном порядке либо произвольным образом. Показано, что гидрофильность поверхности способствует увеличению КТП, но снижает коэффициент теплоотдачи при кипении. Наличие гидрофобных зон, напротив, способствует увеличению коэффициента теплоотдачи при кипении, но снижает КТП. К подобным выводам приходят и авторы [154], которые проводили эксперименты на зеркально гладких поверхностях (т.е. поверхностях наноразмерной шероховатости) со смешанной смачиваемостью с целью избежать воздействия шероховатости и выявить влияние исключительно смачиваемости.

Анализ исследований по влиянию краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении проводился в работе Гогонина [155]. Автором показано, что изменение условий смачивания охлаждаемой стенки кипящей жидкостью (как правило, за счет формирования на гидрофильной поверхности гидрофобных зон) может приводить к существенному снижению температурных напоров начала закипания, увеличению теплоотдачи в режиме кипения, но вместе с тем может понижать КТП. На интенсификацию теплоотдачи может влиять как толщина пленки гидрофобного покрытия, так и распределение данного покрытия по площади тепловыделяющей поверхности. Физические причины, приводящие к снижению температурного напора начала закипания при изменении условий смачивания, согласно автору, однозначно не определены. Хотя здесь можно привести тот известный известный факт, что за-

родышеобразование происходит преимущественно на гидрофобных участках, в частности благодаря более высокой концентрации воздуха, захваченного порами (субмикронных размеров) гидрофобных поверхностей.

В работе [156] исследовались шесть типов поверхностей со смешанной смачиваемостью: на гладкие медные образцы осаждались частицы никеля или политетрафторэтилена. Контактный угол смачивания для воды для полученных гидрофобных покрытий составил более 150° . Авторами показано, что поверхности со смешанной смачиваемостью заметно эффективнее по теплоотдаче, чем эталонная гладкая поверхность, причем теплоотдача растет с увеличением плотности распределения пятен гидрофобного покрытия. Наилучшие показатели по теплоотдаче получены при субатмосферных давлениях.

Сурото и др. [157] в экспериментах с недогретой до температуры насыщения водой показали, что гидрофильная поверхность демонстрирует самые низкие значения теплоотдачи при кипении по сравнению с супергидрофильной и гидрофобной поверхностями. Теплоотдача гидрофобной поверхности оказывается выше в области малых тепловых потоков, однако при больших тепловых потоках ее величина снижается. Супергидрофильная поверхность оказывается эффективнее в области от промежуточных до высоких значений теплового потока по сравнению с гидрофильной и гидрофобной поверхностями.

Суртаевым и соавторами [158] с помощью высокоскоростной видео- и термографической съемки исследовалось влияние слабогидрофильных покрытий на эволюцию динамики паровых пузырей и интенсивность теплообмена при кипении воды в условиях атмосферного давления. В области малых тепловых потоков получена значительная интенсификация теплоотдачи (до трех раз) при кипении на гидрофобном покрытии по сравнению с гладкой сапфировой подложкой. Показано, что при кипении на гидрофобных поверхностях наблюдается два типа паровых пузырей (“L” – от “large”, “S” – от “small”), значительно отличающихся размерами и поведением, рис. 23.

Исследование влияния шероховатости гидрофобных покрытий на теплоотдачу и КТП при кипении воды в условиях большого объема при атмосферном давлении проводилось также Кимом и соавторами [159]. Использовались медные поверхности, покрытые гидрофобной пленкой фторопласта, с последующим нанесением направленной и ненаправленной шероховатости механической шлифовкой. Величина R_a изменялась в диапазоне 0.042–1.54 мкм, что соответствовало изменению контактного угла смачивания от 116° до 153° . Показано, что значения КТП для гидрофобных поверхностей гораздо ниже, чем для гид-

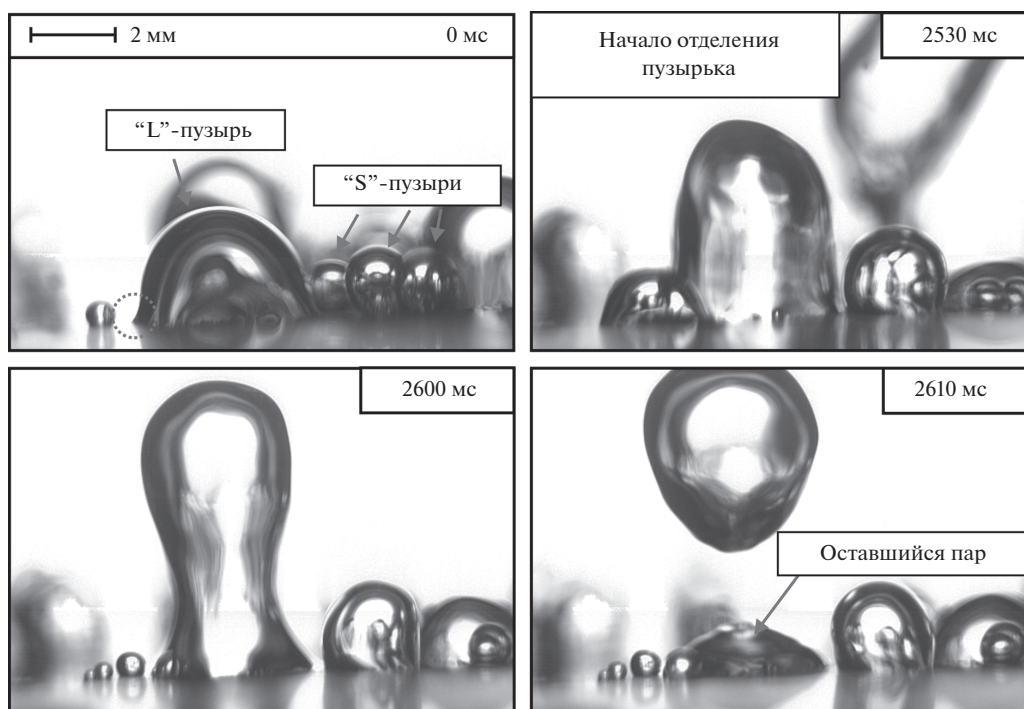


Рис. 23. Фрагменты высокоскоростной видеосъемки при кипении воды на гидрофобном фторопластовом покрытии ($q = 1.1 \text{ Вт/см}^2$) [158].

рофильных. Наиболее гладкая поверхность с $R_a = 0.042 \text{ мкм}$ (что соответствовало контактному углу в 116°) показала максимальное значение КТП, равное 6.74 Вт/см^2 , что примерно в 16 раз ниже характерного значения КТП (110 Вт/см^2) для гидрофильной поверхности. В работе предложена эмпирическая корреляция для расчета КТП гидрофобных поверхностей, с точностью в 12% описывающая полученные опытные данные при варьировании контактного угла смачивания в диапазоне $108^\circ\text{--}153^\circ$. Для кипения воды в условиях свободной конвекции авторами построена карта КТП, включающая данные для гидрофобных и гидрофильных поверхностей и обеспечивающая подробное описание поведения КТП в зависимости от шероховатости и условий смачиваемости поверхности.

Любопытное исследование по влиянию на интенсификацию кипения структурированных поверхностей, объединяющее оптимизацию размера пор поверхности и изменение смачиваемости с использованием метода осаждения для создания бипористых медных покрытий, проводилось Ваном и др. [160]. В работе показано, что увеличение размера дендритов (отростков) пористого покрытия оказывает влияние на смачиваемость (рис. 24). Также отмечено, что исследуемые бипористые покрытия демонстрировали снижение энергии межфазного взаимодействия (что может интенсифицировать процесс отрыва паровых пузырей в процессе кипения). На образце с толщи-

ной пористого покрытия 170 мкм получена максимальная интенсификация теплообмена (КТО в 4.8 раз больше, чем КТО гладкой медной поверхности), кризис пузырькового кипения наступал при довольно высоком значении коэффициента теплоотдачи — $300 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$.

В расчетной работе Моисеева и др. [161] представлена попытка моделирования влияния смачиваемости поверхности на интенсивность теплообмена и КТП при кипении жидкости с применением гибридной модели, основанной на использовании метода решеточных уравнений Больцмана и уравнения теплопроводности. В частности, авторами показано, что при низких тепловых потоках наблюдается рост интенсивности теплообмена с увеличением контактного угла смачивания (т.е. гидрофобности покрытия), в то время как в области высоких тепловых потоков интенсивность теплообмена оказывается выше для поверхностей с меньшими контактными углами. КТП сильно зависит от условий смачивания: продемонстрировано снижение КТП в три раза при увеличении контактного угла смачивания от 67° до 110° . Предложенная авторами модель требует дальнейшей доработки, однако уже сейчас дает возможность воспроизвести основные черты развития пузырькового кипения, моделируя динамику процесса от возникновения паровых пузырей до их отрыва (включая переход от пузырькового кипения к пленочному) на поверхностях различной смачиваемости (рис. 25).

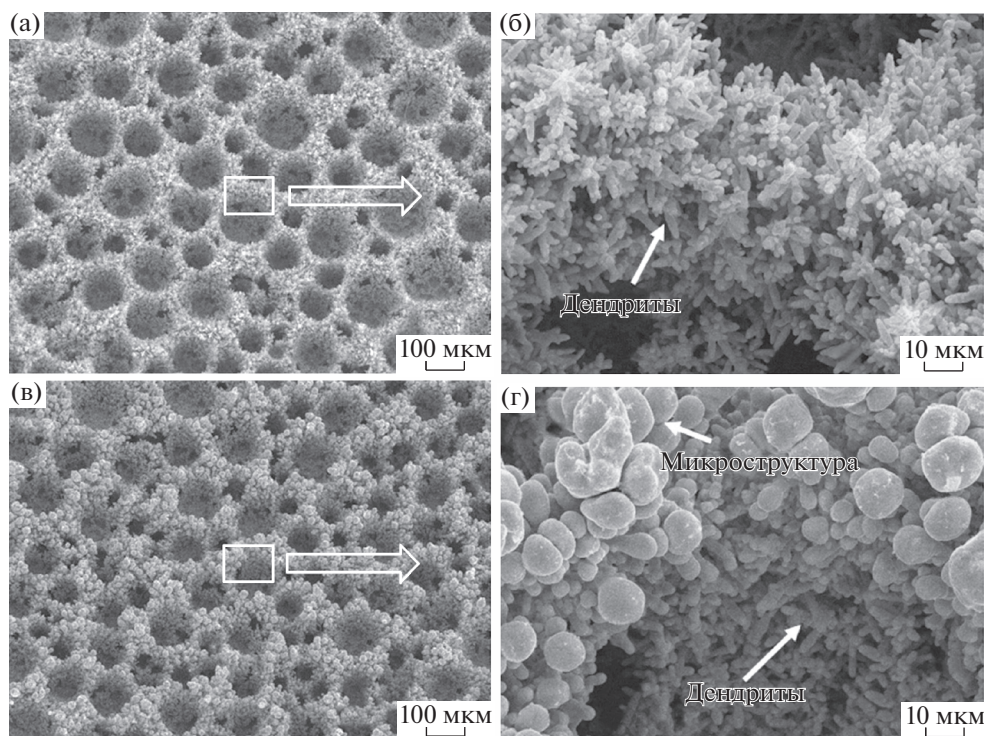


Рис. 24. Фотоснимки (СЭМ) бипористых медных поверхностей [160]: (а) — первый образец, (б) — его увеличенное изображение, (в) — второй образец, (г) — его увеличенное изображение.

Перспективные результаты по поиску оптимальных структур бифильных покрытий получены в современных работах [162–166]. Бец и др. [162] продемонстрировали, что бифильные поверхности могут одновременно интенсифицировать и КТО, и КТП. В своей последующей работе с использованием супербифильных поверхностей [163] авторы показали, что данные поверхности позволяют получать достаточно высокие значения КТП (более 100 Вт/см^2) наряду с весьма высокими КТО — более $100 \text{ кВт/(м}^2 \text{ К)}$.

Авторы [164] использовали постоянный шаг в 1 мм между гидрофобными пятнами разного диаметра (угол смачивания — 165°), нанесенными на гидрофильное покрытие (угол смачивания — 20°). Для оценки влияния гетерогенной смачиваемости на теплообмен при кипении были протестированы десять бифильных поверхностей с долей площади гидрофобного покрытия по отношению к общей площади (A^*) от 0.19% до 95%. Показано, что величина A^* сильно влияет на динамику парообразования и интенсификацию теплоотдачи: значения КТО и КТП увеличиваются с ростом A^* вплоть до 38.46%. Покрытие № 6 с данной величиной A^* , диаметром гидрофобных пятен 700 мкм и расстоянием между пятнами 300 мкм оказалось наиболее эффективным по теплоотдаче (рис. 26). Это связано с тем, что на покрытиях с $A^* > 38.46\%$ наблюдается более раннее слияние рождающихся на гидрофобных участках пузырьков, что в итоге приводит к образованию паровой прослойки

(развитию кризиса) при меньших температурах перегрева стенки. Также авторы [164] отмечают, что на наиболее эффективном покрытии № 6 наблюдалась наибольшая частота зародышеобразования при наименьших диаметрах пузырей, КТП достиг 197 Вт/см^2 (немного превысив значение в 190 Вт/см^2 , полученное ранее в [162]).

Авторы схожего по постановке исследования [165] варьировали диаметр и шаг пятен супергидрофобного покрытия (угол смачивания — 165°) на супергидрофильной основе (угол смачивания $< 1^\circ$). Результаты подтвердили, что сильный контраст свойств смачиваемости интенсифицирует теплоотдачу на бифильных покрытиях. Авторы считают, что для оптимальных результатов по интенсификации шаг между пятнами гидрофобного покрытия по размеру должен примерно соответствовать отрывному диаметру пузыря. Оптимальный шаг обеспечит высокую плотность центров зародышеобразования и в то же время не будет препятствовать активации соседних центров. В данной работе оптимальной оказалась доля площади супергидрофобных пятен 23% на покрытии с шагом между пятнами 1 мм и диаметром пятен 0.5 мм. Максимальные значения интенсификации на этом покрытии относительно необработанной поверхности составили 38% для КТО и 83% для КТП.

В работе Ямады и соавторов [166], перекликающейся с вышеупомянутой работой [156], продемонстрировано, что бифильные поверхности высокоэффективны при субатмосферных давлениях,

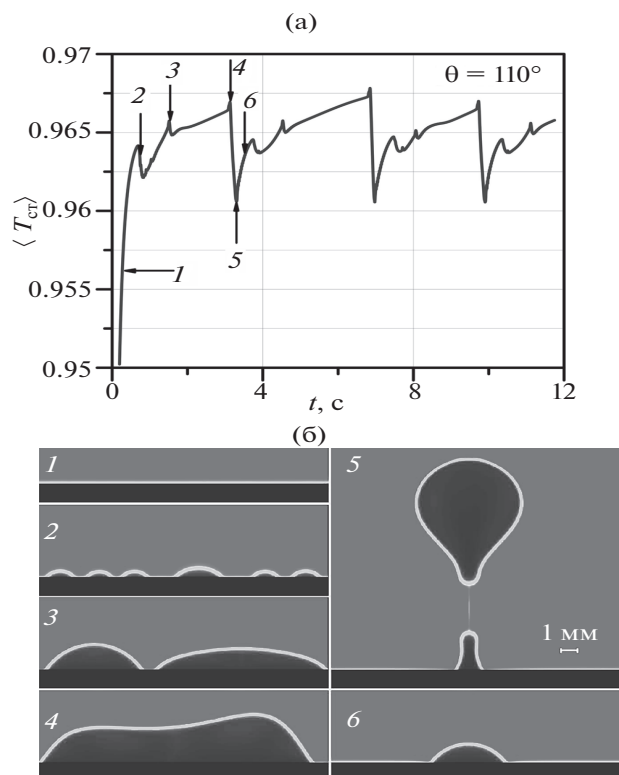


Рис. 25. (а) — зависимость температуры поверхности стенки от времени при $T_{ст} = 0.07 T_{кр}$ и $\theta = 110^\circ$, (б) — изолинии плотности, иллюстрирующие развитие процесса кипения [161].

в том числе показывают себя более эффективными, чем наноструктурированные покрытия [167, 168]. Авторами варьировался шаг и размер пятен гидрофобного покрытия (Ni-TFEO, угол смачивания — 140°), нанесенного на медную подложку. Давление изменялось от атмосферного вплоть до 6.9 кПа. Показано, что при $p = 14.0$ кПа температурный напор закипания может быть уменьшен на 12 К по сравнению с зеркально гладкой медной поверхностью. Бифильное покрытие с наименьшими шагом (1.5 мм) и диаметром (0.5 мм) гидрофобных пятен оставалось эффективным вплоть до давления $p = 14.0$ кПа. Интенсификация теплоотдачи по сравнению с гладкой поверхностью превышала 200% во всем диапазоне изменения теплового потока, достигая пикового значения в 270% при $q = 86.1$ кВт/м². Переход к малоэффективному режиму прерывистого кипения на бифильных поверхностях наблюдался лишь при наименьших значениях давления.

На основе результатов рассмотренных исследований по интенсификации теплообмена с использованием перспективных поверхностей кипения можно заключить следующее:

■ Применение поверхностей, полученных комбинированием методов микро- и наномодификации, согласно авторам [3], позволяет до-

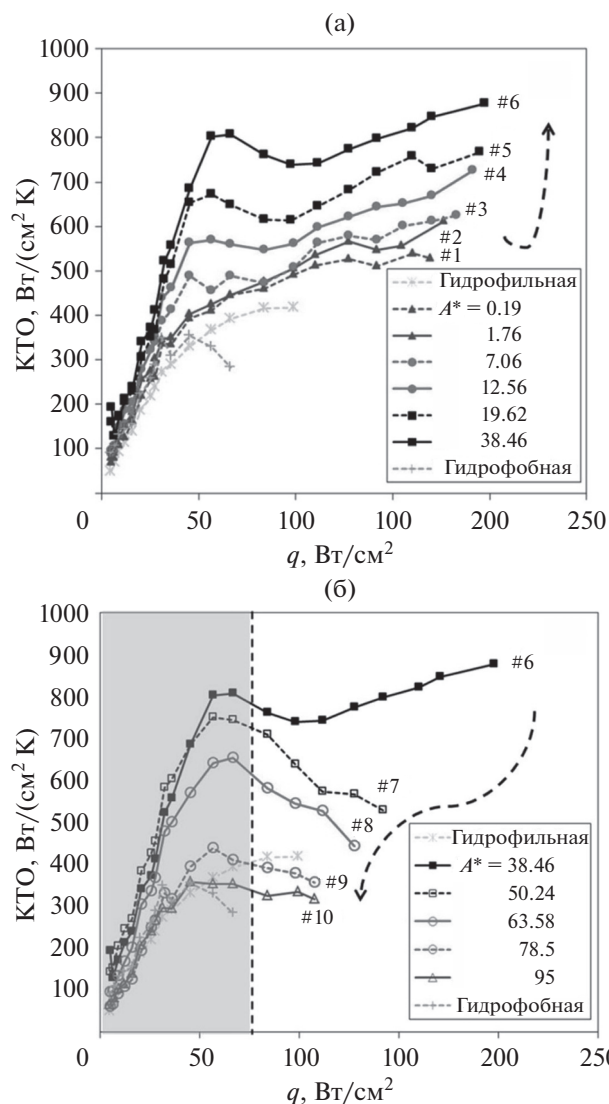


Рис. 26. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для гидрофильной, гидрофобной и бифильных поверхностей [164]: (а) — образцы № 1–6, (б) — образцы № 6–10.

стичь уникальных результатов по увеличению КТО (до 4361% при кипении воды в большом объеме). Однако подобные поверхности пока являются “штучным” продуктом, их адаптация для использования в теплообменном оборудовании — дело будущих исследований. Применение бипористых покрытий позволяет получить интенсификацию теплообмена при кипении в 3–5 раз [144, 160]. Схожие результаты могут быть достигнуты применением более доступных методов обработки поверхностей (изменение шероховатости, МДР, применение сеточных покрытий и т.д.).

■ Комбинирование микрооребрения и нанопокрывтия внутренней поверхности канала [3, 135, 136], а также мезоразмерного оребрения и пористого покрытия, размещенного сверху [139], по-

казывает многообещающие результаты, позволяя увеличить КТП в 3–5 раз по сравнению с гладкой поверхностью (до 610 Вт/см² [139]). Однако, помимо вопроса доступности применяемых технологий, остаются сложности, связанные с недолговечностью нанопокровов и их чувствительностью к загрязнению. Приведенные величины КТП также вполне достижимы за счет использования более доступных методов модификации поверхностей.

■ Влияние смачиваемости оказывает неоднородное воздействие на теплоотдачу и КТП. Например, гидрофильность поверхности способствует увеличению КТП, но снижает КТО при кипении. Наличие гидрофобных зон способствует интенсификации КТО при малых и умеренных тепловых потоках, в то же время приводя к раннему развитию кризиса. Также остается проблемным вопрос стойкости наносимых покрытий. Однако, как показывают современные исследования, несмотря на более высокие КТО, демонстрируемые микроструктурированными поверхностями или поверхностями с сеточными покрытиями, применение супергидрофильных покрытий может оказаться весьма перспективным для интенсификации теплообмена в условиях, где по тем или иным причинам невозможно применение развитых поверхностей, а также в условиях субатмосферных давлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что как известные, так и современные методы механической обработки/модификации поверхностей (деформирующее резание, применение сеточных покрытий, создание шероховатости и т.д.) позволяют создавать эффективные интенсифицирующие поверхности, дающие возможность значительно повысить теплоотдачу при кипении и испарении. На основе анализа результатов рассмотренных исследований можно сделать следующие выводы.

Значительная интенсификация теплообмена при кипении в большом объеме и стекающих пленках жидкости (от 4–7-кратного увеличения вплоть до 10–12 раз) может быть реализована на микроструктурированных поверхностях (как коммерческих, так и разрабатываемых исследователями), полученных доступными и неоднократно зарекомендовавшими себя методами. Максимальные подтвержденные в различных исследованиях значения коэффициента теплоотдачи наблюдаются на трехмерных поверхностях с полужакрытыми полостями (“reentrant cavities”), интенсификация пузырькового кипения на которых связана с повышением плотности центров парообразования и снижением температурных напоров закипания и интерпретируется с помощью физических моделей, рассматривающих

циклический процесс роста и отрыва пузырька, формирующегося в полужакрытой полости.

В работах с применением современных комбинированных мультимасштабных покрытий сообщается об увеличении КТП при кипении воды в большом объеме вплоть до пяти раз (610 Вт/см²). Механизм интенсификации теплообмена на таких покрытиях связывается авторами с разделением путей движения пара и жидкости в процессе пузырькового кипения. В то же время сопоставимые значения интенсификации КТП при кипении в большом объеме (4–6 раз) и в стекающих пленках жидкости (до трех раз по сравнению с гладкой поверхностью) наблюдаются на поверхностях с трехмерными микроструктурами, полученными более доступным методом деформирующего резания.

Интенсификация процесса испарения стекающих пленок жидкости с применением развитых поверхностей, влияющих на гидродинамику течения, позволяет, как правило, увеличить коэффициент теплоотдачи в 2–3 раза. Интенсификация происходит за счет увеличения площади теплоотдающей поверхности и турбулизации потока жидкости в пристенной области; вклад микрослоевого испарения менисков, образующихся при течении пленки жидкости по микрорельефу, в настоящее время уточняется. Развитые поверхности испарения, как правило, позволяют получить двухкратное увеличение КТП при испарении стекающих пленок жидкости.

Применение современных гидрофильных покрытий позволяет заметно интенсифицировать теплоотдачу, вместе с тем практически не уменьшая КТП. Особенно заметной может быть интенсификация теплоотдачи по сравнению с необработанной поверхностью (на 200% и более) в условиях пониженных давлений.

В отдельных исследованиях с применением авторских мультимасштабных поверхностей, регулирующих протекание процессов пузырькового кипения, сообщается о рекордных увеличениях теплоотдачи и КТП [3, 139]. Положительно оценивая подобные перспективные исследования, следует учитывать, что из-за сложности применяемых в них методов модификации, а также процессов деградации, характерных для нанопокровов, на данный момент несколько преждевременно говорить о практическом применении подобных поверхностей. В то же время поверхности и покрытия, созданные с помощью продолжающих совершенствоваться известных методов модификации (МДР, МДО, сеточные покрытия и т.д.) и их комбинаций, несомненно, могут рассматриваться как перспективные для дальнейших исследований и последующего применения в современном теплообменном оборудовании.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-18-50264; исследования влияния смачивае-

мости поверхности на теплоотдачу при кипении выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Surtaev A., Serdyukov V., Zhou J., Pavlenko A., Tumanov V.* An Experimental Study of Vapor Bubbles Dynamics at Water and Ethanol Pool Boiling at Low and High Heat Fluxes // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2018. V. 126. Part B. P. 297.
2. *Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л.* Способ получения развитой штырьковой теплообменной поверхности. Патент РФ № 2679815. 2019.
3. *Jaikummar A., Kandlikar S.G.* Ultra-High Pool Boiling Performance and Effect of Channel Width with Selectively Coated Open Microchannels // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 95. P. 795.
4. *Jakob M.* Heat Transfer. N.Y.: John Wiley & Sons, 1949. P. 636–638.
5. *Webb R.L.* Odyssey of the Enhanced Boiling Surface // *J. Heat Transfer*. 2004. V. 126. P. 1051.
6. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении в условиях свободной конвекции // *Тр. Ин-та теплоэнергетики*. 1950. № 2. С. 19.
7. *Лабунцов Д.А.* Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*. 1963. Т. 1. С. 58.
8. *Данилова Г.Н.* Влияние давления и температуры насыщения на теплообмен при кипении фреонов // *Теплообмен при конденсации и кипении*. Тр. ЦКТИ. 1965. № 57. С. 56.
9. *Данилова Г.Н., Куприянова А.В.* Коэффициенты теплоотдачи при кипении фреонов С-318 и 21 на горизонтальной трубке // *Холод. техника*. 1967. № 11. С. 15.
10. *Данилова Г.Н., Куприянова А.В.* Обобщение данных по теплоотдаче при кипении аммиака // *Холод. техника*. 1971. № 6. С. 39.
11. *Поволоцкая Н.М.* Исследование теплообмена при кипении фреона-502 в пучке труб. М.: ВНИИХ, 1969.
12. *Куприянова А.В.* Теплоотдача при кипении аммиака на горизонтальных трубах // *Холод. техника*. 1970. № 11. С. 40.
13. *Гогонин И.И.* Теплообмен при кипении фреона-21 в условиях свободной конвекции // *Холод. техника и технология*. 1970. № 3. С. 24.
14. *Ягов В.В., Лабунцов Д.А.* Интенсификация теплообмена и стабилизация процесса кипения в области весьма низких давлений // *ИФЖ*. 1971. Т. 20. № 6. С. 231.
15. *Zuber N.* On the Stability of Boiling Heat Transfer // *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 1958. V. 80. P. 711.
16. *Young R.K.* Improved Nucleate Boiling Heat Transfer // *Chem. Eng. Progress*. 1964. V. 60. P. 53.
17. *Bergles A.E., Rohsenow W.M.* The Determination of Forced-Convection Surface-Boiling Heat Transfer // *ASME J. Heat Transfer*. 1964. V. 86. P. 365.
18. *Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П., Медникова Н.М.* Теплообменные аппараты холодильных установок. Л.: Машиностроение, 1973. 328 с.
19. *Jacob M., Linke W.* Boiling Heat Transfer // *Phys. Z.* 1935. V. 36. Iss. 2. P. 267.
20. *Westwater J.W.* Boiling Heat Transfer // *American Scientist*. 1959. V. 47. № 3. P. 427.
21. *Clark H.B., Strenge P.S., Westwater J.W.* Active Sites for Nucleate Boiling // *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.* 1959. V. 55. Iss. 29. P. 103.
22. *Kurihara H.M., Myers J.E.* The Effects of Superheat and Surface Roughness on Boiling Coefficients // *AIChE J.* 1960. V. 6. P. 83.
23. *Антюфьев В.М., Гусев Е.К.* Интенсификация теплообмена оребренных поверхностей при поперечном обтекании // *Теплоэнергетика*. 1968. № 7. С. 31.
24. *Дюндин В.А.* Исследование теплообмена при кипении фреона-12 на гладкой и ребристых трубках // *Холод. техника*. 1969. № 11. С. 16.
25. *Данилова Г.Н., Бельский В.К.* Исследование теплоотдачи при кипении фреонов 113 и 12 на трубках различной шероховатости // *Холод. техника*. 1970. № 3. С. 24.
26. *Николаев Г.П., Токалов Ю.К.* Кризис кипения на поверхностях с пористым покрытием // *ИФЖ*. 1974. № 1. С. 5.
27. *Кузма-Кичта Ю.А., Москвин В.Н., Сорокин Д.Н.* Исследование теплоотдачи при кипении воды на поверхностях с пористым покрытием в широком диапазоне давлений // *Теплоэнергетика*. 1982. № 3. С. 53.
28. *Гоголин А.А., Данилова Г.Н., Азарсков В.М., Медникова Н.М.* Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин / Под ред. Гоголина А.А. М.: Изд-во Легк. и пищев. пром-ти, 1982. 24 с.
29. *Вилемас Ю.В., Воронин Г.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А.* Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи. Т. 2 / Под ред. Жукаускаса А.А., Калинина Э.К. Вильнюс: Москлас, 1988.
30. *Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С.* Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 407 с.
31. *Thome J.R.* Enhanced Boiling Heat Transfer. N.Y.: Hemisphere Publ. Corp. (Taylor & Francis), 1990.
32. *Webb R.L.* Principles of Enhanced Heat Transfer. N.Y.: Wiley, 1994.
33. *Bergles A.E.* Techniques to Enhance Heat Transfer. In *Handbook of Heat Transfer*. 3rd ed. / Eds. Rohsenow W.M., Hartnett J.P., Cho Y.I. N.Y.: McGraw-Hill, 1998.
34. *Bergles A.E., Jensen M.K., Shome B.* Bibliography on Enhancement of Convective Heat and Mass Transfer / Report HTL-23. Troy, N.Y.: Rensselaer Polytechnic Institute. Heat Transfer Laboratory, 1995.
35. *Bejan A., Kraus A.D.* Heat Transfer Handbook. V. 1. John Wiley & Sons, 2003.
36. *Thome J.R.* Engineering Data Book III. Wolverine Tube, Inc., 2004.
37. *Webb R.L.* Donald Q. Kern Lecture Award Paper: Odyssey of the Enhanced Boiling Surface // *J. Heat Transfer*. 2004. V. 126. № 6. P. 1051.
38. *Ribatski G., Jacobi A.M.* Falling-Film Evaporation on Horizontal Tubes. A Critical Review // *Int. J. Refrigeration*. 2005. V. 28. № 5. P. 635.
39. *Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холанов Л.П.* Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. 532 с.
40. *Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М.* Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновац. технол., 2009.

41. Овсянник А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012.
42. Attinger D., Frankiewicz C., Betz A.R., Schutzius T.M., Ganguly R., Das A., Megaridis C.M. Surface Engineering for Phase Change Heat Transfer: A Review // *MRS Energy & Sustainability*. 2014. V. 1. P. 4.
43. Bhavnani S., Narayanan V., Qu W., Jensen M., Kandlikar S., Kim J., Thome J. Boiling Augmentation with Micro/Nanostructured Surfaces: Current Status and Research Outlook // *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 2014. V. 18. № 3. P. 197.
44. McCarthy M., Gerasopoulos K., Maroo S.C., Hart A.J. Materials, Fabrication, and Manufacturing of Micro/Nanostructured Surfaces for Phase-Change Heat Transfer Enhancement // *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* 2014. V. 18. P. 288.
45. Kim D.E., Yu D.I., Jerng D.W., Kim M.H., Ahn H.S. Review of Boiling Heat Transfer Enhancement on Micro/Nanostructured Surfaces // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2015. V. 66. P. 173.
46. Shojaeian M., Koşar A. Pool Boiling and Flow Boiling on Micro- and Nanostructured Surfaces // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2015. V. 63. P. 45.
47. 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. 196 с.
48. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении // *Рос. нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 18.
49. Гогонин И.И. Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 227 с.
50. Liang G., Mudawar I. Review of Pool Boiling Enhancement by Surface Modification // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2019. V. 128. P. 892.
51. Сиротин А.Г., Двойрис А.Д., Игнатов Л.Н., Холоднов В.А. Повышение эффективности холодильных установок за счет применения в теплообменниках-испарителях труб с пористым покрытием // *Газовая промышленность*. 1976. № 12. С. 28.
52. Боришанская А.В. О теплоотдаче при кипении фреонов на поверхностях с пористыми металлическими покрытиями // *Холод. техника*. 1979. № 12. С. 17.
53. Сиротин А.Г. Экспериментальное исследование процесса кипения углеводородных жидкостей на пористых поверхностях // *Кипение и конденсация*. Рига: Наука, 1984. С. 20.
54. Васильев Л.Л., Овсянник А.В., Новиков И.Н. Обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении пропана на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого*. 2001. № 2. С. 3.
55. Fujie K., Nakayama W., Kuwahara H., Kakizaki K. Heat Transfer Wall for Boiling Liquids. U.S. Patent 4060125. 1977.
56. Saier M., Kastner H.W., Klockler R.Y. And T-Finned Tubes and Methods and Apparatus for Their Making. U.S. Patent 4179911. 1979.
57. Fujikake J. Heat Transfer Tube for Use in Boiling Type Heat Exchangers and Method of Producing the Same. U.S. Patent 4216826. 1980.
58. Thors P., Clevinger N.R., Campbell B., Tyler J.T. Heat Transfer Tubes and Methods of Fabrication Thereof. U.S. Patent 5697430. 1997.
59. Webb R.L., Pais C. Nucleate Pool Boiling Data for Five Refrigerants on Plain, Integral-Fin and Enhanced Tube Geometries // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1992. V. 35. № 8. P. 1893.
60. Zubkov N.N., Ovchinnikov A.I. Method of Producing a Surface with Alternating Ridges and Depressions and a Tool for Carrying Out the Said Method. European U.S. Patent 0727269. 1996.
61. Thors P., Zoubkov N. Heat Transfer Tube Including Enhanced Heat Transfer Surfaces. US. Patent 7311137. 2007.
62. Thors P., Zoubkov N. Method for Making Enhanced Heat Transfer Surfaces. US. Patent 8573022. 2013.
63. Jung D., An K., Park J. Nucleate Boiling Heat Transfer Coefficients of HCFC22, HFC134a, HFC125, and HFC32 on Various Enhanced Tubes // *Int. J. Refrigeration*. 2004. V. 27. № 2. P. 202.
64. Christians M., Thome J.R. Falling Film Evaporation on Enhanced Tubes. Part 1: Experimental Results for Pool Boiling, Onset-of-Dryout and Falling Film Evaporation // *Int. J. Refrigeration*. 2012. V. 35. № 2. P. 300.
65. Habert M., Thome J.R. Falling-Film Evaporation on Tube Bundle with Plain and Enhanced Tubes. Part I: Experimental Results // *Exp. Heat Transfer*. 2010. V. 23. № 4. P. 259.
66. Chen T. An Experimental Investigation of Nucleate Boiling Heat Transfer from an Enhanced Cylindrical Surface // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 59. Iss. 1–2. P. 355.
67. Li W., Wu X.-Y., Luo Z., Webb R.L. Falling Water Film Evaporation on Newly-Designed Enhanced Tube Bundles // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2011. V. 54. Iss. 13–14. P. 2990.
68. Huang L.-D. Pool Boiling Correlations for Structured Fin Tubes // *Proc. 10th Int. Conf. on Boiling and Condensation Heat Transfer*. Nagasaki, Japan, 2018.
69. Ayub Z.H., Bergles A.E. Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113 // *Wärme-und Stoffübertragung*. 1987. Bd. 21. S. 209.
70. Fagerholm N.E., Ghazanfari A.R., Kivioja K., Järvinen E. Boiling Heat Transfer Performance of Plain and Porous Tubes in Falling Film Flow of Refrigerant R114 // *Wärme-und Stoffübertragung*. 1987. Bd. 21. № 6. S. 343.
71. McNeil D.A., Burnside B.M., Miller K.M., Tarrad A.H. A Comparison between High Flux and Plain Tubes for Boiling Pentane in a Horizontal Kettle Reboiler // *Appl. Therm. Eng.* 2002. № 2. P. 803.
72. Roques J.F., Thome J.R. Falling Films on Arrays of Horizontal Tubes with R-134a. Pt. I: Boiling Heat Transfer Results for Four Types of Tubes // *Heat Transfer Eng.* 2007. V. 28. № 5. P. 398.
73. Kim N.H., Choi K.K. Nucleate Pool Boiling on Structured Enhanced Tubes Having Pores with Connecting Gaps // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2001. V. 44. № 1. P. 17.
74. Liu Z.H., Yi J. Enhanced Evaporation Heat Transfer of Water and R11 Falling Film with the Roll-Worked Enhanced Tube Bundle // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2001. V. 25. P. 447.
75. Liu Z.H., Yi J. Falling Film Evaporation Heat Transfer of Water/Salt Mixtures from Roll-Worked Enhanced

- Tubes and Tube Bundle // Appl. Therm. Eng. 2002. V. 22. № 1. P. 83.
76. Zhao C.Y., Jin P.H., Ji W.T., He Y.L., Tao W.Q. Experimental Investigations of R134a and R123 Falling Film Evaporation on Enhanced Horizontal Tubes // Int. J. Refrigeration. 2017. V. 75. P. 190.
 77. Jin P.H., Zhao C.Y., Ji W.T., Tao W.Q. Experimental Investigation of R410A and R32 Falling Film Evaporation on Horizontal Enhanced Tubes // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 137. P. 739.
 78. Zoubkov N.N., Ovchinnikov A.I., Vasil'ev S.G. Tool-Workpiece Interaction in Deformational Cutting // Russ. Eng. Res. 2016. V. 36. № 3. P. 209.
 79. Yakomaskin A.A., Afanasiev V.N., Zubkov N.N., Mor-skoy D.N. Investigation of Heat Transfer in Evaporator of Microchannel Loop Heat Pipe // J. Heat Transfer. 2013. V. 135. № 10. P. 101006.
 80. Битюцкая Ю.Л. Получение штырьковых теплооб-менных структур повышенной теплогидравличе-ской эффективности методом деформирующего резания: Дис. ... канд. тех. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
 81. Shchelchikov A.V., Popov I.A., Zubkov N.N. Boiling of a Liquid on Microstructured Surfaces under Free-Con-vection Conditions // J. Eng. Phys. Thermophys. 2016. V. 89. № 5. P. 1152.
 82. Попов И.А., Щелчков А.В., Гортышов Ю.Ф., Зуб-ков Н.Н. Интенсификация теплоотдачи и крити-ческие тепловые потоки при кипении на поверх-ностях с микрооребрением // ТВТ. 2017. Т. 55. Вып. 4. С. 537.
 83. Антаненкова И.С., Сухих А.А., Ежов Е.В. Тепло-технические характеристики испарителя и кон-денсатора ТНУ на R22 с поверхностями, обрабо-танными по технологии деформирующего реза-ния // Холод. техника. 2016. № 10. С. 30.
 84. Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N. Sur- face Microstructures for Boiling and Evaporation Enhancement in Falling Films of Low-Viscosity Flu- ids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 155. P. 119722.
 85. Ayub Z.H. Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113. Retrospective Theses and Dissertations. 1986. Paper. 7979. <https://doi.org/10.1007/BF01004023>
 86. Гогонин И.И. Теплообмен при кипении жидкости в пленке, движущейся под действием силы тяже- сти // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 4. С. 821826.
 87. Pavlenko A.N., Lel V.V. Heat Transfer and Crisis Phen-omena in Falling Films of Cryogenic Liquid // Russ. J. Eng. Thermophys. 1997. V. 7. № 3–4. P. 177.
 88. Попов И.А., Щелчков А.В., Зубков Н.Н., Лэй Р.А., Гортышов Ю.Ф. Теплоотдача при кипении раз-личных жидкостей на микроструктурированных поверхностях // Изв. вузов. Авиаци. техника. 2014. № 4. С. 49.
 89. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зуб-ков Н.Н., Битюцкая Ю.Л. Влияние типа структу- рирования поверхности на теплоотдачу при испа- рении и кипении в стекающих пленках // Интер- экспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 157.
 90. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.I. Heat Transfer and Crisis Phenomena at Boiling of Refrigerant Films Falling Down the Surfaces Obtained by Deformational Cutting // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2017. V. 5. P. 215.
 91. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.I. Heat Transfer at Boiling of R114/R21 Refrigerants Mixture Film on Microstructured Surfaces // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. 2017. V. 917. № 1. P. 012035.
 92. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Сте- панов К.А., Зубков Н.Н. Влияние типа микро- структурирования стенки на теплообмен при кипении в стекающих пленках маловязкой жид- кости // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 1. С. 16.
 93. Volodin O.A., Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Zubkov N.N. The Influence of the Surface Structuring Type on Heat Transfer in Falling Films of Refrigerant Mixture // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. 2019. V. 1369. № 1. P. 012046.
 94. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V., Volodin O.A., Zubkov N.N. Heat Transfer and Dynamics of Transient Processes at Liquid Film Flowing on Smooth and Modified Sur- faces // J. Phys.: Conf. Ser. IOP Publ. 2019. V. 1369. № 1. P. 012052.
 95. Stepanov K., Mukhin D., Zubkov N. Desorption of Aqueous Solution of Lithium Bromide on Enhanced Surfaces in a Single-Stage Lithium-Bromide Absorp- tion Chiller // J. Eng. Thermophys. 2019. V. 28. № 4. P. 529.
 96. Chien L.H., Tsai Y.L. An Experimental Study of Pool Boiling and Falling Film Vaporization on Horizontal Tubes in R-245fa // Appl. Therm. Eng. 2011. V. 31. № 17–18. P. 4044.
 97. Dqbek L., Kapjor A., Orman L.J. Ethyl Alcohol Boiling Heat Transfer on Multilayer Meshed Surfaces AIP Conference Proceedings // AIP Publ. LLC. 2016. V. 1745. № 1. P. 020005.
 98. Zhang S., Jiang X., Li Y. et al. Extraordinary Boiling Enhancement through Micro-Chimney Effects in Gradient Porous Micromeshes for High-Power Appli- cations // Energy Convers. Manage. 2020. V. 209. P. 112665.
 99. Salvagnini W., Taqueda M.A. Falling-Film Evaporator with Film Promoters // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. V. 43. № 21. P. 6832.
 100. Gerlach D.W., Joshi Y.K. Boiling Performance of Flou- rinert PF 5060 on Confined and Unconfined Wire Meshes Soldered to the Substrate // ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engi- neers Digital Collection. 2005. P. 807.
 101. 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(3). P. 263.
 102. Nishikawa K., Ito T., Tanaka K. Enhanced Heat Trans- fer by Nucleate Boiling on a Sintered Metal Layer // Heat Transfer – Jpn. Res. 1979. V. 8(2). P. 65.
 103. Rannenbergh M., Beer H. Heat Transfer by Evaporation in Capillary Porous Wire Mesh Structures // Lett. Heat Mass Transfer. 1980. V. 7. № 6. P. 425.
 104. Xin M.D., Chao Y.D. Analysis and Experiment of Boil- ing Heat Transfer on T-Shaped Finned Surfaces // Chem. Eng. Commun. 1987. V. 50. № 1–6. P. 185.
 105. Åkesjö A., Gourdon M., Vamling L., Innings F., Sasic S. Modified Surfaces to Enhance Vertical Falling Film Heat Transfer – An Experimental and Numerical Study // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 131. P. 237.

106. *Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A.* Heat Transfer in Falling Film of the Refrigerants Mixture on a Vertical Tube with Wire Mesh // Proc. 3rd Int. Workshop on Heat Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (IWHT2015). Oct. 16–19, 2015. Taipei, Taiwan. № IWHT2015-1049.
107. *Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н., Зубков Н.Н.* Интенсификация теплообмена при гравитационном течении пленки жидкости микро-структурированием теплоотдающей поверхности // XIV Междун. науч. конгресс. Междун. науч. конф. “СИБОПТИКА-2018”. Сб. матер. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск: СГУТИТ, 2018. Т. 1. С. 193.
108. *Aviles M.L.* Experiments on Falling Film Evaporation of a Water-Ethylene Glycol Mixture on a Surface with Longitudinal Grooves. Ph. D. Thesis. Berlin: University of Technology, 2007.
109. *Zaitsev D.V., Aviles M.L., Auracher H., Kabov O.A.* Rupture of a Subcooled Liquid Film Falling Down a Heated Grooved Surface // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. 19(3–4). P. 71.
110. *Rocha S.P., Kannengieser O., Cardoso E.M., Passos J.C.* Nucleate Pool Boiling of R-134a on Plain and Micro-Finned Tubes // Int. J. Refrigeration. 2013. V. 36. № 2. P. 456.
111. *Berenson P.J.* Experiments on Pool-Boiling Heat Transfer // Int. J. Heat Mass Transfer. 1962. V. 5. № 10. P. 985.
112. *Jones B.J., McHale J.P., Garimella S.V.* The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer // J. Heat Transfer. 2009. V. 131. № 12. P. 121009.
113. *Kang M.G.* Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. V. 43. № 22. P. 4073.
114. *Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.* Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 289 с.
115. *Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г.* Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высш. школа, 1986. 447 с.
116. *Гогонин И.И.* Зависимость теплообмена при кипении от свойств и геометрических параметров теплоотдающей стенки // ТВТ. 2006. V. 44. № 6. С. 918.
117. *Hosseini R., Gholaminejad A., Nabil M., Samadinia M.H.* Concerning the Effect of Surface Material on Nucleate Boiling Heat Transfer of R-113 // ASME/JSME 2011 8th Therm. Eng. Joint Conf. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2011.
118. *Nakayama W., Daikoku T., Kuwahara H., Nakajima T.* Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces. Pt. I: Experimental Investigation // ASME J. Heat Transfer. 1980. V. 102. P. 445.
119. *Chien L.H., Webb R.L.* A Nucleate Boiling Model for Structured Enhanced Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 1998. V. 41(14). P. 2183.
120. *Jiang Y.Y., Wang W.C., Wang D., Wang B.X.* Boiling Heat Transfer on Machined Porous Surfaces with Structural Optimization // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. V. 44. № 2. P. 443.
121. *Márkus A., Házzi G.* Numerical Simulation of the Detachment of Bubbles from a Rough Surface at Microscale Level // Nucl. Eng. Des. 2012. V. 248. P. 263.
122. *Fujita Y.* Boiling and Evaporation of Falling Film on Horizontal Tubes and Its Enhancement on Grooved Tubes // Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers. Dordrecht: Springer, 1999. P. 325.
123. *Gambaryan-Roisman T., Stephan P.* Heat Transfer Analysis of Falling Film Evaporation on Structured Surfaces // Int. Heat Transfer Conf. Digital Library. Grenoble, France, 2002. V. 3. P. 449.
124. *Lorentz J.J., Yung D.* Combined Boiling and Evaporation of Liquid Films on Horizontal Tubes // Proc. 5th OTEC Conf. 1978. V. 3. P. 46.
125. *Rifert V.G., Podberezny V.I., Putilin J.V., Nikitin J.G., Barabash P.A.* Heat Transfer in Thin Film-Type Evaporator with Profile Tubes // Desalination. 1989. V. 74. P. 363.
126. *Putilin J.V., Podberezny V.L., Rifert V.G.* Evaporation Heat Transfer in Liquid Films Flowing Down Horizontal Smooth and Longitudinally Profiled Tubes // Desalination. 1996. V. 105. № 1–2. P. 165.
127. *Pecherkin N.I., Pavlenko A.N., Volodin O.A.* Heat Transfer and Critical Heat Flux at Evaporation and Boiling in Refrigerant Mixture Films Falling Down the Tube with Structured Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 90. P. 149.
128. *Язов В.В.* Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 4.
129. *Yagov V.V.* Predicting Method for Heat Transfer Coefficient at Binary Mixtures Nucleate Boiling // Heat Transfer Conf. 1998. V. 2. P. 545.
130. *Ramaswamy C., Joshi Y., Nakayama W., Johnson W.B.* Semi-Analytical Model for Boiling from Enhanced Structures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. № 22. P. 4257.
131. *Haider I., Webb R.L.* A Transient Micro-Convection Model of Nucleate Pool Boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 1997. V. 40(15). P. 3675.
132. *Liang G., Mudawar I.* Pool Boiling Critical Heat Flux (CHF). Pt. 1: Review of Mechanisms, Models, and Correlations // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 117. P. 1352.
133. *Дедов А.В.* Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18.
134. *Khan S.A., Atieh M.A., Koç M.* Micro-Nano Scale Surface Coating for Nucleate Boiling Heat Transfer: A Critical Review // Energies. 2018. V. 11(11). P. 3189.
135. *Jaikumar A., Kandlikar S.G.* Enhanced Pool Boiling Heat Transfer Mechanisms for Selectively Sintered Open Microchannels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 88. P. 652.
136. *Jaikumar A., Kandlikar S.G.* Enhanced Pool Boiling for Electronics Cooling Using Porous Fin Tops on Open Microchannels with FC-87 // Appl. Therm. Eng. 2015. V. 91. P. 426.
137. *Gheithaghy A.M., Saffari H., Mohebbi M.* Investigation Pool Boiling Heat Transfer in U-Shaped Mesochannel with Electrodeposited Porous Coating // Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. V. 76. P. 87.
138. *Akbari E., Gheithaghy A.M., Saffari H., Hosseinalipour S.M.* Effect of Silver Nanoparticle Deposition in Re-Entrant Inclined Minichannel on Bubble Dynamics for Pool Boiling Enhancement // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. V. 82. P. 390.
139. *Bai L., Zhang L., Lin G., Peterson G.P.* Pool Boiling with High Heat Flux Enabled by a Porous Artery

- Structure // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108(23). P. 233901.
140. Kim H., Park Y., Kim H., Lee C., Jerng D.W., Kim D.E. Critical Heat Flux Enhancement by Single-Layered Metal Wire Mesh with Micro and Nano-Sized Pore Structures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 439.
141. Шустов М.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Покрытие микроканала наночастицами – эффективный метод повышения критической тепловой нагрузки // Теплоэнергетика. 2017. Т. 4. С. 72.
142. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С., Чистякова А.В., Звонарев Ю.А., Жуков В.М., Васильева Л.Т. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С. 35.
143. Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Kalita V.I., Kuznetsov D.V., Komlev D.I., Radyuk A.A., Ivannikov A.Y. The Influence of Three-Dimensional Capillary-Porous Coatings on Heat Transfer at Liquid Boiling // Tech. Phys. Lett. 2016. V. 42. № 4. P. 391.
144. Surtaev A., Kuznetsov D., Serdyukov V., Pavlenko A., Kalita V., Komlev D., Ivannikov A., Radyuk A. Structured Capillary-Porous Coatings for Enhancement of Heat Transfer at Pool Boiling // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 133. P. 532.
145. Васильев Н.В., Вараксин А.Ю., Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А. Характеристики кипения воды, недогретой до температуры насыщения, на структурированных поверхностях // ТВТ. 2017. Т. 55. № 6. С. 712.
146. Бессмельцев В.П., Павленко А.Н., Жуков В.И. Разработка технологии создания структурированных капиллярно-пористых покрытий методом 3Д-печати для интенсификации теплообмена при кипении // Автометрия. 2019. Т. 55. № 6. С. 25.
147. Bock B.D., Bucci M., Markides C.N., Thome J.R., Meyer J.P. Pool Boiling of Refrigerants over Nanostructured and Roughened Tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 162. P. 120387.
148. Young R.K., Hummel R.L. Improved Nucleate Boiling Heat Transfer // Chem. Eng. Progress. 1964. V. 60. № 7. P. 53.
149. Vachon R.I., Nix G.E. Pool Boiling Heat Transfer from Teflon-Coated Stainless Steel // Trans. ASME. Ser. C. 1969. № 3. P. 73.
150. Takata Y., Hidaka S., Masuda M., Ito T. Pool Boiling on a Superhydrophilic Surface // Int. J. Energy Res. 2003. V. 27. № 2. P. 111.
151. Takata Y., Hidaka S., Yamashita A., Yamamoto H. Evaporation of Water Drop on a Plasma-Irradiated Hydrophilic Surface // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. V. 25. № 2. P. 320.
152. Takata Y., Hidaka S., Cao J.M., Nakamura T., Yamamoto H., Masuda M., Ito T. Effect of Surface Wettability on Boiling and Evaporation // Energy. 2005. V. 30. № 2–4. P. 209.
153. Takata Y., Hidaka S., Uraguchi T. Boiling Feature on a Super Water-Repellent Surface // Heat Transfer Eng. 2006. V. 27. № 8. P. 25.
154. Jo H., Ahn H.S., Kang S., Kim M.H. A Study of Nucleate Boiling Heat Transfer on Hydrophilic, Hydrophobic and Heterogeneous Wetting Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2011. V. 54. № 25–26. P. 5643.
155. Гогонин И.И. Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 261.
156. He H., Yamada M., Hidaka S., Kohno M., Takahashi K., Takata Y. Enhanced Boiling Surface with Hydrophobic Circle Spots Evaporator of Looped Thermosiphon // Proc. 13th Int. Conf. on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. 17–19 July 2017. P. 365.
157. Suroto B.J., Kohno M., Takata Y. Surface Wettability and Subcooling on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer // AIP Conf. Proc. AIP Publ. LLC, 2018. V. 1927. № 1. P. 030047.
158. Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Safonov A.I. Enhancement of Boiling Heat Transfer on Hydrophobic Fluoropolymer Coatings // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2018. V. 6. № 3. P. 269.
159. Kim J.S., Girard A., Jun S., Lee J., You S.M. Effect of Surface Roughness on Pool Boiling Heat Transfer of Water on Hydrophobic Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 118. P. 802.
160. Wang Y.Q., Luo J.L., Heng Y., Mo D.C., Lyu S.S. Wettability Modification to Further Enhance the Pool Boiling Performance of the Micro Nano Bi-Porous Copper Surface Structure // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 119. P. 333.
161. Moiseev M.I., Fedoseev A., Shugaev M.V., Surtaev A.S. Hybrid Thermal Lattice Boltzmann Model for Boiling Heat Transfer on Surfaces with Different Wettability // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2020. V. 8. № 1. P. 81.
162. Betz A.R., Xu J., Qiu H., Attinger D. Do Surfaces with Mixed Hydrophilic and Hydrophobic Areas Enhance Pool Boiling? // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. № 14. P. 141909.
163. Betz A.R., Jenkins J., Kim C.-J., Attinger D. Boiling Heat Transfer on Superhydrophilic, Superhydrophobic, and Superbiphilic Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 57. № 2. P. 733.
164. Motezakker A.R., Sadaghiani A.K., Çelik S., Larsen T., Villanueva L.G., Koşar A. Optimum Ratio of Hydrophobic to Hydrophilic Areas of Biphilic Surfaces in Thermal Fluid Systems Involving Boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 135. P. 164.
165. 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.
166. Yamada M., Shen B., Imamura T., Hidaka S., Kohno M., Takahashi K., Takata Y. Enhancement of Boiling Heat Transfer Under Sub-Atmospheric Pressures Using Biphilic Surfaces // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 115. P. 753.
167. Kwark S.M., Amaya M., You S.M. Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Nanocoating in Various Working Fluids // Proc. 27th IEEE SEMI-THERM Symposium. 2011. P. 146.
168. Arya M., Khandeka S., Pratap D., Ramakrishna S.A. Pool Boiling of Water on Nano-Structured Micro Wires at Sub-Atmospheric Conditions // Heat Mass Transfer. 2016. V. 52. P. 1725.