

КИПЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА НАНОЖИДКОСТИ В МИНИ- И МИКРОКАНАЛАХ

© 2023 г. М. Kabir^{1, *, **}, J. Downer², E. Preller², C. Tarau³, B. Yang⁴, J. Xu²

¹Kazuo Inamori School of Engineering, Alfred University, NY, USA

²Center for Advanced Manufacturing in Space Technology & Applied Research,
University of the District of Columbia, Washington D.C., USA

³Advanced Cooling Technologies, Inc. Lancaster, PA, USA

⁴Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, MD, USA

*E-mail: Kabir.Mehdi@gmail.com

**E-mail: Kabir@alfred.edu

Поступил в редакцию 25.01.2020 г.

После доработки 10.11.2021 г.

Принят к публикации 15.02.2022 г.

Эффекты течения однофазной наножидкости в мини- и микроканалах исследовались как экспериментально, так и численно в литературе в течение последнего десятилетия. Почти все исследования показывают аналогичную тенденцию, согласно которой взаимодействие однофазных наножидкостей с мини- и микроканалами обеспечивает значительное улучшение тепловых характеристик. Однако в литературе имеется ограниченное количество публикаций с экспериментальными исследованиями характеристик теплообмена наножидкостей при кипении двухфазного потока в мини- и микроканалах. Кроме того, в имеющихся экспериментальных исследованиях отмечаются некоторые заметно противоречивые тенденции, особенно в отношении коэффициента теплообмена при кипении. В настоящем обзоре основная причина противоречий, отраженных в литературе по экспериментальным измерениям коэффициента теплообмена при кипении, прослеживается в различных закономерностях осаждения наночастиц разного размера на поверхности кипения и последующих изменениях морфологии и характера кипения. Определены ключевые параметры наножидкостей при кипении потока в мини- и микроканалах, и всесторонне рассмотрено влияние этих параметров на характеристики теплообмена при кипении. Также выявлены и проанализированы соответствия и расхождения, о которых сообщается в литературе. Сделан ряд предложений для будущих экспериментальных исследований кипения наножидкостей, чтобы свести к минимуму противоречивые сообщения.

DOI: 10.31857/S0040364423020072

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
Современная тенденция в направлении узких каналов	
Классификация каналов	
Классификация наножидкостей	
1. Влияние наночастиц на теплофизические свойства	
1.1. Влияние на теплопроводность	
1.2. Влияние на вязкость	
1.3. Влияние на теплоемкость	
1.4. Влияние на поверхностное натяжение	
1.5. Влияние на смачиваемость	
1.6. Эффективность наночастиц для целей охлаждения	
2. Теплообмен при двухфазном потоке в мини- и микроканалах	
2.1. Влияние наножидкостей на коэффициент теплообмена при кипении	

2.1.1. Возможные механизмы улучшения/ухудшения теплообмена при кипении с использованием наножидкостей	
2.2. Влияние наножидкостей на критический тепловой поток при двухфазном течении в мини- и микроканалах	
2.3. Влияние наножидкостей на паросодержание	
2.4. Влияние наножидкостей на падение давления	
2.5. Влияние наножидкостей на устойчивость кипения в потоке	
3. Предложения и направления будущих исследований	
Заключение	
Список литературы	

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы энергетики могут стать одной из самых важных задач, с которыми человечество

столкнется в ближайшем будущем. В частности, серьезный вызов для энергетики возникает, когда речь идет о снижении выбросов углекислого газа и глобальном потеплении. Соответственно, в последнее время большинство развитых стран уделяют первоочередное внимание обеспечению чистой энергией. Поскольку перенос и преобразование энергии происходят на молекулярном или атомном уровне, предполагается, что нанотехнологии будут играть решающую роль в возрождении традиционных энергетических отраслей, а также в продвижении новых технологий возобновляемых источников энергии. Среди различных форм энергии, используемых в настоящее время, значительная часть вырабатывается за счет тепла. В большинстве промышленных систем либо теплом обеспечивается ввод энергии в систему, либо энергия, вырабатываемая системой, забирается в виде тепла. В связи с резким ростом спроса на энергию во всем мире большое внимание привлекают методы интенсификации теплопередачи и снижения потерь энергии из-за неэффективности.

В течение нескольких десятилетий в системах управления температурным режимом во многих приложениях использовались однофазные процессы теплопередачи, в том числе в конфигурациях с естественной и принудительной конвекцией для удовлетворения требований к охлаждению. Однако недавний скачок в скорости рассеивания тепла и потребность в уменьшении размеров охлаждающего оборудования сделали существующие системы неспособными удовлетворить требованиям передовых приложений, что подстегнуло переход к системам с двухфазным потоком. Эта тенденция особенно затрагивает системы с высоким тепловым потоком, такие как управление температурным режимом в космосе, охлаждение микроэлектроники, нано- и микроэлектромеханические системы, усовершенствованная обработка материалов и термоядерные реакторы.

Исследование течения наножидкостей в микроканалах в целях интенсификации теплообмена продолжается до сих пор. В этом контексте проведено несколько численных и экспериментальных исследований с использованием наножидкостей в мини- и микроканалах для однофазного и двухфазного кипящего потоков. Однако исследований по двухфазному кипению наножидкостей в мини- и микроканалах значительно меньше, чем по однофазному. Кроме того, почти во всех экспериментальных и численных исследованиях однофазного потока, проведенных с 2005 г. по настоящее время, выявлена тенденция, согласно которой использование однофазных наножидкостей в мини- и микроканалах обеспечивает значительное улучшение тепловых характеристик. Напротив, в последние годы опубликовано ограниченное количество исследований, посвященных экспериментальному изучению теплообмена при кипении потока наножидкости в мини- и микроканалах, в

которых сообщалось о существенно противоречивых тенденциях и выводах.

В связи со значимостью кипения двухфазного потока для улучшения теплообмена интересно критически проанализировать существующие тенденции, о которых сообщается в эмпирических исследованиях о влиянии кипения потока наножидкостей в мини- и микроканалах на ключевые параметры потока жидкости и тепловые характеристики. В настоящем обзоре выявляются и обсуждаются совпадения и противоречия в характеристиках теплообмена для лучшего понимания возможных причин расхождений в экспериментальных измерениях коэффициента теплообмена при кипении. Предлагается ряд направлений для будущих исследований кипения наножидкостей, которые позволят свести к минимуму противоречивые экспериментальные результаты.

Современная тенденция в направлении узких каналов

Течение жидкости в каналах можно рассматривать как сердце многих природных и промышленных систем. Тепломассоперенос осуществляется вдоль стенок каналов, существующих в биологических системах, например кровеносных сосудах, почках, легких, головном мозге, а также во многих промышленных системах: теплообменниках, воздухоразделительных установках, системах опреснения воды и атомных энергетических реакторов. На рис. 1 показан диапазон размеров каналов, применяемых в различных системах [1, 2]. В то время как наименьшие каналы наблюдаются в биологических системах, в которых имеет место массоперенос, большие размеры используются для транспортировки жидкостей. С технологической точки зрения в последние годы наблюдается устойчивый переход от каналов больших размеров порядка 10–25 мм к каналам меньших диаметров — десяти-сотни мкм.

Как правило, процесс переноса энергии совершается вдоль стенки канала, тогда как объемный поток проходит через область поперечного сечения канала. Скорость транспортировки зависит от площади поверхности и находится в линейной зависимости от диаметра круглой трубы D , скорость потока прямо пропорциональна площади поперечного сечения D^2 . Так, отношение площади поверхности канала к объему пропорционально $1/D$. Очевидно, что уменьшение диаметра канала приводит к увеличению отношения площади поверхности к объему.

При переходе к меньшим размерам канала некоторые из традиционных принципов течения жидкости, массопереноса и переноса энергии необходимо подвергнуть переоценке для подтверждения или пересмотра. Можно назвать три основные причины, объясняющие разницу в моделировании потока жидкости в обычных и мини- и микроканалах:

1) некоторые изменения заложены в фундаментальных принципах; например, гипотеза непрерывности может быть неверна для течений газа в мини- и микроканалах, или отклонение возникает из-за усиленного действия некоторых сил (например, электрокинетических);

2) неопределенности, связанные с факторами, извлеченными эмпирически из экспериментов в каналах большого размера (например, коэффициенты потери давления потока жидкости на входе и выходе из трубы);

3) неопределенности, возникающие при микромасштабных измерениях из-за геометрии или рабочих условий.

Причины, которые вызывают такой интерес к каналам меньших размеров в теплообменных приложениях, следующие [1]:

- 1) заметная интенсификация теплообмена,
- 2) улучшенная диссипация теплового потока в микроэлектронных схемах и устройствах,
- 3) развитие устройств микронных масштабов, для которых требуются столь же маленькие системы охлаждения.

Использование каналов меньшего размера обеспечивает лучшую передачу тепла, хотя и сопровождается, как правило, увеличением перепада давления. Оптимальный баланс между этими параметрами приводит к разным размерам каналов для различных приложений. Например, в автомобильной промышленности размеры проточных каналов в испарителях и радиаторах достигают почти 1 мм в результате баланса между стандартами чистоты, теплообменом и мощностью прокачки. Точно так же высокие тепловые потоки, генерируемые микроэлектронными устройствами, а также геометрические и размерные ограничения, налагаемые микронными устройствами и электро-механическими системами, требуют резкого уменьшения размеров проточных каналов, предназначенных для систем охлаждения в них. Кроме того, для охлаждения зеркал, используемых в мощных лазерных устройствах, применяются системы, занимающие чрезвычайно мало места. Непрерывный прогресс в области генетической и биомедицинской инженерии зависит от контроля точности переноса и температуры потока жидкости в микропроходах. Следовательно, четкое понимание процесса теплообмена и течения жидкости в таких микромасштабных системах имеет решающее значение при проектировании и эксплуатации.

Классификация каналов

Гидравлический диаметр может служить индикатором для учета размеров канала и последующей их классификации. Уменьшение размеров канала по-разному влияет на различные процессы. Хотя вывод конкретных критериев на основе различных параметров процесса кажется захватывающим, в литературе обычно используется

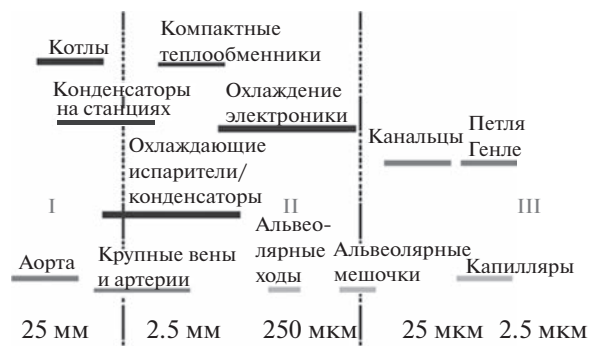


Рис. 1. Диапазоны диаметров каналов, применяемых в различных приложениях [1].

простая классификация на основе размеров из-за обилия параметров процесса, возникающих при переходе от обычных к микроразмерам. В классификации каналов, предложенной в [3], диапазон от 1 до 100 мкм соответствует микроканалам, от 100 мкм до 1 мм — мезоканалам, от 1 до 6 мм — компактным каналам и диапазон более 6 мм — обычным каналам.

Авторы [4] улучшили предложенную в [3] классификацию каналов и затем представили [1] более общую классификацию на основании минимального размера канала, показанную в табл. 1. В случае, если канал некруглый, за D рекомендуется принимать наименьший размер канала; например, в прямоугольном канале меньшая сторона рассматривается как D . Данная классификация каналов может использоваться для приложений как с однофазным, так и с двухфазным потоком.

В частности, для случая теплообмена с фазовым переходом каналы с различными масштабами классифицируются в соответствии с числом Бонда Bo , как предложено в [5] для выражения перехода от макромасштабного теплообмена к микромасштабному, показанному в табл. 1. Число Бонда учитывает влияние давления, температуры и некоторых теплофизических свойств жидкости и определяется следующим образом:

$$Bo = \left(\frac{D_h}{l_c} \right)^2,$$

где D_h — гидравлический диаметр, l_c — капиллярная постоянная

$$l_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}.$$

Для воды при 373 К капиллярная постоянная l_c составляет примерно 2.72 мм. На основании классификации [5] каналы с диапазоном гидравлического диаметра D_h от 600 до 4720 мкм можно рассматривать как миниканалы для приложений с водой в качестве базовой жидкости. В табл. 2 показана классификация каналов на основе числа Бонда Bo для воды при 373 К.

Таблица 1. Классификация каналов, используемая для работы с данными исследований мини- и микроканалов [1]

Типы каналов	Наименьший размер канала D
Обычные каналы	$D > 3$ мм
Миниканалы	$200 \text{ мкм} < D \leq 3$ мм
Микроканалы	$10 \text{ мкм} < D \leq 200 \text{ мкм}$
Переходные микроканалы	$1 \text{ мкм} < D \leq 10 \text{ мкм}$
Переходные наноканалы	$0.1 \text{ мкм} < D \leq 1 \text{ мкм}$
Наноканалы	$D \geq 0.1 \text{ мкм}$

В настоящем обзоре собраны экспериментальные исследования, которые соответствуют обоим критериям выбора мини- и микроканалов (табл. 1, 2), чтобы обеспечить корректное определение классификации каналов, а также надлежащий набор исследований мини- и микроканалов.

Классификация наножидкостей

Методы, применяемые для интенсификации теплообмена в различных ситуациях, делятся в основном на две категории: пассивные и активные. Для активных методов требуется подвод внешней энергии, что имеет свои недостатки, связанные с дороговизной, а также трудностью при работе с существенно компактными системами. Напротив, пассивная интенсификация теплообмена обычно достигается за счет изменения характеристик жидкости, таких как нарушение потока из-за формы поверхности, кривизны канала или прикрепленных объектов (например, различных типов ребер), что приводит к увеличению площади поверхности, смешиванию потоков и турбулентности; использование вторичных/закрученных потоков; внеплоскостное смещение в микроканалах; препятствия, направленные к входу; шероховатость и обработка поверхности. Однако в данных пассивных технологиях внутренним ограничением является достаточно низкая теплопроводность рабочих тел. Теплопроводность воды, составляющая около 0.6 Вт/(м К) , и самая высокая теплопроводность среди широко используемых сегодня жидкостей на несколько порядков меньше, чем у большинства металлов и оксидов металлов [6]. Таким образом, добавление наночастиц в базовые рабочие жидкости для улучшения теплопроводности рассматривается как пассивный метод повышения теплообмена.

Введение частиц в основную жидкость для повышения теплопроводности на самом деле не новая идея. В прошлом из-за производственных ограничений можно было производить только микрочастицы, которые использовались в системах с узкими каналами. Однако применение микрочастиц вызывало серьезные последствия: из-за неустойчивости суспензии макрочастиц в жидкости в резервуарах и трубах образуются осадки, засорение проточных каналов, эрозия клапанов и насосов и существенное повышение скачка давления. В дальнейшем в целях повышения теплоотдачи наночастицы размером менее 100 нм стали добавлять до взвешенного состояния в основные водные теплоносители, этиленгликоль (используется в качестве хладагента в радиаторах транспортных средств), легкие масла и хладагенты [7]. Броуновское движение, улучшающее стабильность наночастиц, взвешенных в жидкости, предотвращает гравитационное осаждение и скопление частиц, и наночастицы могут распространяться и удерживаться во взвешенном состоянии в основных жидкостях намного лучше, чем микрочастицы [8]. Наночастицы обычно изготавливаются из металлов (например, Au, Ag, Cu), оксидов металлов (ZrO_2 , TiO_2 , Al_2O_3), углерода (углеродные нанотрубки и алмаз), стекла или других материалов. Сообщается [9], что вода обладает самым высоким потенциалом для изготовления суспензий с наночастицами по сравнению с другими основными жидкостями: например, аммиаком, фреоном R-22, фторсодержащими углеводородами в смеси с водой и углеводородами. На рис. 2 продемонстрированы многовариантность и сложные взаимосвязи между параметрами, влияющими на основные теплофизические свойства наножидкостей, которые могут напрямую влиять на характеристики теплообмена.

Термальные наножидкости, разработанные для улучшения теплообмена, обладают следующими преимуществами по сравнению с обычными суспензиями [6]:

- более высокая удельная поверхность, т.е. большая поверхность теплообмена между частицами и жидкостью;
- более стабильная дисперсия и суспензия за счет броуновского движения частиц;
- сниженное забивание частицами по сравнению со шламами, что позволяет уменьшать размеры систем;

Таблица 2. Классификация каналов на основании числа Бонда для воды при 373 К

Типы каналов	Bo	Соответствующий гидравлический диаметр, мкм
Микроканалы	$\text{Bo} < 0.05$	$D_h < 600$
Миниканалы	$0.05 < \text{Bo} < 3$	$600 < D_h < 4720$
Наноканалы	$\text{Bo} > 3$	$D_h > 4720$

– возможность регулировать свойства жидкости, в частности смачиваемость и теплопроводность, за счет изменения концентрации наночастиц для удовлетворения различных задач теплообмена;

– уменьшение мощности накачки по сравнению с чистыми жидкостями для достижения аналогичной интенсификации теплообмена.

Наножидкости можно разделить на категории на основании материалов наночастиц в основной жидкости. Наиболее распространенным видом наножидкостей является наножидкость, в которой наночастицы одного материала диспергированы в основной жидкости [10, 11]. Обычно концентрация наночастиц в жидкости не превышает 10%, а размер составляет менее 100 нм [12]. Чтобы лучше понять влияние наночастиц на тепловые характеристики, в настоящем обзоре исследованы наножидкости, подпадающие в одну из следующих категорий: 1) частицы из оксидов металлов, 2) металлические, 3) углеродистые.

1) Частицы из оксидов металлов являются одними из наиболее широко используемых типов наножидкостей из-за доступности, стоимости, простоты производства и стабильности наноматериала [13]. Наиболее изученными материалами являются Al_2O_3 , SiO_2 , CuO , ZnO и TiO_2 , из которых Al_2O_3 широко используется в исследованиях [14, 15]. Наночастицы оксидов металлов обычно обладают повышенной устойчивостью к окислению по сравнению с металлическими аналогами, а их более низкая плотность предотвращает осаждение в основной жидкости. Показано, что введение наночастиц из оксидов металлов улучшает теплофизические свойства рабочих жидкостей [12, 16].

2) Металлические наночастицы – это категория наножидкостей, которая включает материалы с наночастицами из таких металлов, как Cu , Al , Fe , Ni , Si , Ag . Данные наночастицы отличаются своими свойствами, такими как высокое отношение площади поверхности к объему, кристаллическая структура, сферическая и цилиндрическая форма частиц и реактивность на факторы окружающей среды. Основным преимуществом металлических наночастиц перед оксидными является более высокая теплопроводность [12]. Однако данные наножидкости менее изучены, потому что более доступные металлические наночастицы склонны к окислению, а наночастицы драгоценных металлов слишком дороги, хотя обладают большей химической стабильностью. Как и в случае с оксидами металлов, увеличение концентрации металлических наночастиц в основной жидкости ведет к соответствующему увеличению тепловых характеристик [12, 17–19]. При этом более высокая концентрация металлических наночастиц приводит к увеличению местного коэффициента трения из-за повышенной вязкости таких наножидкостей [12].

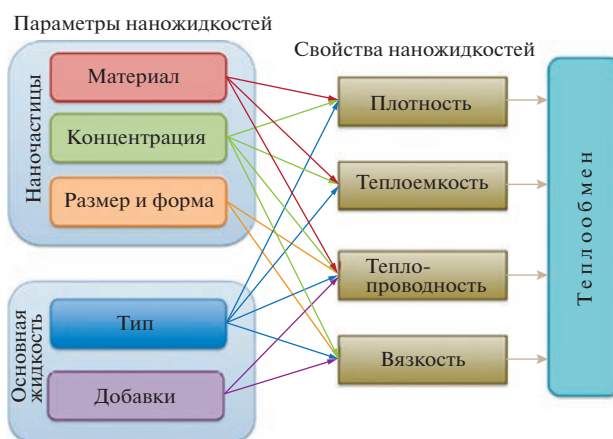


Рис. 2. Многовариантность и сложные взаимосвязи в наножидкостях [13].

3) Углеродистые наночастицы полностью состоят из углерода. Их можно разделить на фуллерены, графен и углеродные нанотрубки (УНТ). Увеличение теплопроводности показывает широкий диапазон от относительно небольшого роста при использовании технического углерода до значительного при использовании УНТ и графенов [12]. Сообщается, что увеличение теплопроводности наножидкостей с применением углеродсодержащих материалов (например, сажи) невелико, в то время как относительно большое увеличение может быть достигнуто с использованием УНТ или графенов [12]. Углеродсодержащие наножидкости можно разделить на две группы:

1) углеродные нанотрубки – это графеновая наножидкость с решетчатой структурой атомов углерода, свернутых в цилиндрические нанотрубки диаметром 0.7 нм для однослойных и 100 нм для многослойных УНТ и различной длины: от микрометров до миллиметров [19];

2) графен – аллотропная модификация углерода, которая представляет собой структуру с гексагональной решеткой, состоящую из атомов углерода на двумерной плоской поверхности. Обычно толщина листа графена составляет около 1 нм [19].

1. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

1.1. Влияние на теплопроводность

Теплопроводность – важное свойство, улучшающее тепловые характеристики основной жидкости. Экспериментальные исследования показывают, что теплопроводность наножидкостей зависит от нескольких факторов, основными из которых являются концентрация наночастиц, материал и состав наночастиц, тип и состав основной жидкости, форма и размер наночастиц, температура. Результаты обзора литературы о влиянии размера частиц на теплопроводность наножидкостей оказались противоречивыми. Обычно для на-

ножидкостей с оксидом алюминия в этиленгликоле и насосном масле, содержащих частицы оксида алюминия пяти различных размеров ($\sim 12\text{--}302\text{ нм}$) [20], сообщается, что с увеличением размера частиц наблюдается рост, за которым следует уменьшение теплопроводности. В большинстве исследований упоминается о монотонном увеличении теплопроводности с уменьшением размера частиц, связанном с броуновским движением [21–23] или уменьшением из-за межфазного термического сопротивления [24–27]. Однако в исследованиях [24–27] можно наблюдать общую тенденцию, свидетельствующую о повышении теплопроводности с увеличением размера частиц.

На теплопроводность наножидкостей влияют три основных параметра: концентрация, размер и материал наночастиц. Концентрация наночастиц является важным фактором, изучаемым в большинстве эмпирических исследований, результаты которых часто качественно согласуются между собой во влиянии концентрации на теплопроводность. В большинстве исследований сообщается об относительно линейном увеличении теплопроводности по мере роста концентрации наночастиц. Обычно сообщается, что увеличение теплопроводности примерно на 10% может быть достигнуто за счет добавления около 1 об. % наночастиц [6, 24]. На рис. 3 показана зависимость коэффициента теплопроводности трех наножидкостей с частицами разного размера в зависимости от температуры, где коэффициент определяется как теплопроводность наножидкости k_{nf} , деленная на теплопроводность основной жидкости k_{bf} . По результатам экспериментов установлено, что влияние температуры на теплопроводность наножидкостей сильно зависит от размера наночастиц [28]. Наножидкости с частицами меньшего размера имеют боль-

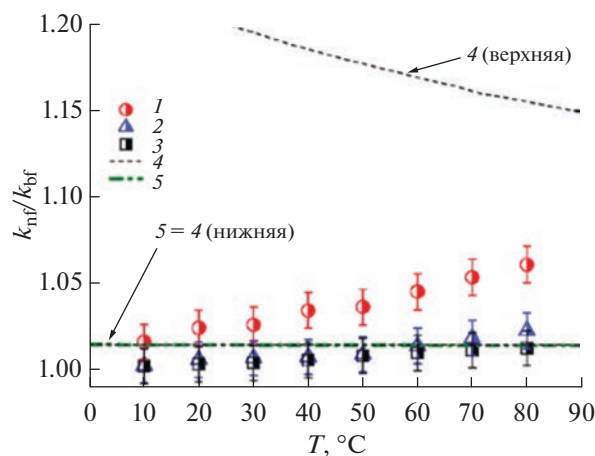


Рис. 3. Относительная теплопроводность наножидкости с частицами Al_2O_3 при концентрации 0.51 об. % в зависимости от температуры при трех различных размерах наночастиц [28]: 1 – средний диаметр – 71.6 нм, 2 – 114.5, 3 – 136.8; 4 – границы [36], 5 – модель Максвелла [37].

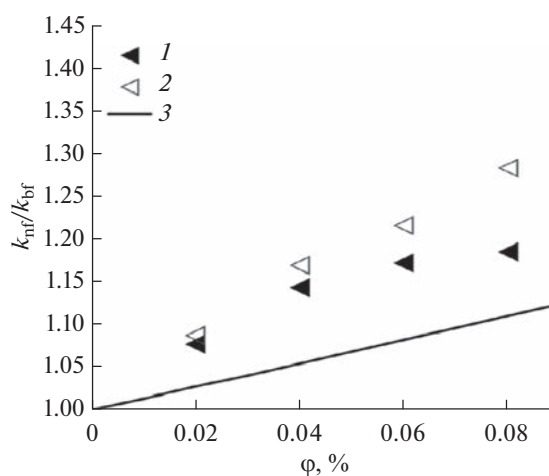


Рис. 4. Относительная теплопроводность наножидкостей на основе воды с наночастицами ZrO_2 двух разных размеров в зависимости от концентрации частиц [16]: 1 – 44 нм, 2 – 105, 3 – уравнение Максвелла.

ший коэффициент теплопроводности для того же материала частиц при той же температуре.

Как показано на рис. 4, теплопроводность наножидкостей незначительно увеличивается при более высоких концентрациях наночастиц при использовании частиц из ZrO_2 с размерами 44 и 105 нм [29]. Подобное поведение теплопроводности наножидкости отмечено ранее в экспериментах [30, 31] и при молекулярно-динамическом моделировании [32, 33].

Классические теории теплопроводности обнаруживают для дисперсных жидкостей зависимость теплопроводности от материала частиц. Эта зависимость учитывается введением коэффициента теплопроводности материала частиц. На рис. 5

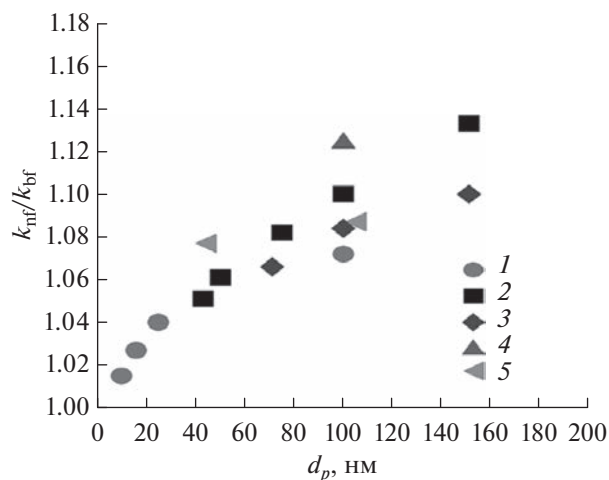


Рис. 5. Относительная теплопроводность наножидкостей на основе воды с наночастицами из различных материалов в зависимости от температуры при объемной концентрации частиц 2% [29]: 1 – SiO_2 , 2 – Al_2O_3 , 3 – TiO_2 , 4 – CuO , 5 – ZrO_2 .

проиллюстрированы различия в относительной теплопроводности наножидкостей из разных материалов с наночастицами одного размера [29].

1.2. Влияние на вязкость

Как экспериментальные, так и численные исследования, проведенные на сегодняшний день, показывают, что вязкость наножидкости зависит от нескольких факторов. Основными факторами являются pH, концентрация и размер наночастиц. В то же время отсутствуют согласованные данные о том, как размер частиц влияет на вязкость наножидкости [34–37]. Вязкость — один из важнейших параметров, влияющих на тепловые характеристики наножидкостей. По мере уменьшения размера частиц общая площадь поверхности раздела твердое тело—жидкость и количество частиц при той же объемной концентрации увеличиваются. Следовательно, как первый, так и второй электровязкостные эффекты становятся более значимыми для частиц меньших размеров, вызывая более значительное увеличение вязкости [38]. В связи с этим авторы [37] исследовали влияние размера частиц на вязкость жидкости вода— Al_2O_3 . Исследованы две наножидкости с одинаковой объемной концентрацией $>4\%$ с двумя размерами частиц 36 и 47 нм для оценки влияния частиц на вязкость. Обнаружено, что вязкость наножидкости с частицами размером 47 нм больше, чем с частицами размером 36 нм, т.е. вязкость повышается с увеличением размера частиц.

На рис. 6 демонстрируется влияние pH на вязкость и заряд на поверхности частиц карбида кремния в дистиллированной воде [39, 40], показывающее, что вязкость уменьшается с ростом pH суспензии. Существует корреляция с ζ -потенциалом с более низкой вязкостью при более высоких поверхностных зарядах, указывающая на то, что наблюдаемые явления, скорее всего, связаны с электростатической стабилизацией суспензий (вто-

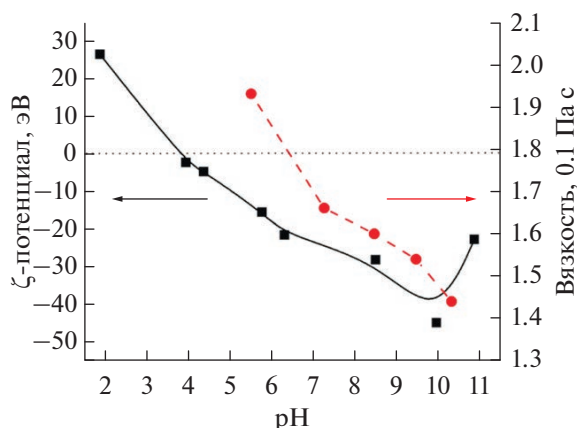


Рис. 6. Влияние pH на вязкость наножидкости и заряд на поверхности частиц при размере наночастиц 29 нм и 25°C [40].

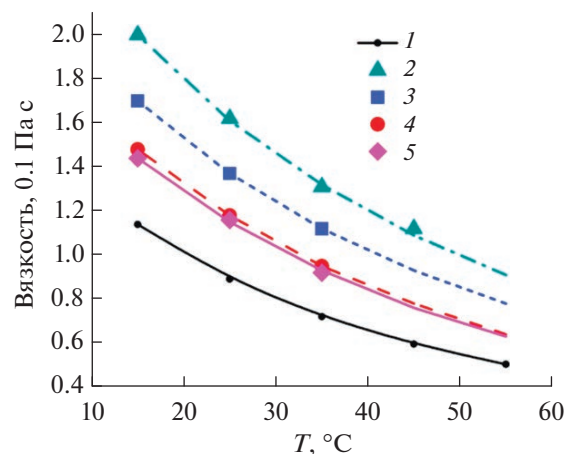


Рис. 7. Температурные зависимости вязкости водных наножидкостей при концентрации наночастиц SiC 4.1 об. %, $\text{pH} = 9.4$ и различных размерах наночастиц [41]: 1 — чистая вода, 2 — 16 нм, 3 — 29, 4 — 66, 5 — 90.

рой электровязкостный эффект). Влияние pH на вязкость и заряд на поверхности частиц уже было известно, однако результаты данного экспериментального исследования очень важны для разработки наножидкостей, поскольку они показывают широкий диапазон изменения вязкости с использованием простой регулировки pH без какого-либо конкретного влияния на теплопроводность наножидкостей.

На рис. 7 проиллюстрировано влияние температуры и размера частиц на наножидкости SiC— H_2O одной объемной концентрации и pH. Существует обратная пропорция между размером наночастиц и вязкостью, так что вязкость наножидкостей увеличивается с уменьшением размера частиц [41]. При контроле pH суспензии наблюдаемый эффект можно объяснить изменением площади поверхности раздела жидкость—твердое тело, а также уменьшением объема наночастиц (т.е. первым электровязкостным эффектом).

Также обнаружено [42], что изменение вязкости невозможно предсказать с помощью обычных принципов, особенно для фракций с большим объемом частиц. По аналогии с механизмами, связанными с теплопроводностью, структура частиц и морфологические аспекты тоже могут влиять на эффективную вязкость, что приводит к экспоненциальному увеличению вязкости после определенной объемной концентрации частиц [43].

1.3. Влияние на теплоемкость

Удельная теплоемкость наножидкости зависит главным образом от удельной теплоемкости основной жидкости и наночастиц, объемной концентрации наночастиц и температуры жидкости. В литературе [6, 44–46] высказывается мнение, что эффективная удельная теплоемкость наножидкости уменьшается с увеличением объемной

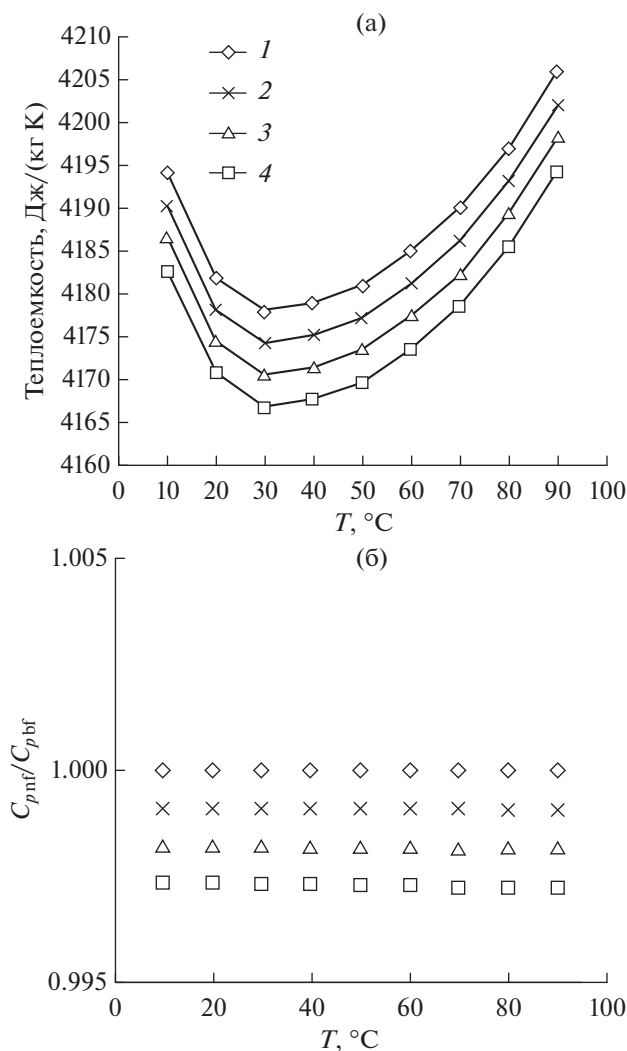


Рис. 8. Температурные зависимости (а) теплоемкости наножидкости графен–вода и отношения теплоемкостей (б) при различных концентрациях наночастиц [45]: 1 – чистая вода, 2 – 0.05 об. % наночастиц, 3 – 0.1, 4 – 0.15.

доли частиц и увеличивается с ростом температуры. Уменьшение эффективной удельной теплоемкости наножидкостей можно понять при добавлении твердых материалов (например, оксидов металлов и металлов) с более низкой удельной теплоемкостью по сравнению с теплоемкостью жидкостей-теплоносителей (например, воды).

На рис. 8 показано изменение удельной теплоемкости наножидкостей графен–вода, а также изменение отношения удельной теплоемкости тех же наножидкостей и основной жидкости в зависимости от температуры в диапазоне от 10°C до 90°C [45]. Удельная теплоемкость наножидкостей графен–вода имеет тенденцию к снижению при повышении температуры до 30°C, а затем, наоборот, растет с повышением температуры в диапазоне от 30 до 90°C (рис. 8а). Однако как удельная

теплоемкость, так и отношение удельных теплоемкостей графен–вода уменьшаются с увеличением объемной доли наночастиц во всем исследованном интервале температур.

1.4. Влияние на поверхностное натяжение

Еще одним важным свойством, которое необходимо учитывать при анализе производительности тепловой системы, является поверхностное натяжение. Оно определяется как сила, действующая на поверхность жидкости на единицу длины по нормали к силе. Поверхностное натяжение играет решающую роль в процессе кипения, так как от него зависят межфазное равновесие и выход пузырьков [47]. Показано, что поверхностное натяжение в наножидкостях, полученных без добавления поверхностно-активных веществ, претерпевает минимальные изменения, в то время как добавление поверхностно-активного вещества заметно влияет на поверхностное натяжение получаемой наножидкости [47–49]. Поверхностно-активные вещества действуют как межфазные оболочки между базовой жидкостью и наночастицами, изменяя поверхностное натяжение наножидкости [50].

Обзор литературы показывает, что температура, объемная концентрация и добавки поверхностно-активных веществ оказывают значительное влияние на поверхностное натяжение наножидкостей. Большинство проведенных исследований в основном сосредоточены на влиянии объемной доли на поверхностное натяжение, а в некоторых исследованиях изучалось влияние поверхностно-активных веществ. В литературе наблюдается согласие в том, что поверхностное натяжение наножидкостей уменьшается с повышением температуры и увеличением концентрации поверхностно-активного вещества. Однако сообщается о некоторых противоречивых результатах влияния объемной доли частиц на поверхностное натяжение наножидкостей. В некоторых исследованиях [51–53] сообщается, что поверхностное натяжение уменьшается с увеличением объемной концентрации, в то время как в других исследованиях [49, 54–56] авторы пришли к выводу, что поверхностное натяжение увеличивается с ростом объемной концентрации. Кроме того, существующие модели или корреляции не могут точно предсказать изменение поверхностного натяжения от концентрации наночастиц. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, чтобы подтвердить влияние объемной концентрации частиц на поверхностное натяжение наножидкостей и прояснить некоторую неопределенность в отношении доступных экспериментальных результатов.

На рис. 9а показано изменение поверхностного натяжения наножидкости с графеном в зависимости от температуры для различных объемных долей частиц. Поверхностное натяжение уменьшается с повышением температуры и увеличением

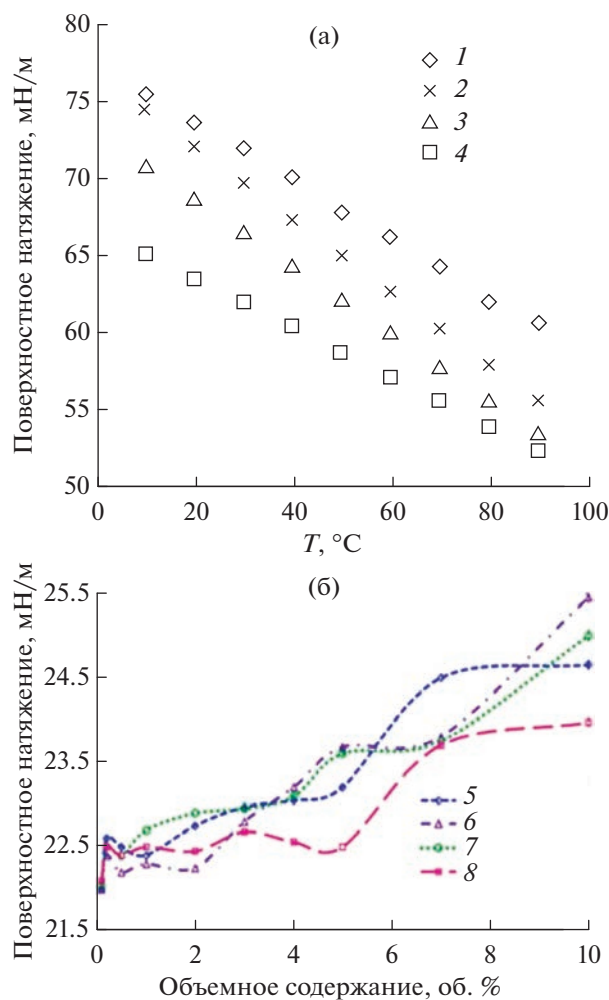


Рис. 9. Зависимости поверхностного натяжения от температуры и объемного содержания наножидкости графен–вода [45] (а) и зависимости поверхностного натяжения наножидкостей со сферическими частицами и углеродными нанотрубками (б) при увеличении объемного содержания частиц [56]: (а) 1 – чистая вода, 2 – 0.05 об. % наночастиц, 3 – 0.1, 4 – 0.15; (б) 5 – Al₂O₃–этанол, 6 – многослойные нанотрубки–этанол, 7 – бор–этанол, 8 – Al–этанол.

ем объемной доли. В [45] сообщается, что поверхностное натяжение сильнее зависит от доли наночастиц, чем от температуры. Тем не менее важно отметить, что основной тренд изменения поверхностного натяжения в зависимости от концентрации наночастиц для наножидкости графен–вода существенно отличается от такового для металлических наножидкостей со сферическими частицами или с УНТ. Поверхностное натяжение данных наножидкостей обычно растет с увеличением концентрации наночастиц (рис. 9б).

В [56] показано влияние объемной доли поверхностно-активного вещества на поверхностное натяжение наножидкостей для смеси 0.1 мас. % Al + сурфактант + *n*-декан (рис. 10) и сообщается о снижении поверхностного натяжения наножидко-

сти при увеличении объемной концентрации поверхностно-активного вещества. Такое снижение объясняется в [56] наличием длинноцепочечных молекул поверхностно-активного вещества, прилипших к наночастицам. Между наночастицами и окружающими их молекулами жидкости образуется слой, который увеличивает потенциал между наночастицами, создавая усилие отталкивания и приводя к уменьшению поверхностного натяжения.

1.5. Влияние на смачиваемость

Присутствие наночастиц влияет на распределение и смачиваемость базовых жидкостей из-за дополнительных частиц, взаимодействия частиц с твердыми частицами и взаимодействия частиц с жидкостью [57]. Исследования влияния наночастиц на поверхностное натяжение базовой жидкости или более масштабно на смачиваемость все еще находятся в зачаточном состоянии. В целом предполагается, что наночастицы улучшают смачиваемость базовой жидкости и существенно повышают критический тепловой поток (КТП) [49, 58–61] (более подробно см. раздел 2.2). Послойное расположение наночастиц вызывает увеличение давления в пленке до избыточного, структурного расклинивающего давления, включающего осциллирующий профиль затухания по толщине пленки. Как следствие такой структурной силы, наножидкость может демонстрировать улучшенную способность к растеканию/смачиванию в ограниченном пространстве [62, 63]. В связи с этим в [44] установлено два важных явления, ответственных за усиление смачивающих свойств наножидкостей: 1) расположение как в твердом теле и скапливание наночастиц вблизи области трехфазного контакта, 2) осаждение частиц при кипячении. Однако, очевидно, необходимы дальнейшие исследования, чтобы лучше понять данные механизмы.

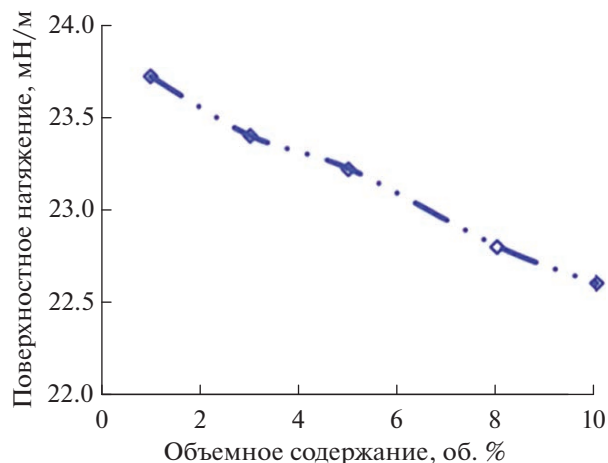


Рис. 10. Зависимость поверхностного натяжения от концентрации поверхностно-активного вещества [56] для наножидкости *n*-додекан + 0.1 об. % Al.

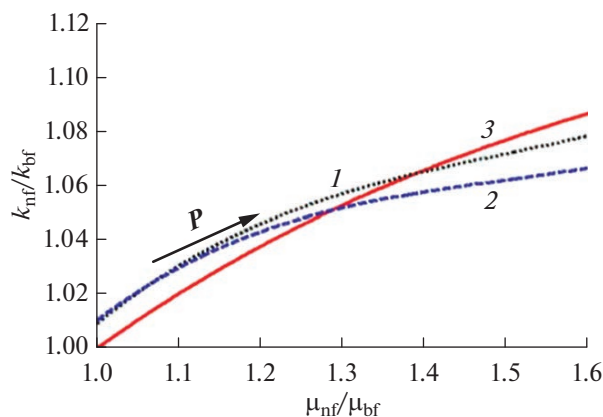


Рис. 11. Изменения относительных вязкости и теплопроводности наножидкостей CuO–вода (1) и Al₂O₃–вода (2) при изменении отношения размеров частиц; 3 — пограничная линия, обозначающая эффективность наножидкостей [64].

1.6. Эффективность наночастиц для целей охлаждения

Эффективность определенной наножидкости для охлаждения определяется относительным увеличением вязкости и теплопроводности. На рис. 11 показана граничная линия, отличающая эффективные наножидкости от неэффективных в пределах увеличения вязкости и теплопроводности для стандартного охлаждения радиатора. Как только свойства наножидкости оказываются выше граничной линии, наножидкость становится более эффективной, чем базовая жидкость. Изменения теплопроводности и вязкости наножидкостей CuO–вода и Al₂O₃–вода также изображены на рис. 11, поскольку соотношение размеров частиц p варьируется от 1 до 5.7 у этих двух наножидкостей. Отношение размеров агрегата частиц p определяется выражением $p = R_a/a$, где a — радиус первичных наночастиц, R_a — средний радиус вращения. С увеличением соотношения размеров и вязкость, и теплопроводность имеют тенденцию к увеличению. Учитывая, что увеличение вязкости преобладает, наножидкости с большим соотношением сторон не считаются эффективными заменителями базовой жидкости [64].

Рост теплопроводности способствует увеличению коэффициента конвективного теплообмена и последующему снижению температуры стенки относительно теплоносителя. В то же время увеличение вязкости вызывает уменьшение расхода хладагента и, следовательно, приводит к значительному повышению температуры хладагента. Чистое влияние этих изменений можно оценить только в отношении определенного приложения.

2. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ В МИНИ- И МИКРОКАНАЛАХ

Теплообмен в двухфазном потоке более привлекателен по сравнению с однофазным потоком по следующим причинам [1]:

- 1) более высокие коэффициенты теплопередачи двухфазного потока;
- 2) более высокая способность теплообмена при том же массовом расходе, что и с однофазным потоком.

Несмотря на то что можно значительно расширить диапазон коэффициентов теплообмена (КТО) однофазного потока, используя каналы малого диаметра или узкие каналы, диапазон коэффициентов теплообмена двухфазного потока обычно выше, чем у однофазного потока [65]. Кроме того, системы теплообмена, работающие на двухфазных потоках, обладают гораздо более высоким потенциалом переноса большего количества тепловой энергии за счет скрытой теплоты по сравнению с явной теплотой однофазного потока. Например, скрытая теплота воды 2257 кДж/кг при 100°C значительно больше, чем ее удельная теплоемкость 4.180 кДж/(кг °C), что особенно важно для приложений по управлению температурами компактных устройств, генерирующих большие тепловые потоки. С другой стороны, для стенки и жидкости в процессе фазового перехода могут быть достигнуты осевые однородные температуры, чего трудно достичь при однофазном течении, так как теплообмен в двухфазном потоке происходит при постоянной температуре и опирается на скрытую теплопередачу.

Несмотря на значительные преимущества использования двухфазного потока, разработка систем теплообмена с двухфазными потоками для отвода тепла от устройств, генерирующих высокие тепловые потоки, отстает по сравнению с системами, работающими на однофазных потоках из-за проблем, возникающих при их эксплуатации, которые можно разграничить следующим образом [66–70]:

- 1) необходимо поддерживать давление воды или соответствующего хладагента на низком уровне, чтобы удовлетворять требованиям к температуре насыщения для систем охлаждения электроники;
- 2) периодическое возникновение неустойчивости во время операций из-за быстрого роста и расширения пузырьков и обратного потока;
- 3) отсутствие ясного представления о двухфазных потоках в мини- и микроканалах и данных о КТП для них.

Хотя вода, как правило, не соответствует первому из перечисленных требований, использование двухфазного потока в системах охлаждения по-прежнему привлекательно с точки зрения тепловых характеристик. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, чтобы найти подходящие

рабочие жидкости для приложений с двухфазным теплообменом.

Помимо преимуществ использования двухфазного потока, уменьшение гидравлического диаметра также может способствовать дальнейшему повышению эффективности теплообмена, что обычно используется при работе с однофазными потоками для улучшения коэффициента теплообмена. Например, в испарителях автомобильных систем кондиционирования воздуха часто применяются пластинчато-ребристые теплообменники с малыми проходами.

Двухфазное течение в мини- и микроканалах в последнее время вызывает значительный интерес и внимание. Многие исследователи активно проводят изучение двухфазного проточного кипения в мини- и микроканалах. Уменьшение гидравлического диаметра каналов в системах теплопередачи может дать значительные преимущества, такие как более высокие коэффициенты теплообмена, повышенная компактность и меньшие объемы рабочей жидкости. Кроме того, разработка компактных компонентов с использованием двухфазного потока стала необходимой для управления температурами электронных устройств, излучающих большое количество тепла, таких как лазерные диоды и компьютерные микросхемы, но имеющих ограниченную площадь поверхности для отвода тепла от устройств.

В целом для организации двухфазного течения в узких каналах используются два подхода [1]:

1) подача двухфазного потока после дроссельного клапана;

2) подача переохлажденного потока в каналы.

Первый подход похож на работу испарителя в холодильной системе. Хотя дроссельный клапан, расположенный перед испарителем, предназначен для подачи переохлажденного потока, чаще он используется для подачи двухфазного потока с диапазоном паросодержаний от 0 до 0.1. Второй подход более привлекателен, так как ожидается более высокий коэффициент теплообмена [1], однако поступление переохлажденного потока в каналы можно рассматривать как расширенную версию однофазного течения, потому что теплообмен зависит в первую очередь от температуры переохлажденного потока. В обоих подходах большое значение имеет зарождение пузырьков пара. Поскольку ожидается, что при первом подходе будет преобладать снарядный режим течения, становится важным зародышеобразование в жидких пробках; тем не менее раннее зародышеобразование для второго подхода более желательно, чтобы предотвратить быстрый рост пузырьков, о котором сообщают многие исследователи. Таким образом, требуется лучшее понимание процесса кипения потока в тонких каналах, чтобы преодолеть практические препятствия в разработке более эффективных и компактных деталей теплообменных устройств.

При исследовании влияния наножидкостей на характеристики теплообмена в литературе чаще изучается использование однофазного потока наножидкостей в мини- и микроканалах с помощью экспериментов и моделирования. В этих работах обычно сообщается о тенденции улучшения тепловых характеристик при использовании однофазного потока наножидкостей в мини- и микроканалах. Однако в литературе имеется лишь несколько исследований, посвященных влиянию двухфазного потока наножидкостей на теплообмен в мини- и микроканалах. Несмотря на отсутствие информации и зрелого понимания принципов использования двухфазных потоков наножидкостей в мини- и микроканалах, известные исследования, посвященные кипению двухфазных потоков наножидкостей в мини- и микроканалах, собраны и проанализированы для изучения влияния наножидкостей на эффективность теплообмена. Данные исследования обобщены в табл. 3. Видно качественное согласие данных о КТП при добавлении наночастиц для двухфазных потоков в мини- и микроканалах, однако имеются противоречивые тенденции, в частности, для коэффициентов теплообмена при кипении (КТК), перепада давления и стабильности потока.

2.1. Влияние наножидкостей на коэффициент теплообмена при кипении

Установлено, что большинство результатов экспериментов, в которых изучалось влияние оксидов металлов или металлических наночастиц на КТК [67, 68, 71, 76, 78, 81], свидетельствуют об увеличении КТК с добавлением наночастиц (табл. 3). Следует обратить внимание, что данные экспериментальные исследования проведены в диапазоне более низких объемных концентраций наночастиц (например, ≤ 0.05 об. %), когда отношение размера наночастиц к гидравлическому диаметру канала в основном меньше 0.5×10^{-4} . Кроме того, во всех этих исследованиях, сообщающих об улучшении теплообмена при кипении потока, использовались оксиды металлов или металлические наночастицы. Тем не менее недавно были проведены два эмпирических исследования, в которых сообщалось о снижении КТК наножидкостей по сравнению с деионизированной водой [79, 80].

Результаты [67, 76] показывают, что увеличение КТК интенсифицируется с увеличением концентрации наночастиц, в то время как в [78] сообщается, что рост КТК замедляется при более высоких объемных концентрациях (0.1%) по сравнению со значениями при 0.01% и 0.05%. Заявлено, что добавление наночастиц в базовую жидкость при высоком содержании паров не оказало положительного влияния на увеличение локальных КТК, но вызвало резкое снижение КТК. Поэтому максимальные КТК могут быть получены на входе в миниканалы, где паросодержание низкое [76].

Таблица 3. Данные экспериментальных работ по исследованию кипения двухфазных потоков наножидкостей в мини- и микроканалах ($D_j \leq 3.00$ мм, $Bo < 3$)										
Источник	Наножидкость	Размер частиц $D_{пр}$, нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	$D_{пр}/D_h$, 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[71]	Керамические частицы (Al_2O_3 , SiC, Al–N) в воде	Не указан	0.25, 0.5	Недогретое и насыщенное кипение потока	Параллельный прямоугольный микроканал: $W = 0.5, 0.5, 1$ мм; $H = 6, 6, 6$ мм	Не применимо	Ограниченное улучшение	Не удалось определить	Не исследовалось	• Нет заметных проблем в наножидкостях • Улучшенные распределение и однородность пузырьков
[72]	Al_2O_3 –вода	36	• 1% для двухфазного кипения • 1% и 2% для однофазного случая	Не указан	Прямоугольный микроканал: $W = 215$ мкм, $H = 821$ мкм, $D_h = 341$ мкм	1.06	• Запирание при кипении потока • Слабый рост КТО при однофазном потоке	Не исследовалось	• Не исследовано для двухфазного течения • Увеличилось в однофазном потоке	Катастрофический сбой из-за отложения около выхода из канала
[73]*	Деионизованная вода	60	Не указана	Кипение недогретого потока	Открытый прямоугольный канал с дном, покрытым углеродными нанотрубками: $H = 0.371$ мм, $W = 10$ мм, $L = 44.8$ мм	0.84	Заметная интенсификация при высоких массовых скоростях и покрытии углеродными нанотрубками	• Увеличивается при низких массовых скоростях • Уменьшается в расщелинии при высоких массовых скоростях	Увеличено при покрытии углеродными нанотрубками	Усилившиеся флуктуации входного и выходного давления

Таблица 3. Продолжение

Источник	Наножидкость	Размер частиц D_{np} , нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	D_{np}/D_h , 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[74]	Al	25	0.001, 0.01, 0.1	Кипение недогретого потока	Одиночный горизонтальный микрочанал: внутренний диаметр – 510 мкм, толщина стенки – 160 мкм	0.49	Не исследовался	Усиление до 51% при концентрации частиц 0.1%	Не указано	• Сигналы давления и динамика пузырьков значительно изменились • Ослабление колебаний температуры на входе в микроканал • Наибольшие вариации пика давления при самой высокой концентрации • Давление и температура колебания в фазе
[67]	Cu–вода	35	5, 10, 50 мг/л	Кипение при вынужденной конвекции	Прямоугольный микрочанал: $W = 2000$ мкм, $H = 500$ мкм, $D_h = 800$ мкм	0.44	Увеличились КТК, паросодержание, тепловой поток при увеличении концентрации частиц (диапазоны очень малых значений)	Не исследовался	Значительно выросло с ростом концентрации	Не исследована

Таблица 3. Продолжение

Источник	Наножидкость	Размер частиц D_{np} , нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	D_{np}/D_h , 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[75]	Водный оксид алюминия	25	0.001, 0.01, 0.1	Кипение недогретого потока	Одиночный микроканал: внутренний диаметр – 510 мкм, толщина стенки – 160 мкм	0.49	Не исследован	• Растет с ростом концентрации • Умеренный рост до 31% при концентрации частиц 0.1%	Не исследовано	• Увеличенные амплитуды и частоты колебаний давления • Большие колебания входной мощности • Раннее образование и развитие пузырей
[68]	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ –вода	40	0.052 (эквивалент массовой концентрации 0.2 мас. %)	Кипение при вынужденной конвекции	Одиночный микроканал: $L = 7500$ мкм, $W = 100$ мкм, $H = 250$ мкм	2.80	• Существенно увеличенный КТК • Меньшая температура поверхности	Не исследован	Значительно снизилось	• Значительно снижена неустойчивость потока без эффекта осаждения • Устойчивый или квазиустойчивый поток • Меньший размер пузырьков и отложенное ННП

Таблица 3. Продолжение

Источник	Наножидкость	Размер частиц D_{np} , нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	D_{np}/D_h , 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[76]	Ag–вода	35	0.000237, 0.000475 (эквивалентно 25, 50 мг/л)	Кипение при вынужденной конвекции	Параллельные прямоугольные миниканалы: $D_h = 800$ мкм, $H = 500$ мкм, $W = 2000$ мкм	0.44	- Увеличенные КТК, тепловой поток, паросодержание и уменьшенная температура поверхности - Рост максимального локального КТК на 86% при 25 мг/л и 200% при 50 мг/л во входном участке - Рост максимального среднего КТК на 132% и 162% при 25 и 50 мг/л	Не исследован	Не исследовано	Не исследована
[77]	Водный оксид алюминия	25	0.001, 0.01, 0.1	Кипение недогретого потока	Одиночный микроканал: внутренний диаметр – 510 мкм, толщина стенки – 160 мкм	0.49	Не исследовано	- Рост с увеличением концентрации - Максимальное увеличение при самом низком массовом потоке и наибольшей концентрации	Среднее падение по длине канала (от 40 до 140 кПа)	- Сильные флуктуации давления и падения давления - Увеличенные амплитуды и частоты входных колебаний давления

Таблица 3. Продолжение

Источник	Наножидкость	Размер частиц D_{np} , нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	D_{np}/D_h , 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[69]	Al_2O_3 —вода	Не указано	0.01, 0.1	Кипение при вынужденной конвекции	Концентрический миниканал: внутренний диаметр — 1.09 мм, толщина стенки — 0.25 мм	Не указано	- Отложенное НПК с увеличением концентрации - НПК при больших тепловых потоках с увеличением концентрации частиц	Не исследовано	В основном меньше	Подавленное ННП пропорционально концентрации частиц
[78]	Al_2O_3 —этанол	50	0.01, 0.05, 0.1	Кипение двухфазного потока	$D_{h,1} = 571$ мкм, $D_{h,2} = 762$ мкм, $D_{h,3} = 1454$ мкм	0.88 0.65 0.34	Сильно увеличенный локальный КТК (почти в пять раз) с пиком при концентрации 0.05%	Не исследовано	Неустойчивые флуктуации	Большие колебания входного давления
[79]	Оксид графена—вода	500—1000	0.005, 0.05 мас. %	Кипение насыщенного двухфазного потока	Пять параллельных микроканалов: $W = 2.5$ мм, $H = 0.5$ мм	6.00—12.00	- Сниженные КТК - Осаждения на поверхности блокируют активные центры зародышеобразования	Не исследовано	Не исследовано	Не исследована

Таблица 3. Окончание

Источник	Наножидкость	Размер частиц D_{np} , нм	Объемная концентрация, %	Режим течения	Геометрия	D_{np}/D_h , 10^{-4}	Теплообмен при кипении	КТП	Падение давления	Устойчивость потока
[80]	Al_2O_3 –вода, SiO_2 –вода, Cu–вода	20–80	0.001, 0.01, 0.1	Кипение насыщенного двухфазного потока	Концентрический микронал из нержавеющей стали: внутренний диаметр – 1.1 мм, внешний – 1.47 мм, $L = 200$ мм	0.18–0.73	- В основном уменьшенные КТК - Самая высокая концентрация дает наименьшие КТК - Наибольшие наночастицы (более 40 нм) позволяют получить лучшие КТК, чем малые (менее 30 нм).	Не исследован	Не исследовано	Не исследована
[81]	Al_2O_3 –вода	13	0.03–0.1	Кипение насыщенного двухфазного потока	Шесть вихревых микрорканалов прямоугольного сечения: $D_h = 0.53, 0.6, 0.64$ мм; $H = 0.8, 1.2, 1.6$ мм; $W = 0.4$ мм	0.25, 0.22, 0.20	- Увеличенные КТК по сравнению с чистой водой - КТК при условиях ускорения чуть меньше, чем в условиях земного тяготения - КТК увеличиваются при росте объемной концентрации от 0.03% до 0.07% и уменьшаются при изменении концентрации от 0.07% до 0.1%	Не исследован	Не исследовано	Не исследована

* В [73] исследовано влияние покрытия поверхности наночастицами на КТП при кипении потока воды.

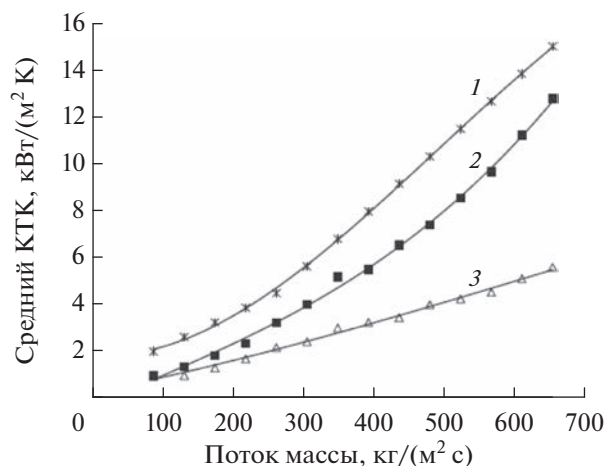


Рис. 12. КТК как функция потока массы при входной мощности 200 Вт [76]: 1 – 50 мг/л серебра–вода, 2 – 25, 3 – чистая вода.

На рис. 12 сравниваются средние значения КТК чистой воды и воды с концентрациями наночастиц серебра 25 мг/л (эквивалентно объемной концентрации 0.000237%) и 50 мг/л (0.000475%) при мощности нагрева 200 Вт. При одном и том же массовом расходе значения КТК в присутствии наночастиц больше, чем без них, и КТК увеличивается с ростом объемной концентрации частиц. Полученные самые высокие значения КТК на 162% при 0.000475% наночастиц и на 132% при 0.000237% выше, чем у чистой воды.

На рис. 13 показано изменение локальных КТК в зависимости от локального паросодержания вдоль канала. Там же представлено влияние концентрации наночастиц Си на локальные КТК. Локальные КТК уменьшаются по мере увеличения паросодержания, но увеличиваются с ростом концентрации наночастиц Си.

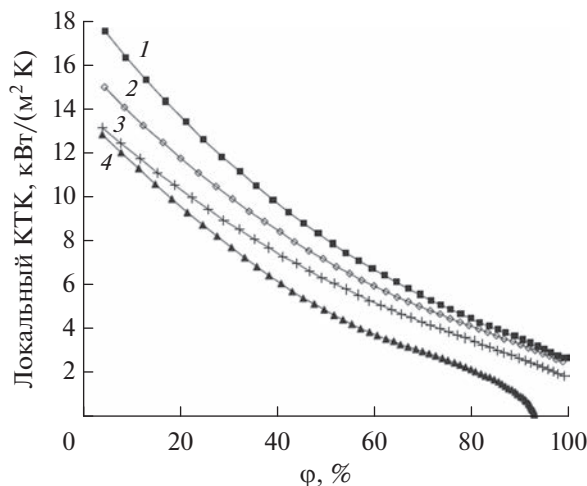


Рис. 13. Влияние концентрации медных наночастиц на локальный КТК [67]: 1 – 50 мг/л меди–вода, 2 – 10, 3 – 5, 4 – чистая вода.

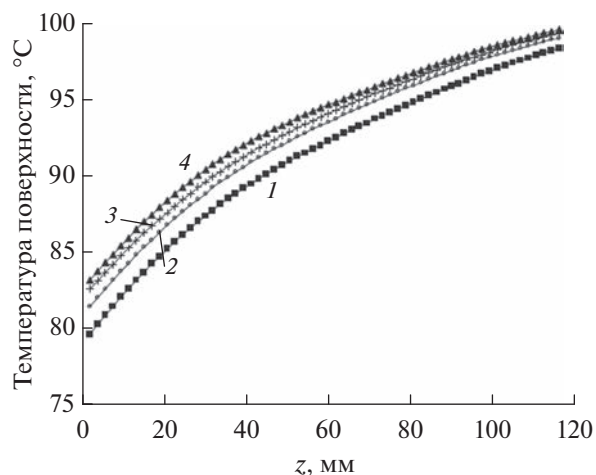


Рис. 14. Влияние концентрации наночастиц меди на распределение локальной температуры поверхности канала [67]: 1 – 50 мг/л меди–вода, 2 – 10, 3 – 5, 4 – чистая вода.

На рис. 14 показана локальная температура поверхности вдоль миниканала при трех различных концентрациях частиц в наножидкости Си–вода. Температура поверхности падает с увеличением концентрации наночастиц и становится ниже, чем при использовании чистой воды, что можно рассматривать как желательный показатель улучшения характеристик охлаждения.

В отличие от результатов, опубликованных в [67, 68, 71, 76, 78, 81], в работах [79, 80] получено падение КТК при использовании наножидкостей в микроканалах. Как показано на рис. 15, авторы [79] сообщили о снижении КТК для наножидкости оксид графена–вода по сравнению с чистой водой. Эксперименты [79] проводились в параллельных микроканалах при двух массовых расходах 40 и 60 мл/мин, для двух массовых концентраций 0.005% и 0.05%. С постепенным повышением паросодержания КТК наножидкости росли медленнее по сравнению с чистой водой. С увеличением скорости потока (рис. 15а, 15б) как базовая жидкость, так и наножидкость демонстрируют небольшое увеличение КТК. Аналогичная тенденция к ухудшению характеристик теплообмена при кипении с использованием наножидкостей в микроканалах отмечена в [80].

2.1.1. Возможные механизмы улучшения/ухудшения теплообмена при кипении с использованием наножидкостей. На рис. 16а, 16б представлены области теплообмена и линии трехфазного контакта для сравнения роста пузырьков на нагретых поверхностях в чистой воде и в воде с наночастицами соответственно. Как правило, механизмы теплообмена при двухфазном проточном кипении чистой жидкости состоят из (а) тонкопленочного испарения, (б) теплообмена между холодной и горячей жидкостями в процессе отрыва пузырьков, (в) микроконвективного теплообмена за счет

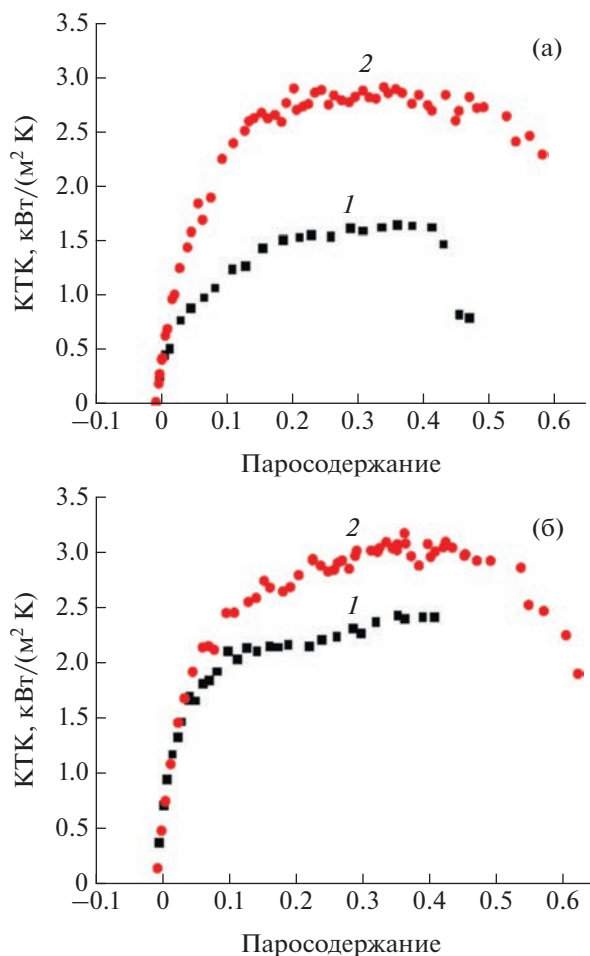


Рис. 15. Снижение локального КТК с увеличением паросодержания при использовании наножидкости графен—вода с концентрацией частиц 0.05 об. % (1) в микроканале при расходе жидкости 40 (а) и 60 мл/мин (б) [79] в сравнении с результатами для чистой воды (2).

возмущения пограничного слоя в процессе отрыва пузырьков [82].

Для чистой воды можно выделить три области теплообмена (рис. 16а), основанные на механизмах теплообмена при двухфазном проточном кипении: область I — площадь между сухим паром и поверхностью нагревателя; область II — тонкая пленка; область III — объем жидкости. Сообщается, что при испарении и кипении под паровой фазой должна быть тонкая пленка [62, 83, 84]. На рис. 16б представлены линии контакта трех фаз (твердое тело—жидкость—пар) при росте пузырьков в воде с наночастицами и четыре области теплообмена для двухфазного течения воды с наночастицами: область I — область между сухим паром и поверхностью нагревателя; область II — тонкая пленка без наночастиц; область III — объем наножидкости; область IV — тонкая пленка с наночастицами. Линия контакта трех фаз и силы, приложенные к поверхности раздела, смещаются ближе

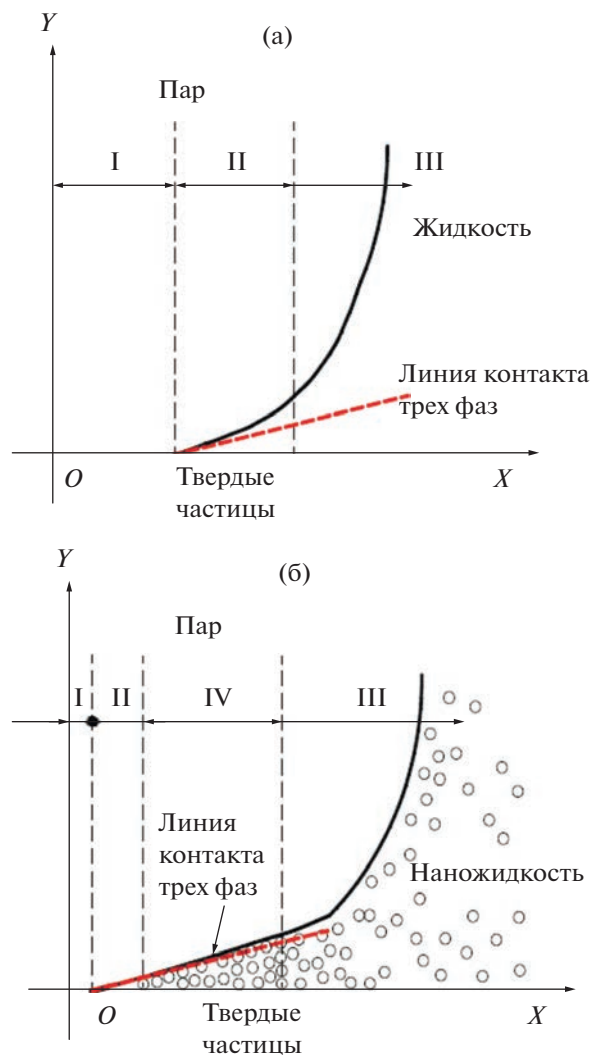


Рис. 16. Линии контакта трех фаз (твердое тело—жидкость—пар) во время роста пузырьков на нагретой поверхности: (а) — в чистой воде, (б) — наножидкостях [68].

к началу координат, а область I (между сухим паром и поверхностью нагревателя) и область II (тонкая пленка) уменьшаются за счет использования наночастиц по сравнению с чистой водой, при этом добавляется новая область (область IV) — тонкая пленка, содержащая наночастицы, и область объемной жидкости (область III) изменяется на область объемной наножидкости. Наличие наночастиц в воде приводит к увеличению общей площади пузырьков и превышению площади поверхности нагревателя [85, 86]. Рассматривая механизмы теплообмена при кипении в двухфазном потоке чистой жидкости, а также сравнивая рис. 16а и 16б, интенсификацию теплообмена с помощью наночастиц можно объяснить следующим образом [68, 80].

1) Размеры пузырьков перед отрывом в наножидкостях меньше, чем в чистой воде (базовой жидкости), что позволяет получить частые отрывы

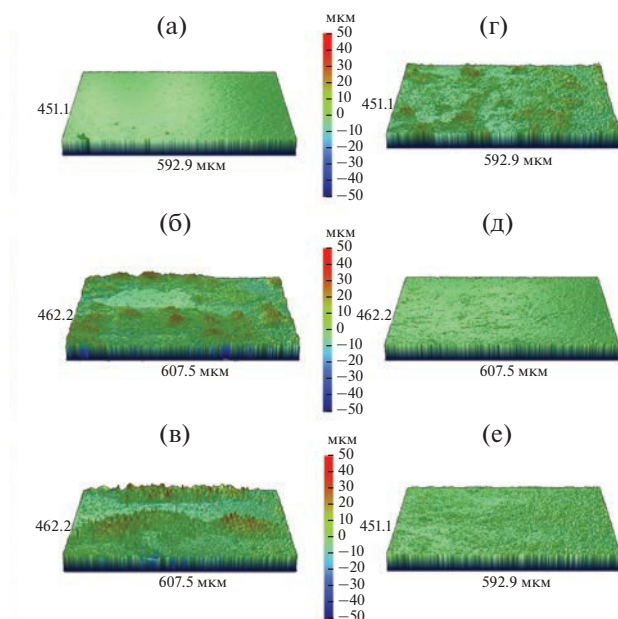


Рис. 17. Картины осаджений наночастиц различных размеров при кипении в двухфазном потоке наножидкостей в миниканале диаметром 1.1 мм (по данным [80]): (а) – канал без осаджений; (б) – наночастицы Si диаметром 25 нм; (в) – SiO₂, 15; (г) – Al₂O₃, 20–30; (д) – Al₂O₃, 40–80; (е) – SiO₂, 80.

вы миниатюрных пузырьков и приводит к интенсификации теплообмена за счет обмена холодной и горячей жидкостей при микроконвекции с возмущением пограничного слоя наножидкости при отрыве пузырька.

2) Сухая область пара (область I), где существует большое сопротивление теплообмену из-за относительно низкой теплопроводности пара, становится меньше при использовании наножидкостей, что приводит к улучшению теплообмена.

3) Доля площади тонкой пленки, содержащей наночастицы (область IV), относительно всей площади пузырьков увеличивается, что способствует интенсификации теплообмена.

4) Модификации текстуры поверхности вызваны осаждением наночастиц.

5) Наблюдается улучшение свойств рабочей жидкости, особенно поверхностного натяжения и теплопроводности.

6) Уменьшается нестабильность кипения потока (как утверждается в нескольких работах [68, 69, 71]).

Напротив, уменьшение коэффициента теплообмена при кипении в наножидкостях обосновывается следующими причинами [79, 80, 87, 88]:

1) повышенное сопротивление теплопроводности в результате осаждения наночастиц на стенки канала;

2) снижение частоты отрыва пузырьков, вызванное улучшением смачиваемости поверхности;

3) уменьшение плотности активных центров зародышеобразования, вызванное осаждением наночастиц и последующими изменениями текстуры поверхности (рис. 17).

На рис. 17 представлены изображения внутренней поверхности пробирок малого диаметра после кипения двухфазного потока наножидкости, полученные с помощью оптического профилографа с 10-кратным увеличением. В зависимости от размера наночастиц имеют место различные модели осаждения. В то время как наночастицы большего размера (40–80 нм) образуют относительно однородное осаждение с текстурой поверхности, похожей на текстуру поверхности коммерческих трубок, наночастицы меньшего размера демонстрируют явно неоднородное осаждение, характеризующееся впадинами и пиками. При оценке параметров шероховатости по изображениям установлено, что размер наночастиц влияет на распределение радиусов полостей и, следовательно, на характеристики поверхности, связанные с пузырьковым кипением [80]. В исследовании [80] наблюдалось, что более крупные наночастицы (более 40 нм) демонстрируют лучшие коэффициенты теплообмена при кипении в миниканалах, чем наночастицы меньшего размера (менее 30 нм).

Анализ характеристик, представленных на рис. 17, дает один из основных ключей к выяснению противоречий, сообщаемых в экспериментальной литературе о результатах коэффициентов теплопередачи при кипении. Из-за различных моделей осаждения наночастиц на внутренней поверхности мини- и микроканалов, связанных с различными размерами наночастиц и различным соотношением размеров наночастиц к гидравлическому диаметру микроканала, морфология поверхности и, следовательно, поведение потока при кипении (в частности, плотность активных центров нуклеации, поверхностное натяжение и смачиваемость) могут изменяться как в положительную, так и в отрицательную сторону.

2.2. Влияние наножидкостей на критический тепловой поток при двухфазном течении в мини- и микроканалах

На рис. 18 представлены режимы кипения в объеме и тепловые потоки с КТП при возрастающих перегревах поверхности. Поверхностный перегрев – это разница между температурой поверхности и температурой насыщения жидкости. Также показаны высокоскоростные и инфракрасные изображения зародышей и пленочного кипения наножидкости графен–вода. По мере увеличения перегрева происходит эволюция процесса кипения, начиная с естественной конвекции, через пузырьковое кипение, переходный режим и затем после достижения минимального теплового потока до пленочного кипения. КТП – это максимальный тепловой поток, получаемый в конце режима пу-

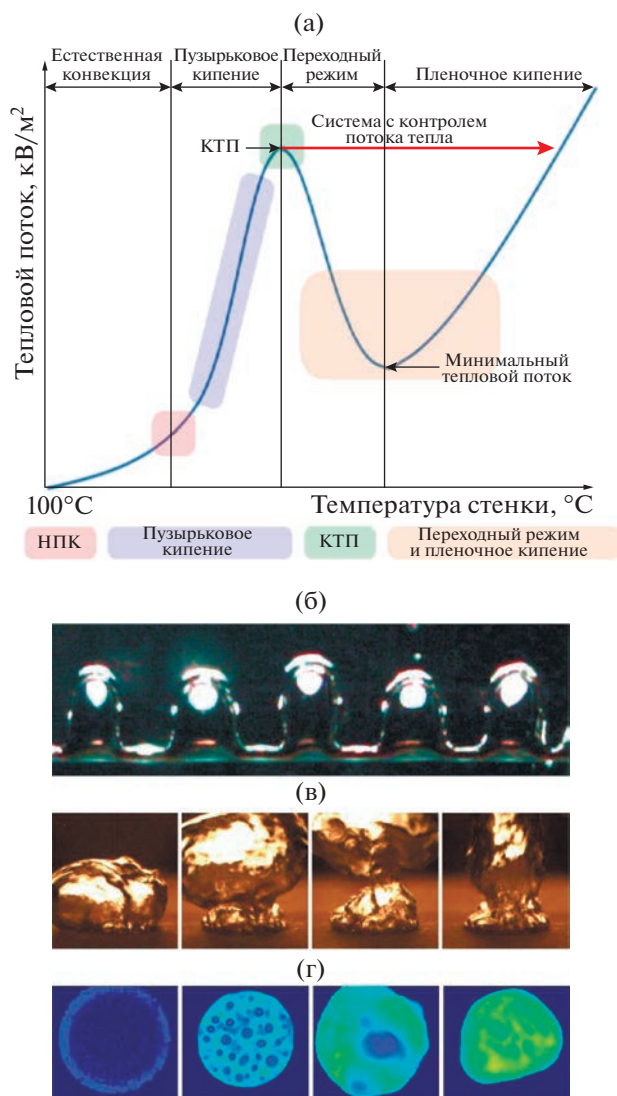


Рис. 18. Схема режимов кипения и KTP (а) и фотографии высокоскоростной съемки (б)–(г) режимов кипения наножидкости графен–вода (по данным [89]): (б) – пленочное кипение; (в) – пузырьковое кипение; (г) – инфракрасная съемка пузырькового кипения.

зрышкового кипения, и обычно после прохождения KTP тепловой поток резко снижается, если он не регулируется. Пузырьковое кипение известно как наиболее желательный и эффективный механизм теплообмена при кипении, поскольку максимальный тепловой поток может быть получен при относительно низком перегреве по сравнению с другими режимами. Таким образом, увеличение KTP при теплообмене при кипении для тепловых систем может способствовать созданию более эффективных и компактных конструкций систем охлаждения в установках кондиционирования воздуха, ядерных реакторах и т.д. Для использования пузырькового кипения в практических приложениях необходимо, чтобы подводимый поток тепла был меньше критического, поскольку

коэффициент теплообмена при кипении резко значительно снижается после точки KTP из-за потери контакта между жидкостью и твердой поверхностью, вызванной локальным прогоранием или пересыханием поверхности нагрева [82]. Предел KTP зависит от теплофизических свойств рабочего тела, величины теплового потока, условий эксплуатации и поверхностей теплообмена, поэтому важно понимать предел KTP, чтобы избежать перегрева, прогорания или других форм катастрофического нарушения работы при кипении.

В течение многих лет исследователи стремились увеличить предел KTP при кипении, чтобы повысить характеристики теплообмена и снизить эксплуатационные расходы с использованием более эффективных рабочих жидкостей. Именно здесь наножидкости могут сыграть решающую революционную роль в теплообмене за счет повышения предела KTP при кипении.

На сегодняшний день проведено множество исследований влияния наножидкостей на KTP при кипении в объеме или при кипении в конвективном потоке в стандартных каналах. Другие исследователи экспериментально изучали локальный тепловой поток с использованием наножидкостей для кипения потока в мини- и микроканалах, однако они не исследовали влияние наножидкостей на KTP. Лишь несколько работ [74, 75, 77] посвящены влиянию наножидкостей на KTP при двухфазном кипении потока в мини- и микроканалах, и в них сообщается о значительном повышении KTP при использовании наножидкостей по сравнению с базовой жидкостью. В [74] говорится о максимальном увеличении KTP (на 51%) при кипении в переохлажденном потоке при объемной концентрации наночастиц 0.1%. Как показано на рис. 19, KTP растет по мере увеличения концен-

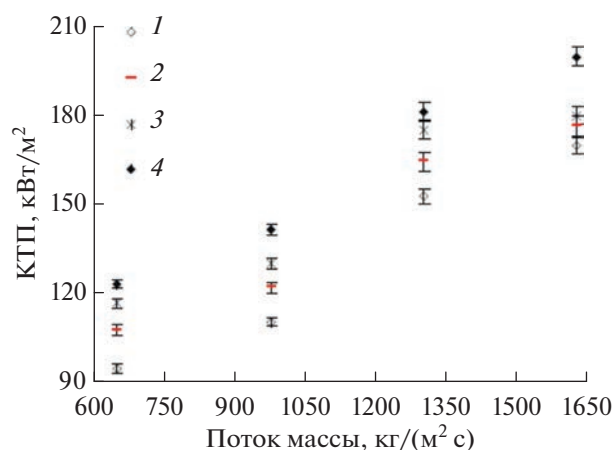


Рис. 19. KTP при изменении потока массы в микроканале (входной недогрев – 45°C) для деионизованной воды (1) и наножидкостей с различными концентрациями частиц алюминия [77]: 2 – 0.001 об. %, 3 – 0.01, 4 – 0.1.

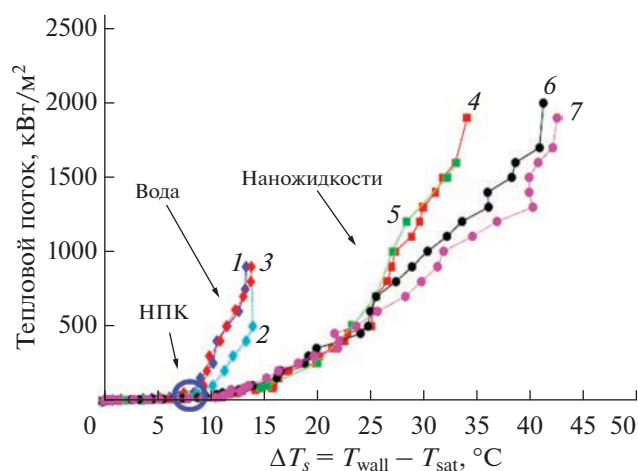


Рис. 20. Кривые кипения в объеме [91]: 1 – деионизованная вода, эксперимент № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – наножидкость 0.1 об. % кремния–вода, эксперимент № 1; 5 – № 2; 6 – 0.01 об. % алмаза–вода, № 1; 7 – № 2.

трации частиц в наножидкости при том же массовом потоке и низких объемных концентрациях. Также видно, что КТП увеличивается с ростом потока массы и начального недогрева внутри микроканала [77] за счет введения наночастиц, что существенно изменяет динамику пузырьков. При кипении наножидкостей в микроканалах в потоке наблюдалось большее количество пузырьков и меньшее время их жизни [74]. Сообщается, что увеличение КТП при использовании наножидкостей связано с более низкой вероятностью локального высыхания под замкнутым пузырем из-за меньшего времени роста пузырей. Кроме того, установлено, что краевой угол меньше у тех пузырьков, которые образуются в наножидкостях при данном объеме пузырьков [75]. Как только некоторые наночастицы осаждаются на поверхность, формируется слой пористых структур, который становится более толстым и уплотненным. В результате смачиваемость, однородность и шероховатость поверхности при кипении наножидкостей изменяются. Таким образом, из литературы [60, 75, 90] можно сделать вывод, что осаждение наночастиц и модифицированная морфология поверхности из-за наножидкостей являются основными причинами различного поведения при кипении наножидкостей, а основная причина повышения КТП при использовании наножидкостей – улучшение смачиваемости поверхности с помощью наножидкостей при кипении потока.

К сожалению, в литературе не приводятся кривые кипения базовой жидкости и наножидкости и не сравниваются для двухфазного течения наножидкостей в мини- и микроканалах. Чтобы лучше оценить влияние наножидкостей на характеристики кипения и КТП, важно выяснить, в каком направлении (вправо или влево) смещается

кривая кипения. Чтобы учесть значение направления сдвига кривой кипения, увеличение КТП во время кипения в объеме наножидкостей приведено на рис. 20 в виде кривых кипения в объеме. Следует отметить, что увеличение КТП во время кипения в потоке наножидкости во многом связано со смачиваемостью поверхности, что аналогично росту КТП при кипении в объеме наножидкости [90–92]. В отличие от КТП при кипении в потоке наножидкости, для исследования увеличения КТП при кипении наножидкости в объеме проведено множество экспериментов. Следовательно, требуются дальнейшие экспериментальные исследования по увеличению КТП при кипении потока наножидкости, чтобы лучше понять механизмы кипения потока наножидкости.

На рис. 20 показаны кривые кипения в объеме для семи экспериментов, включая три эксперимента с деионизированной водой, два с наножидкостями с 0.01 и 0.1 об. % алмаза в воде и два с 0.01 и 0.1 об. % кремнезема в воде. В [91] исследовано пузырьковое кипение и характеристики КТП для чистой воды и наножидкостей с низкой концентрацией частиц с помощью инфракрасной термометрии. Направления смещения кривых кипения наножидкостей в объеме относительно кривых для чистой воды позволяют сделать следующие выводы. Во-первых, значения КТП заметно выше, чем у чистой воды. Во-вторых, режим естественной конвекции для наножидкостей оказывается несколько более длительным, а начало пузырькового кипения (НПК) задерживается или требует более высоких температур поверхности кипения. В-третьих, поскольку кривые кипения наножидкостей существенно сдвинуты вправо по сравнению с кривыми для воды, ожидается, что эффективные КТО пузырькового кипения для всех наножидкостей будут ниже в соответствии с $h = q'' / (T_w - T_{\text{sat}})$. Аналогичные экспериментальные результаты по направлению смещения кривой кипения наножидкостей можно найти и в других работах [92–94].

Из приведенного выше обсуждения можно сделать вывод, что желательное направление сдвига кривой кипения для достижения лучших характеристик кипения – влево, которое при этом сопровождается верхним пиком критического теплового потока.

2.3. Влияние наножидкостей на паросодержание

Показано, что локальное паросодержание увеличивается вдоль канала с ростом концентрации наночастиц и уменьшением массового потока. В [67, 76] исследовалось влияние наночастиц на локальное паросодержание в мини- и микроканалах (табл. 3). На рис. 21 показаны вариации локального паросодержания вдоль микроканала для наножидкостей медь–вода и серебро–вода при различных концентрациях в сравнении с базовым флюидом (чистая вода).

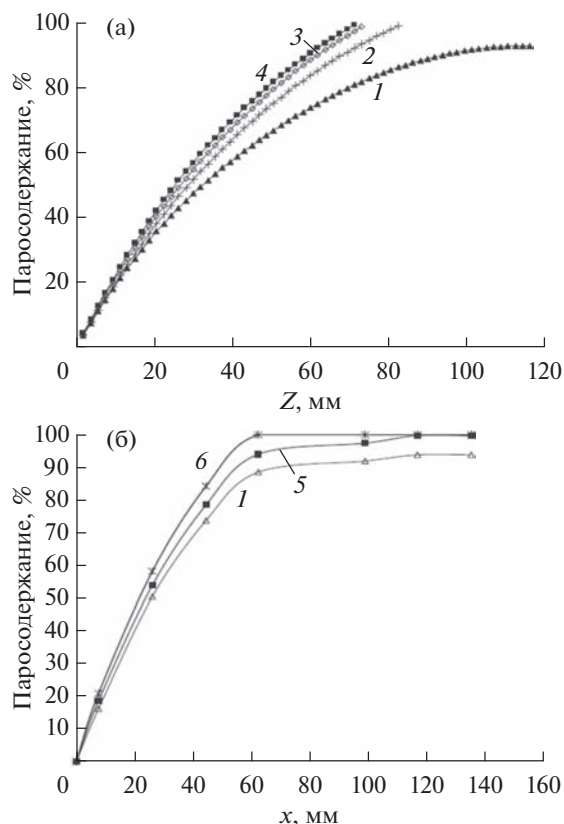


Рис. 21. Локальные паросодержания вдоль миниканала для воды (1) и наножидкостей: (а) — с наночастицами меди [67] при различных концентрациях: 2 — 5 мг/л, 3 — 10, 4 — 50; (б) — серебра [76]: 5 — 25 мг/л, 6 — 50.

2.4. Влияние наножидкостей на падение давления

Существуют противоречивые тенденции среди немногих исследований, перечисленных в табл. 3, в которых изучалось падение давления при двухфазном кипении потока наножидкости в мини- и микроканалах.

В работе [67] измерено падение давления на входе и выходе из параллельных каналов при кипении в вынужденном течении наножидкости Cu —вода при очень малых объемных концентрациях частиц. Локальный перепад давления получен из экспериментальных результатов для локальных температур поверхности и локального паросодержания. Сообщалось, что падение давления значительно увеличивалось с ростом концентрации наночастиц из-за высокой вязкости наножидкости по сравнению с водой. На рис. 22 показано изменение перепадов давления в наножидкости Cu —вода при трех различных концентрациях частиц (5, 10 и 50 мг/л) в зависимости от паросодержания. При одинаковом паросодержании локальные перепады давления больше при высоких концентрациях наночастиц, чем при более низких концентрациях и в воде без наночастиц. Однако в [68, 69] сообщается, что перепады давления при использовании наножидкостей

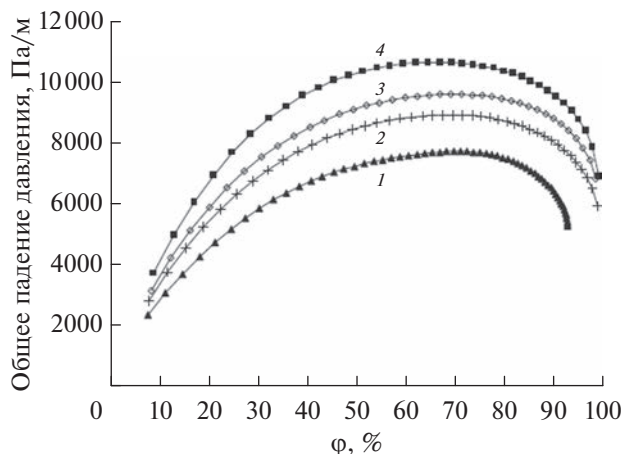


Рис. 22. Влияние концентрации наночастиц в наножидкости медь—вода на падение давления [67]: 1 — чистая вода, 2 — 5 мг/л, 3 — 10, 4 — 50.

Al_2O_3 —вода обычно ниже, чем у воды, как показано на рис. 23, и уменьшаются с увеличением объемной концентрации частиц.

2.5. Влияние наножидкостей на устойчивость кипения в потоке

Подобно тенденциям, сообщаемым о влиянии наножидкостей на коэффициент теплообмена при кипении, мнения о влиянии наночастиц на устойчивость течения при кипении оказываются в литературе противоречивыми, и поэтому нужны дальнейшие исследования, сопровождаемые более надежными, длительными экспериментами с хорошей повторяемостью, чтобы была установлена окончательная тенденция.

Среди немногих исследований по этому вопросу, которые можно найти в литературе, в [68, 69, 71] сообщается, что присутствие наночастиц вы-

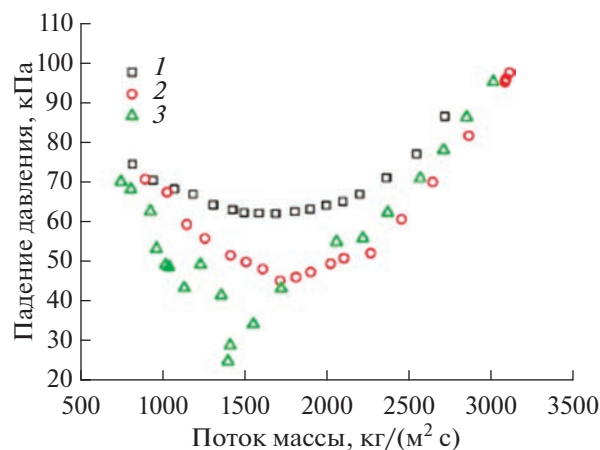


Рис. 23. Влияние концентрации наночастиц в наножидкости Al_2O_3 —вода на падение давления при тепловом потоке $q = 26.23 \text{ Вт/см}^2$ [69]: 1 — чистая вода, 2 — 0.01 об. %, 3 — 0.1.

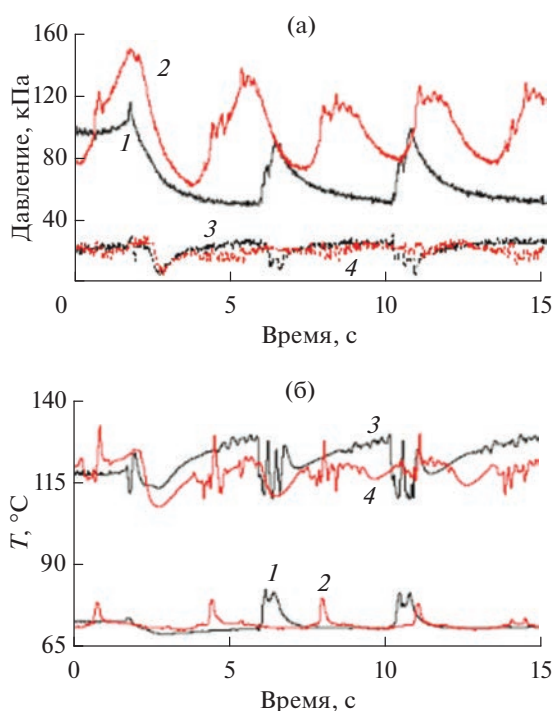


Рис. 24. Изменения входного (1, 2) и выходного (3, 4) давления воды (1, 3) и наножидкости (2, 4) с 0.01 об. % алюминия в микроканале при $q = 175 \text{ кВт/м}^2$ и потоке массы $1630 \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}$ (а); (б) — изменения входной температуры (1, 2) и температуры поверхности в самой горячей точке (3, 4) для воды (1, 3) и наножидкости (2, 4) при тех же условиях [75].

зывало меньшие колебания температуры и давления, а также задерживало начало неустойчивости потока (ННП), стабилизируя течение кипения в большей степени по сравнению с кипением чистой воды, или сообщалось об отсутствии серьезных проблем, связанных с суспензиями с наночастицами и кипением в потоке в мини- и микроканалах. Напротив, в [73–75, 77, 78] показано, что частота и амплитуда флуктуаций, особенно давления и перепада давления, больше для кипения в потоке наножидкостей по сравнению с таковыми для базовой жидкости. Вместе с тем авторы [72] рекомендовали не использовать наночастицы для двухфазного охлаждения микроканальных радиаторов. Сообщается, что, как только происходит кипение, наночастицы начинают оседать в довольно большие кластеры вблизи выхода из микроканала из-за локализованного испарения. Быстрое распространение такого явления кластеризации вверх по потоку предотвращает попадание теплоносителя в радиатор и впоследствии приводит к катастрофическому отказу системы [72].

Неустойчивость двухфазного потока при кипении обычно возникает из-за взаимодействия между внешними и внутренними характеристиками потока и может быть разделена на статическую и динамическую неустойчивости [95, 96].

Статические неустойчивости возникают, когда новые рабочие характеристики возмущенного двухфазного кипящего потока асимптотически стремятся к условиям, отличным от исходных. Например, неустойчивость Ледингега является одной из наиболее распространенных статических неустойчивостей. Второй вид неустойчивости двухфазного потока — динамическая неустойчивость — возникает, когда взаимодействие и запаздывающая обратная связь между инерцией и сжимаемостью потока играют решающую роль в стимулировании неустойчивости потока. Динамические неустойчивости в свою очередь можно разделить на три категории: колебания перепада давления, колебания волны плотности и тепловые колебания [95–97]. В настоящем обзоре больше внимания уделено динамическим неустойчивостям, состоящим в основном из двух типов (перепадов давления и тепловых (температурных) колебаний), поскольку акустические колебания оказывают незначительное влияние на двухфазное течение [68, 98].

Как сообщается в [74, 75, 77], амплитуда и частота колебаний давления на входе для наножидкости с оксидом алюминия больше, чем у базовой жидкости (воды). Рис. 24, адаптированный из [75], иллюстрирует два типа динамической неустойчивости в микроканале, связанные с изменениями давления на входе и выходе, а также изменениями температуры самой горячей поверхности и температуры на входе при 0.01 об. % оксида алюминия. Эксперимент [75] проведен для диапазона низких массовых расходов от 600 до 1950 $\text{кг/(м}^2 \text{ с)}$ с низким выходным паросодержанием (до 18%). Максимальная температура поверхности микроканала в экспериментах составляла 150°C . Согласно рис. 24а, присутствие наночастиц вызывает более сильные колебания давления с более высокими значениями и частотами, а это означает, что введение наночастиц может существенно повлиять на динамику пузырьков. Прямые визуальные наблюдения на выходе из канала в [52] выявили большее количество пузырьков с более коротким временем жизни при кипении потока наножидкостей. Однако количественный анализ режима течения на выходе из канала в экспериментах [52] не проводился. Авторы [74, 75, 77] также наблюдали, что значения изменения давления для наножидкости с оксидом алюминия даже больше, чем перепад давления вдоль канала. Считается, что флуктуации давления возникают из-за быстрого роста пузырьков внутри ограниченного микроканала. Такие большие колебания давления могут вызывать большие колебания температуры насыщения, что взаимосвязано с изменениями режима течения и впоследствии влияет на механизм кипения. Наличие длинных пузырей с высокой частотой колебаний также отражается в колебаниях температуры на входе, как показано на рис. 24б. Считается, что циклические изменения входного давления и температуры связаны с обратным течением жидкости. Тем не менее такое поведение характерно для двухфазных те-

чений в микроканалах, что приводит к образованию замкнутых пузырьков [75]. В исследованиях [74, 75] наблюдалась общая тенденция к ослаблению колебаний температуры на входе в микроканал при увеличении массового расхода. Кроме того, имел место большой разброс входной мощности, что, как предполагается, является следствием изменений сопротивления, вызванных температурным эффектом.

В этом контексте авторы [68, 69] сообщили о некоторых противоречивых результатах, указывающих на то, что наножидкости с низкой концентрацией частиц значительно уменьшают амплитуду колебаний двухфазного потока и подавляют ННП без вредных эффектов осаждения наночастиц.

Авторы [69] провели эксперименты с водными наножидкостями с 0.01 и 0.1 об. % оксида алюминия при следующих рабочих условиях: диапазон температур на входе — 80.4–90.6°C, диапазон массовых потоков — 680–3100 кг/(м² с), максимальный тепловой поток — 40.6 Вт/см², максимальное термодинамическое качество на выходе — 0.05 (5%). На рис. 25 представлены измерения [69] динамической неустойчивости, включая зависящие от времени изменения давления на входе и выходе, мощность насоса, температуры на входе и выходе, для чистой воды и наножидкости с содержанием оксида алюминия 0.1 об. %. Амплитуды колебаний для чистой воды (рис. 25а) оказались больше, чем для наножидкости (рис. 25б), что предполагает возможное подавление и смягчение колебаний двухфазного потока при использовании наножидкости. Авторы [69] пришли к выводу, что присутствие наночастиц задерживает НПК, а затем подавляет ННП. Кроме того, они считают, что степень этой задержки и подавления соизмерима с концентрацией наночастиц [69]. Предполагалось, что эти данные связаны с изменениями смачиваемости поверхности и доступными центрами зародышеобразования вследствие осаждения частиц на поверхность микроканалов, а также меньшей толщины теплового пограничного слоя, возникающего в результате сдвигового перераспределения наночастиц. Авторы [69] также пришли к выводу, что для наножидкостей преобладает неустойчивость перепада давления, сопровождающаяся меньшими колебаниями температуры, давления и массового потока.

В [68] также сообщается об аналогичной тенденции, наблюдаемой в [69]. Эксперименты [68] проведены с водной наножидкостью с 0.052 об. % оксида алюминия при следующих рабочих условиях: массовые потоки — 171, 285 и 401 кг/(м² с), диапазон тепловых потоков — 0–1000 Вт/см², температура насыщения — около 100°C. Отмечено, что в базовой жидкости (чистой воде) размер пузырьков больше, когда начинается кипение, что вызывает большее возмущение потока и большие амплитуды колебаний. Соответственно, ННП наступает раньше, чем у наножидкостей (рис. 26).

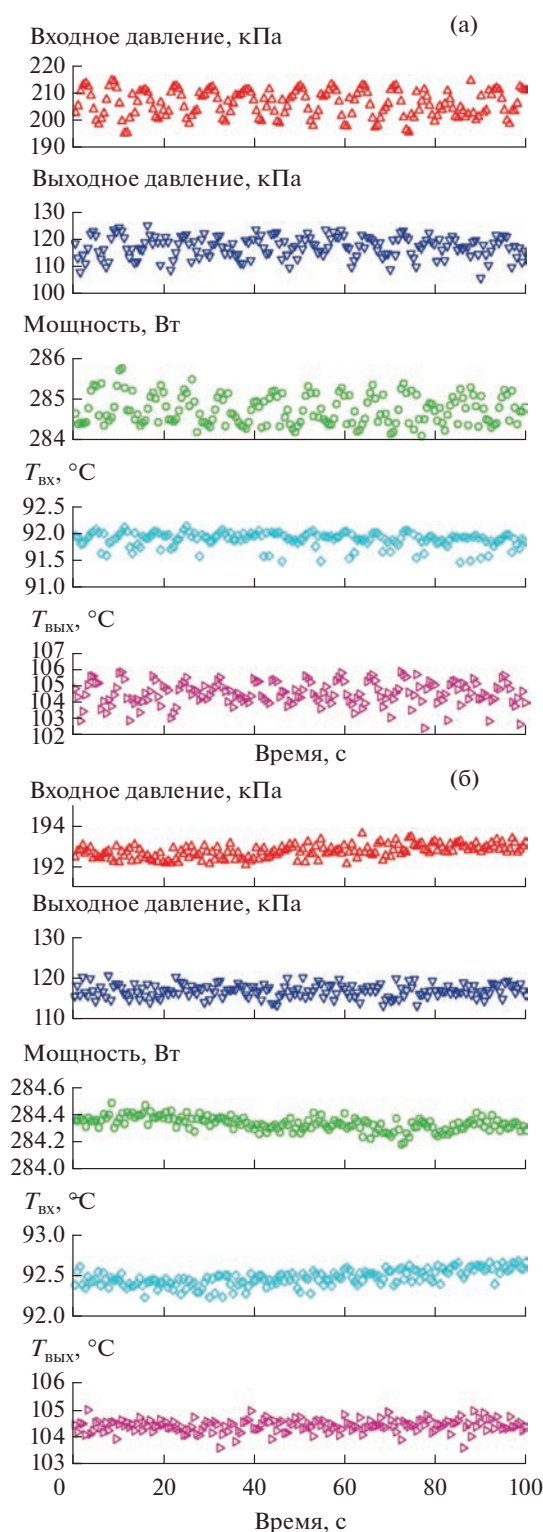


Рис. 25. Изменения входного и выходного давления, мощности и входной и выходной температуры: (а) — чистой воды при массовом потоке 1054.4 кг/(м² с), тепловом потоке 29.9 Вт/см², температуре насыщения 91.9°C; (б) — наножидкости с содержанием 0.1 об. % частиц алюминия при потоке массы 1065.9 кг/(м² с), потоке тепла 29.9 Вт/см², температуре насыщения 92.5°C [69].

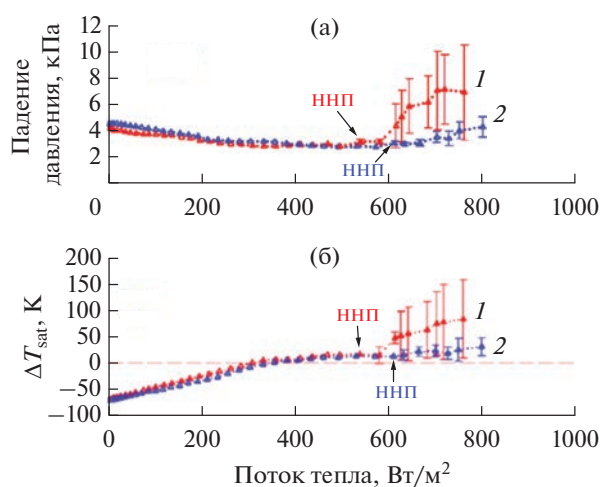


Рис. 26. Падение давления (а) и разница температур поверхности и насыщения жидкости (б) в зависимости от теплового потока при $T_{\text{вх}} = 27^\circ\text{C}$ [68]: 1 – чистая вода, поток массы – $285.4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$; 2 – наножидкость, 286.4 .

Напротив, для наножидкостей кипение потока было постоянно стабильным или квазистабильным. В [68] замечено, что при использовании наножидкостей миниатюрные пузырьки были основной структурой потока в микроканалах, но эти пузырьки никогда не сливались друг с другом.

3. ПРЕДЛОЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Принимая во внимание сообщаемые противоречивые тенденции для коэффициента теплопередачи, перепада давления и стабильности потока, одной из основных проблем можно считать достоверность данных о кипении двухфазного потока. В связи с этим необходимы тщательные и продолжительные эксперименты с повторением в дальнейших исследованиях для получения надежных и воспроизводимых данных о теплообмене в стабильных условиях эксплуатации, в том числе в контролируемых условиях с низкой степенью неопределенности. Также настоятельно рекомендуется сначала провести однофазные эксперименты до начала испытаний на кипение потока.

Показатель тепловых потерь является одним из важнейших факторов, существенно влияющих на надежность и точность измерения паросодержания в экспериментах по кипению в потоке [99]. Измерение паросодержания в свою очередь играет ключевую роль в определении локального коэффициента теплообмена при кипении потока [100]. Соответственно, для точного исследования влияния паросодержания на коэффициент теплообмена при кипении потока большое значение имеют точная оценка тепловых потерь и последующая калибровка запасов скрытой теплоты.

Следующий обязательный шаг – сравнение результатов кипения базовых жидкостей (например, воды) с результатами других исследований и экспериментальными корреляциями в литературе. Исследователи могут инициировать процессы сбора и анализа данных по кипению потока наножидкостей, чтобы сравнить эффективность с их результатами кипения потока базовой жидкости.

После проведения экспериментов с кипением потока настоятельно рекомендуется воспользоваться надлежащей методикой определения характеристик для изучения и сравнения картины осаждения наночастиц на внутренней поверхности экспериментального мини- или микроканала для различных размеров наночастиц, а также для базовой жидкости. Поскольку наночастицы разных размеров могут образовывать различные текстуры поверхности и вызывать изменения в морфологии, это, следовательно, будет в огромной степени влиять на характеристики кипения за счет изменения плотности активных центров зародышеобразования, поверхностного натяжения и смачиваемости.

На поведение теплопередачи влияют многие другие параметры, такие как объемная концентрация, размер наночастиц, геометрия мини- и микроканалов (в основном включает в себя форму, гидравлический диаметр, соотношение сторон, покрытие и коэффициенты поверхностного трения), базовая жидкость, режим течения, скорость потока, температура процесса и входные эффекты. До сих пор нет четкого понимания данных параметров, что указывает на необходимость дальнейших эмпирических исследований. Помимо ограниченного количества экспериментальных работ по этой теме, также существует очень мало исследований по моделированию двухфазного кипения потока наножидкостей в мини- и микроканалах. Необходима дальнейшая работа, чтобы сосредоточить внимание на результатах новых моделей и корреляций для точного прогнозирования теплообмена при кипении двухфазного потока с небольшими отклонениями, а затем разработать общие корреляции для использования в практических (промышленных) приложениях.

В большинстве исследований в данной области сообщается о пористом характере осадений наночастиц на поверхности нагревателя после интенсивного кипения наножидкостей. Предполагается, что получаемый пористый слой ответственен за рост критического теплового потока [73, 93]. Если это так, можно также рекомендовать дальнейшие исследования модификации поверхности для улучшения теплообмена при кипении двухфазного потока. Поверхность, покрытая наночастицами, может обладать значительными преимуществами [101, 102], начиная от увеличения КТП и заканчивая устранением существующих опасений по поводу возможного засорения/блокировки проходного сечения, вызванного

го наночастицами, а также опасений по поводу нежелательных изменений в морфологии поверхности кипения в результате различных режимов осаждения. Однако важно отметить, что у такой пористой поверхности низкая прочность и в настоящее время она не может быть достаточно надежной. Кроме того, по-прежнему необходима лучшая оценка характеристик слоя наночастиц и процесса нанесения покрытия на поверхность нагревателя, чтобы оптимизировать процесс покрытия наночастицами для применений теплообмена с кипящим потоком.

Использование внешнего магнитного поля для наножидкостей в последнее время привлекло огромное внимание, поскольку оно может влиять как на свойства наножидкостей, так и на управление потоком жидкости для широкого круга важных приложений, таких как управление потоком в микрофлюидных цепях, приложения для доставки лекарств или другие важные биомедицинские приложения. Магнитные наножидкости, также известные как феррожидкости, представляют собой коллоидные суспензии, содержащие магнитные наночастицы со средним диаметром 10 нм и жидкую фазу-носитель для создания различных структур из наночастиц [103, 104]. Таким образом, эффективную теплопроводность наножидкостей можно регулировать путем соответствующего управления внешним магнитным полем. Также допустимо использовать внешнее магнитное поле в качестве “привода” феррожидкостей, так что этот вид наножидкостей сможет двигаться по градиенту магнитного поля с возможностью создания микронасоса без каких-либо движущихся частей. Влияние структуры частиц на другие эффективные свойства наножидкостей, особенно на вязкость, удельную теплоемкость, смачиваемость и поверхностное натяжение, также необходимо тщательно оценивать, поскольку выигрыш от теплопроводности может быть компенсирован нежелательными эффектами вязкости и удельной теплоемкости. Будущие исследования также должны быть больше сосредоточены на связи между реологией и термическими свойствами, равно как и на взаимодействиях наночастиц с жидкостью и поверхностью. Либо использование феррожидкостей, подвергаемых воздействию внешнего магнитного поля для управления характеристиками потока жидкости, либо использование хорошо спроектированных поверхностей, покрытых наночастицами, либо и то, и другое можно рассматривать как альтернативу для уменьшения агрегации частиц и предотвращения закупорки канала для потока, при этом все еще обладающую достоинствами улучшения КТП и повышения коэффициента теплообмена при кипении потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение кипения наножидкостей в микроканалах все еще находится в зачаточном состоянии.

В то время как большинство исследований сосредоточены либо на кипении в объеме, либо на кипении потока в обычных каналах, на сегодняшний день проведено ограниченное количество исследований по кипению потока наножидкостей в мини- и микроканалах. Судя по наблюдениям, в этих исследованиях имеется качественное согласие по поводу увеличения критического теплового потока с использованием наножидкостей при кипении двухфазного потока в мини- и микроканалах. Однако существуют противоречивые тенденции, особенно для коэффициента теплообмена при кипении, двухфазного перепада давления, устойчивости течения. Помимо неоднозначности в отношении надежности и достоверности собранных данных о теплообмене при кипении, ключ к выяснению противоречий, отраженных в литературе по коэффициенту теплообмена при кипении, может заключаться в различных схемах осаждения наночастиц разного размера на внутреннюю поверхность трубки. Размер, форма и материал наночастиц, а также отношение размера наночастиц к гидравлическому диаметру канала оказывают влияние на характер осаждения и текстуру поверхности, что в свою очередь впоследствии может влиять на плотность активных центров зародышеобразования, поверхностное натяжение и смачиваемость. Следовательно, изучение и сравнение моделей осаждения с помощью различных методов необходимо для исследования характеристик теплообмена при кипении наножидкостей в микроканалах.

На основе собранных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что двухфазное кипение наножидкостей в мини- и микроканалах способствует вероятному улучшению характеристик теплообмена при использовании наножидкостей с частицами оксидов металлов или металлических наночастиц с очень низкими объемными концентрациями (например, ≤ 0.05 об. %), а отношение размера наночастиц к гидравлическому диаметру канала обычно меньше 0.5×10^{-4} . Другим предполагаемым подходом к интенсификации теплообмена при кипении в потоке является модификация поверхности путем покрытия наночастицами без использования наножидкостей в качестве рабочей жидкости, чтобы снизить вероятность возможного засорения, а также нежелательного изменения морфологии поверхности при кипении наножидкостей в микроканальных радиаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kandlikar S.G., Garimella S., Li D., Colin S., King M.* Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Elsevier, 2006.
2. *Kandlikar S.G., Steinke M.E.* Examples of Microchannel Mass Transfer Processes in Biological Systems // Proc. 1st Int. Conf. Minichannels and Microchannels. Rochester, N.Y., April 24–25. ASME. 2003. Paper ICMM2003-1124. P. 933.

3. *Mehendale S.S., Jacobi A.M., Shah R.K.* Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales with Applications to Heat Exchanger Design // *Appl. Mech. Rev.* 2000. V. 53. P. 175.
4. *Kandlikar S.G., Grande W.G.* Evolution of Microchannel Flow Passages – Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology // *Heat Transfer Eng.* 2003. V. 24. P. 3.
5. *Cheng P., Wu H.Y., Hong F.J.* Phase-change Heat Transfer in Microsystems // *J. Heat Transfer. ASME.* 2007. V. 129. P. 101.
6. *Wen D., Lin G., Vafaei S., Zhang K.* Review of Nanofluids for Heat Transfer Applications // *Particuology.* 2009. V. 7. P. 141.
7. *Choi S.U.S., Eastman J.A.* Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles // *Proc. Int. Mech. Engineering Congress and Exposition, ASME.* San Francisco, CA, USA. 12–17 November. 1995.
8. *Henderson K., Park Y.G., Liu L., Jacobi A.M.* Flow-boiling Heat Transfer of R-134a-based Nanofluids in a Horizontal Tube // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2010. V. 53. P. 944.
9. *Barber J., Brutin D., Tadrist L.* A Review on Boiling Heat Transfer Enhancement with Nanofluids // *Nanoscale Res. Lett.* 2011. V. 6. P. 280.
10. *Ali N., Teixeira J.A., Addali A.* A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties // *J. Nanomaterials.* 2018. V. 2018. 6978130.
11. *Choi S.U.S., Eastman J.A.* Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. Argonne National Lab., US Department of Energy, 1995.
12. *Czaplicka N., Grzegórska A., Wajs J., Sobczak J., Rogala A.* Promising Nanoparticle-based Heat Transfer Fluids – Environmental and Techno-economic Analysis Compared to Conventional Fluids // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22. № 17. P. 9201.
13. *Timofeeva E.V.* Nanofluids for Heat Transfer – Potential and Engineering Strategies // *Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling.* 2011. <https://doi.org/10.5772/22158>
14. *Noori T., Ghangrekar M.M., Mitra A., Mukherjee C.K.* Enhanced Power Generation in Microbial Fuel Cell Using MnO₂ Catalyzed Cathode Treating Fish Market Wastewater // *Int. Conf. Recent Advances in Bio-energy Research (ICRABR).* Kapurthala, India. March 14–17. 2015.
15. *Said Z., Saidur R.* Thermophysical Properties of Metal Oxides Nanofluids. In: *Nanofluid Heat and Mass Transfer in Engineering Problems* / Ed. Kandelousi M.S. London: InTech, 2017. <https://doi.org/10.5772/65610>
16. *Li Z., Sarafraz M.M., Mazinani A., Hayat T., Alsulami H., Goodarzi M.* Pool Boiling Heat Transfer to CuO–H₂O Nanofluid on Finned Surfaces // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2020. V. 156. P. 119780.
17. *Nakhchi M.E., Esfahani J.A.* Numerical Investigation of Turbulent Cu–Water Nanofluid in Heat Exchanger Tube Equipped with Perforated Conical Rings // *Adv. Powder Technol.* 2019. V. 30. P. 1338–1.
18. *Hadavand M., Yousefzadeh S., Akbari O.A., Pourfattah F., Nguyen H.M., Asadi A.* A Numerical Investigation on the Effects of Mixed Convection of Ag–Water Nanofluid inside a Sim-circular Lid-driven Cavity on the Temperature of an Electronic Silicon Chip // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 162. P. 114298.
19. *Anu Mary Ealia S., Saravanakumar M.P.* A Review on the Classification, Characterization, Synthesis of Nanoparticles and Their Application // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering.* 2017. V. 263. P. 032019.
20. *Xie H.Q., Wang J., Xi T., Liu Y., Ai F.* Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. P. 4568.
21. *Kim S.H., Choi S.R., Kim D.* Thermal Conductivity of Metal-oxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation // *Trans. ASME C.* 2007. V. 129. P. 298.
22. *Li C.H., Peterson G.P.* The Effect of Particle Size on the Effective Thermal Conductivity of Al₂O₃–Water Nanofluids // *J. Appl. Phys.* 2007. P. 101044312.
23. *Chon C.H., Kihm K.D.* Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 87. P. 153107.
24. *Yu W.H., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.* Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // *Heat Transfer Eng.* 2008. V. 29. P. 432.
25. *Beck M.P., Yuan Y., Warriar P., Teja A.S.* The Effect of Particle Size on the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids // *J. Nanopart. Res.* 2009. V. 11. P. 1129.
26. *Lu W.Q., Fan Q.M.* Study for the Particle's Scale Effect on Some Thermophysical Properties of Nanofluids by a Simplified Molecular Dynamics Method // *Eng. Anal. Boundary Elem.* 2008. V. 32. P. 282.
27. *Gang C., Yu W., Singh D., Cookson D., Routbort J.* Application of SAXS to the Study of Particle-size-dependent Thermal Conductivity in Silica Nanofluids // *J. Nanopart. Res.* 2008. V. 10. P. 1109.
28. *Lee J.H., Lee S.H., Jang S.P.* Do Temperature and Nanoparticle Size Affect the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids? // *Appl. Phys. Lett.* 2014. V. 104. P. 161908.
29. *Pryazhnikov M.I., Minakov A.V., Rudyak V.Y., Guzei D.V.* Thermal Conductivity Measurements of Nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2017. V. 104. № 1. P. 1275.
30. *Zhu H.T., Zhang C.Y., Tang Y.M., Wang J.X.* Novel Synthesis and Thermal Conductivity of CuO Nanofluid // *J. Phys. Chem. C.* 2007. V. 111. № 4. P. 1646.
31. *Keblinski P., Prasher R., Eapen J.* Thermal Conductance of Nanofluids: Is the Controversy Over? // *J. Nanopart. Res.* 2008. V. 10. P. 1089.
32. *Rudyak V.Y., Belkin A.A.* Simulation of Transport Coefficients // *Nanosystems: Phys. Chem. Math.* 2010. V. 1. № 1. P. 156.
33. *Rudyak V.Y., Belkin A.A., Tomilina E.A.* On the Thermal Conductivity of Nanofluids // *Tech. Phys. Lett.* 2010. V. 36. № 14. P. 49.
34. *Pozhar L.A.* Structure and Dynamics of Nanofluids: Theory and Simulations to Calculate Viscosity // *Phys. Rev. E.* 2000. V. 61. P. 1432.
35. *Chang H., Jwo C.S., Lo C.H., Tsung T.T.* Rheology of CuO Nanoparticle Suspension Prepared by ASNSS // *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2005. V. 10. P. 128.
36. *McPhie M.G., Daivis P.J., Snook I.K.* Viscosity of a Binary Mixture: Approach to the Hydrodynamic Limit // *Phys. Rev. E.* 2006. V. 74. P. 031201.
37. *Imofeeva E.V., Gavrilov A.N., McCloskey J.M., Tolmachev Y.V., Sprunt S., Lopatina L.M., Selinger J.V.* Thermal Conductivity and Particle Agglomeration in

- Alumina Nanofluids: Experiment and Theory // Phys. Rev. E. 2007. V. 76. P. 061203.
38. Conway B.E., Dobry-Duclaux A. Viscosity of Suspensions of Electrically Charged Particles and Solutions of Polymeric Electrolyte // Rheology: Theory and Applications. 1960. V. 3. P. 83.
 39. Nguyen C.T., Desgranges F., Roy G., Galanis N., Mare T., Boucher S., Mints H.A. Temperature and Particle-size Dependent Viscosity Data for Water-based-nanofluids-hysteresis Phenomenon // Int. J. Heat Fluid Flow. 2007. V. 28. P. 1492.
 40. Hashiba M., Okamoto H., Nurishi Y., Hiramtsu K. The Zeta-potential Measurement for Concentrated Aqueous Suspensions by Improved Electrophoretic Mass-transport Apparatus—Application to Al_2O_3 , ZrO_3 , and SiC Suspensions // J. Mater. Sci. 1988. V. 23. P. 2893.
 41. Timofeeva E.V., Smith S.C., Yu W., France D.M., Singh D., Routbort J.L. Particle Size and Interfacial Effects on Thermo-physical and Heat Transfer Characteristics of Water-based α - SiC Nanofluids // Nanotechnology. 2010. V. 21. P. 215703.
 42. Chen H.S., Yang W., He Y.R., Ding Y.L., Zhang L.L., Tan C.Q. Heat Transfer and Flow Behavior of Aqueous Suspensions of Titanate Nanotubes (Nanofluids) // Powder Technol. 2008. V. 183. P. 63.
 43. Tseng W.J., Lin K.C. Rheology and Colloidal Structure of Aqueous TiO_2 Nanoparticle Suspensions // Mater. Sci. Eng. A. 2003. V. 355. P. 186.
 44. Ramesh G., Prabhu N. Review of Thermo-physical Properties, Wetting and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids and Their Applicability in Industrial Quench Heat Treatment // Nanoscale Res. Lett. 2011. V. 6. P. 334.
 45. Ahammed N., Asirvatham L.G., Wongwises S. Effect of Volume Concentration and Temperature on Viscosity and Surface Tension of Graphene—Water Nanofluid for Heat Transfer Applications // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 123. P. 1399.
 46. Elias M.M., Mahbubul I.M., Saidur R., Sohel M.R., Shahrul I.M., Khaleduzzaman S.S., Sadeghipour S. Experimental Investigation on the Thermo-physical Properties of Al_2O_3 Nanoparticles Suspended in Car Radiator Coolant // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2014. V. 54. P. 48.
 47. Das S.K., Narayan G.P., Baby A.K. Survey on Nucleate Pool Boiling of Nanofluids: The Effect of Particle Size Relative to Roughness // J. Nanopart. Res. 2008. V. 10. P. 1099.
 48. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool Boiling Characteristics of Nano-fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 851.
 49. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 4105.
 50. Kathiravan R., Kumar R., Gupta A. Characterization and Pool Boiling Heat Transfer Studies of Nanofluids // J. Heat Transfer. 2009. V. 131. P. 1.
 51. Murshed S.M., Tan S.H., Nguyen N.T. Temperature Dependence of Interfacial Properties and Viscosity of Nanofluids for Droplet-based Microfluidics // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 1.
 52. Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of Heated Surfaces Under Pool Boiling Using Surfactant Solutions and Nano-fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 3025.
 53. Peng H., Ding G., Hu H., Jiang W. Influence of Carbon Nanotubes on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Refrigerant-oil Mixture // Int. J. Therm. Sci. 2010. V. 49. P. 2428.
 54. Khaleduzzaman S.S., Mahbubul I.M., Shahrul I.M., Saidur S. Effect of Particle Concentration, Temperature and Surfactant on Surface Tension of Nanofluids // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2013. V. 49. P. 110.
 55. Moosavi M., Goharshadi E.K., Youssefi A. Fabrication, Characterization, and Measurement of Some Physicochemical Properties of ZnO Nanofluids // Int. J. Heat Fluid Flow. 2010. V. 31. P. 599.
 56. Tanvir S., Qiao L. Surface Tension of Nanofluid-type Fuels Containing Suspended Nanomaterials // Nanoscale Res. Lett. 2012. V. 7. P. 226.
 57. Sefiane K., Skilling J., MacGillivray J. Contact Line Motion and Dynamic Wetting of Nanofluid Solutions // Adv. Colloid Interface Sci. 2008. V. 138. P. 101.
 58. Vassallo P., Kumar R., Damico S. Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica—Water Nano-fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 407.
 59. Kim H., Kim J., Kim M.H. Effect of Nanoparticles on CHF Enhancement in Pool Boiling of Nano-fluids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 5070.
 60. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Effects of Nanoparticle Deposition on Surface Wettability Influencing Boiling Heat Transfer in Nanofluids // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 153107.
 61. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Study of Pool Boiling and Critical Heat Flux Enhancement in Nanofluids // Bull. Pol. Acad. Sci.: Tech. Sci. 2007. V. 55. P. 211.
 62. Wen D. Mechanisms of Thermal Nanofluids on Enhanced Critical Heat Flux (CHF) // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 4958.
 63. Wen D., Zhang L., He Y. Flow and Migration of Nanoparticle in a Single Channel // Heat Mass Transfer. 2009. V. 45. P. 1061.
 64. Lee J., Yoon Y.J., Eaton J.K., Goodson K.E., Bai S.J. Analysis of Oxide (Al_2O_3 , CuO , and ZnO) and CNT Nanoparticles Disaggregation Effect on the Thermal Conductivity and the Viscosity of Nanofluids // Int. J. Precision Eng. Manufacturing. 2014. V. 15. P. 703.
 65. Steinke M.E., Kandlikar S.G. An Experimental Investigation of Flow Boiling Characteristics of Water in Parallel Microchannels // J. Heat Transfer. 2004. V. 126. P. 518.
 66. Kandlikar S.G. High Flux Heat Removal with Microchannels — A Roadmap of Opportunities and Challenges // Proc. 3rd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels, Keynote Paper, ASME. Toronto, Canada. 2005. Jun. 13–15. Paper 75086.
 67. Boudouh M., Gualous H.L., De Labacherie M. Local Convective Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of Nanofluid in Narrow Rectangular Channels // Appl. Therm. Eng. 2010. V. 30. P. 2619.
 68. Xu L., Xu J. Nanofluid Stabilizes and Enhances Convective Boiling Heat Transfer in a Single Microchannel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 5673.
 69. Yu L., Sur A., Liu D. Flow Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow Instability of Nanofluids in a Minichannel // J. Heat Transfer. 2015. V. 137. P. 051502-1.
 70. Cheng P., Wu H.Y., Hong F.J. Phase-change Heat Transfer in Microsystems // J. Heat Transfer Trans. ASME. 2007. V. 129. P. 101.

71. Faulkner D., Khotan M., Shekarri R. Practical Design of a 1000 W/cm² Cooling System (High Power Electronics) // 19th IEEE Semi-Therm. Symposium. 2003. P. 223.
72. Lee J., Mudawar I. Assessment of the Effectiveness of Nanofluids for Single-Phase and Two-Phase Heat Transfer in Micro-channels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 452.
73. Khanikar V., Mudawar I., Fisher T. Effects of Carbon Nanotube Coating on Flow Boiling in a Micro-channel // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3805.
74. Vafaei S., Wen D. Critical Heat Flux (CHF) of Subcooled Flow Boiling of Alumina Nanofluids in a Horizontal Microchannel // J. Heat Transfer. 2010. V. 132. P. 102404-1.
75. Vafaei S., Wen D. Flow Boiling Heat Transfer of Alumina Nanofluids in Single Microchannels and the Roles of Nanoparticles // J. Nanopart. Res. 2011. V. 13. P. 1063.
76. Chehade A.A., Gualous H.L., Masson S.L., Fardoun F., Besq A. Boiling Local Heat Transfer Enhancement in Minichannels Using Nanofluids // Nanoscale Res. Lett. 2013. V. 8. P. 130.
77. Vafaei S., Wen D. Critical Heat Flux of Nanofluids Inside a Single Microchannel: Experiments and Correlations // Chem. Eng. Res. Design. 2014. V. 92. P. 2339.
78. Duursma G., Sefiane K., Dehaene A., Harmand S., Wang Y. Flow and Heat Transfer of Single and Two-Phase Boiling of Nanofluids in Microchannels // Heat Transfer Eng. 2015. V. 36. P. 1252.
79. Zhang C., Zhang L., Xu H., Wang D., Ye B. Investigation of Flow Boiling Performance and the Resulting Surface Deposition of Graphene Oxide Nanofluid in Microchannels // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. V. 86. P. 1.
80. Moreira T.A., Nascimento F.J., Ribatski G. An Investigation of the Effect of Nanoparticle Composition and Dimension on the Heat Transfer Coefficient During Flow Boiling of Aqueous Nanofluids in Small Diameter Channels (1.1 mm) // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. V. 89. P. 72.
81. Dong S., Jiang H., Xie Y., Wang X., Hu Z., Wang J. Experimental Investigation on Boiling Heat Transfer Characteristics of Al₂O₃–Water Nanofluids in Swirl Microchannels Subjected to An Acceleration Force // Chin. J. Aeronautics. 2019. V. 32. № 5. P. 1136.
82. Lee J., Mudawar I. Critical Heat Flux for Subcooled Flow Boiling in Micro-channel Heat Sinks // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 3341.
83. Thome J.R., Dupont V., Jacobi A.M. Heat Transfer Model for Evaporation in Microchannels. Part I: Presentation of the Model // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. P. 3375.
84. Yarin L.P., Mosyak A., Hetsroni G. Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels. Springer, 2009.
85. Wasan D.T., Hikalov A.D. Spreading of Nanofluids on Solids // Nature. 2001. V. 423. P. 156.
86. Chengara A., Nikolov A.D., Wasan D.T., Trokhymchuk A., Henderson D. Spreading of Nanofluids Driven by the Structural Disjoining Pressure Gradient // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 280. P. 192.
87. Diao Y.H., Liu Y., Wang R., Zhao Y.H., Guo L., Tang X. Effects of Nanofluids and Nanocoating on Thermal Performance of an Evaporator with Rectangular Micro-channels // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 67. P. 183.
88. Sarafraz M.M., Hormozi F. Convective Boiling and Particulate Fouling of Stabilized CuO–Ethylene Glycol Nanofluids Inside Annular Heat Exchanger // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2014. V. 53. P. 116.
89. <http://ahnlab.inu.ac.kr>
90. Ahn H.S., Kim H., Jo H.J., Kang S.H., Chang W.P., Kim M.H. Experimental Study of Critical Heat Flux Enhancement During Force Convective Flow Boiling of Nanofluid on a Short-Heated Surface // Int. J. Multiphase Flow. 2010. V. 36. P. 375.
91. Gerardi C., Buongiorno J., Hu L.W., McKrell T. Infra-red Thermometry Study of Nanofluid Pool Boiling Phenomena // Nanoscale Res. Lett. 2011. V. 6. P. 232.
92. Bang I.C., Chang S.H. Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃–Water Nano-fluids from a Plain Surface in a Pool // Int. J. Heat Mass Transfer. 2005. V. 48. P. 2407.
93. Ahn H.S., Kim M.H. A Review on Critical Heat Flux Enhancement with Nanofluids and Surface Modification // J. Heat Transfer. 2012. V. 134. P. 024001-1.
94. Cieslinski J.T., Kaczmarczyk T.Z. Pool Boiling of Water–Al₂O₃ and Water–Cu Nanofluids on Horizontal Smooth Tubes // Nanoscale Res. Lett. 2011. V. 6. P. 220.
95. Karsli S., Yilmaz M., Comakli O. The Effect of Internal Surface Modification on Flow Instabilities in Forced Convection Boiling in a Horizontal Tube // Int. J. Heat Fluid Flow. 2002. V. 23. P. 776.
96. Boure J.A., Bergles A.E., Tong L.S. Review of Two-Phase Flow Instability // Nucl. Eng. Des. 1973. V. 25. P. 165.
97. Ruspini L.C., Marcel C.P., Clause A. Two-phase Flow Instabilities: A Review // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 71. P. 521.
98. Carey V.P. Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena. N.Y.: Taylor & Francis, 1992.
99. Kabir M., Xu J. Experimental Approaches to Measurement of Vapor Quality of Two-Phase Flow Boiling // Heat Transfer – Design, Experimentation, and Applications. Intech Open, 2020.
100. Kabir M., Gameda T., Preller E., Xu J. Design and Development of a PCM-Based Two-Phase Heat Exchanger Manufactured Additively for Spacecraft Thermal Management Systems // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 180. P. 121782.
101. Шустов М.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Покрытие микроканала наночастицами – эффективный метод повышения критической тепловой нагрузки // Теплоэнергетика. 2017. Т. 64. № 4. С. 72.
102. 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. Т. 61. № 3. С. 35.
103. Sidik N.A.C., Adamu I.M., Jamil M.M., Kefayati G.H.R., Mamat R., Najafi G. Recent Progress on Hybrid Nanofluids in Heat Transfer Applications: A Comprehensive Review // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2016. V. 78. P. 68.
104. M'hamed B., Sidik N.A.C., Yazid M.N.A.W.M., Mamat R., Najafi G., Kefayati G.H.R. A Review on Why Researchers Apply External Magnetic Field on Nanofluids // Int. Commun. Heat Mass Transfer. 2016. V. 78. P. 60.