

На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'АВ Мин', with a long, sweeping flourish extending downwards and to the right.

Минаков Андрей Викторович

ИЗУЧЕНИЕ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ В МИКРОКАНАЛАХ И
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОЖИДКОСТЕЙ

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Красноярск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ).

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор
Рудяк Валерий Яковлевич.

Официальные оппоненты:

Бардаханов Сергей Прокопьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Смирнов Евгений Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор высшей школы прикладной математики и вычислительной физики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Защита состоится «24» декабря 2021 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теплофизики СО РАН, www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор Кузнецов Владимир Васильевич

Актуальность темы и степень ее проработанности. В настоящее время в силу разных причин происходит революционное развитие микросистемной техники различного назначения. Соответствующие технологии вошли в Перечень критических технологий Российской Федерации. Микросистемная техника обладает очевидными преимуществами (энергоэффективность и низкая материалоемкость) и уже активно используется в самых разных приложениях: при создании новых образцов компьютерной техники, в различных биомедицинских технологиях, в фармацевтической промышленности и т. д.

Значительная часть микросистемного оборудования так или иначе связана с течениями жидкостей и газов в микроканалах. Течения жидкостей в микроканалах характеризуется существенным влиянием капиллярных сил и пристеночных эффектов на режимы течения и процессы теплообмена. В этих условиях могут осуществляться режимы, нехарактерные для каналов большого диаметра. Микроканалы с размерами порядка 100 мкм в настоящее время широко используются в микротеплообменниках для охлаждения электроники, в микрореакторах для высокоэффективного синтеза химических продуктов, в медицине и фармацевтике в качестве лабораторий на чипе и для производства новых лекарственных средств. Течения жидкостей в микроканалах также широко распространены в природе. Это и процессы переноса веществ в растениях и живых организмах, и многофазная фильтрация флюидов в микропористых коллекторах нефти и газа, и много другое. Многообразие микроканальных приложений обуславливает большое количество исследований по данной тематике.

Здесь нужно прежде всего отметить большое количество работ, связанных с исследованием микромиксеров – специальных микроканалов, используемых для интенсификации процессов перемешивания жидкостей. Оптимизации отдельных видов микромиксеров посвящены работы Лобасова А. С. и др., Galletti et al., Soleymani et al., Fani et al., Bothe et al., Hoffmann et al., Dreher et al., Chakraborty et al., Baldyga et al., Ehlers et al., Hessel et al., Karnik et al., Park et al., Chow et al., Schwarzer et al., Nguyen et al. Кроме того, в последнее время наблюдается существенный интерес к двухфазным течениям в микроканалах, где можно реализовать чрезвычайно тонкие жидкие пленки теплоносителя с огромными значениями коэффициента теплоотдачи. Отдельно можно выделить процессы кипения жидкостей в микроканалах, в которых достигаются рекордные значения плотности теплового потока. Интерес к этим приложениям обуславливает огромное число работ, выполненных по этой тематике в последние годы. Здесь нужно отметить работы В. В. Кузнецова, О. А. Кабова, S. G. Kandlikar, T. G. Karayiannis, S. V. Garimella и др.

Также интенсивно развиваются исследования двухжидкостных несмешивающихся потоков в микроканалах, которые широко распространены в различных природных объектах, течениях нефтеносных флюидов в пористых средах, течениях в биологических системах и многих других приложениях. Иссле-

дованию режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах посвящены работы P. Garstecki, Zhao et al., M. Kashid et al., P. Gupta et al., Y. Li et al., Ягодницыной А. А. с коллегами и других.

Несмотря на сравнительно большое число работ, посвященных изучению течений, смешения и теплообмена в микроканальных устройствах, систематических данных об имеющих здесь место режимах течения все еще недостаточно. Число встречающихся и возможных микрофлюидных устройств на сегодняшний день столь велико, что необходимо, с одной стороны, их дальнейшее изучение, а с другой, проведение исследований по оптимизации их работы. Кроме того, остается немало нерешенных проблем, связанных с методами моделирования таких течений, прежде всего с аккуратным учетом сил межфазного натяжения, моделированием контактной линии и эффектов смачивания поверхности.

Создание микросистемной техники нередко требует использования материалов с необычными свойствами. Такие материалы разрабатываются модифицированием структуры базового флюида различными наночастицами. В ряду таких материалов стоит и новый класс дисперсных жидкостей – наножидкости, т. е. дисперсные жидкости с наночастицами. Исследование свойств и применение наножидкостей в различных приложениях (в парфюмерной и косметической промышленности, в медицине, при создании новых красок и материалов, в трибологии, в биотехнологиях, и т. д.) стало одним из ключевых трендов в науке двух последних десятилетий. Нужно отметить, что до недавнего времени подавляющее большинство работ, связанных с изучением наножидкостей было посвящено исследованию процессов теплообмена, и прежде всего – коэффициенту теплопроводности наножидкостей. Именно с исследования коэффициента теплопроводности началась бурная история изучения свойств и возможностей применения наножидкостей в различных приложениях. В революционной работе Стефана Чои 1995 года впервые было показано, что при добавке в теплоноситель небольшого количества наночастиц можно в разы повысить его коэффициент теплопроводности. Собственно, Чои и ввел сам термин «наножидкость» – суспензия с частицами размером меньше 100 нм. С тех пор исследования свойств наножидкости развивались просто с экспоненциальной скоростью. За это время появилось несколько тысяч работ по этой тематике. Здесь следует отметить работы Чона, М. Chopkar, М. Р. Keblinski, К. В. Аноор, R. Prasher, Е. В. Тимофеевой, В. Я. Рудяка, А. А. Белкина, А. С. Дмитриева и др.

Достаточно большое количество работ было выполнено по исследованию коэффициента вязкости и наножидкостей как экспериментально (В. С. Pak, S. M. S. Murshed, A. K. Sharma, P. K. Namburi и др.), так и с помощью метода молекулярной динамики (работы В. Я. Рудяка, А. А. Белкина). Развиваются исследования реологии наножидкостей, которые в последнее время стали активно использоваться для управления реологическими свойствами буровых растворов (И. Н. Евдокимов, А. В. Минаков и др.). Существенно меньше работ

было посвящено экспериментальному исследованию конвективного теплообмена и испарения и кипения наножидкостей (Пак и Чо, Нгуен др., Дж. Бонджорно, Ю. А. Кузма-Кичта, А. Н. Павленко, В. И. Терехов и др.). Кроме того, течения наножидкостей в настоящее время активно исследуются в задачах интенсификации нефтеотдачи при заводнении пласта. В этом направлении получены очень перспективные результаты. Вместе с тем, несмотря на огромное количество работ в этой области, теплофизические свойства наножидкостей, характеристики их течений и теплообмена все еще до конца не изучены. Имеющиеся экспериментальные данные несистемны и часто противоречат друг другу. Отсутствует физическое понимание некоторых наблюдаемых эффектов. До конца не ясны физические механизмы влияния наночастиц на рассматриваемые процессы. Таким образом, исследования в данной предметной области не только чрезвычайно актуальны, но и содержат значительный объем научной новизны. Реализация этих исследований позволит не только ответить на некоторые принципиальные вопросы механики дисперсных систем, но и создать основу новых перспективных технологий.

Целью диссертационной работы является систематическое моделирование и изучение течений и теплообмена многофазных потоков в мини- и микроканалах и экспериментальное изучение коэффициентов переноса и теплообмена наножидкостей.

Для ее достижения решаются следующие основные **задачи**:

- Разработка и тестирование численной методики моделирования течений и теплообмена одно- и многофазных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла;
- Изучение режимов течений и оптимизация течений в микромиксерах;
- Исследование двухфазных и двухжидкостных течений в микроканалах;
- Экспериментальное изучение вязкости и теплопроводности наножидкостей;
- Разработка и тестирование математических моделей течений и теплообмена наножидкостей;
- Исследование конвективного теплообмена при течении наножидкостей в круглых каналах;
- Изучение кризиса кипения наножидкостей.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые с помощью численного моделирования выявлены и изучены основные режимы течения и смешения в типичных микромиксерах, установлены факторы, влияющие на эти режимы, сформулированы критерии оптимизации их работы.
2. Разработана численная методика расчета многофазных течений, в том числе и наножидкостей, в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения, динамического контактного угла, реологии и термодиффузии.
3. Исследованы и установлены механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды.

4. Экспериментально показано, что вязкость наножидкостей зависит от материала наночастиц, а переход от ньютоновской реологии к неньютоновской может происходить не только при увеличении концентрации наночастиц, как это имеет место для крупнодисперсных суспензий, но и при уменьшении средних размеров наночастиц.

5. Экспериментально установлена зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от плотности материала наночастиц. Показано, что при одинаковой концентрации и размере наночастиц коэффициент теплопроводности наножидкости возрастает пропорционально плотности материала наночастиц.

6. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции наножидкостей в ламинарном и турбулентном режимах течения от размера наночастиц и реологии наножидкостей.

7. Экспериментально показано, что ламинарно-турбулентный переход в наножидкостях происходит при меньших числах Рейнольдса, чем в базовой жидкости, а критические числа Рейнольдса падают с уменьшением размера наночастиц.

8. Обнаружено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей зависит от длительности процесса кипячения, и установлены физические механизмы этого влияния.

Теоретическая значимость результатов определяется разработкой новых математических моделей для описания течений и теплообмена многофазных потоков, включая наножидкости, в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения динамического контактного угла, экспериментально обоснованных коэффициентов переноса, реологии и термодиффузии наножидкостей. Проведенные систематические исследования позволили установить и описать основные режимы течения в наиболее распространенных микромиксерах в широких диапазонах их работы, объяснить основные механизмы увеличения нефтеотдачи при течении нефти и наножидкости в пористых средах, установить основные закономерности поведения коэффициентов переноса и характеристик тепломассообмена наножидкостей.

Практическая значимость результатов определяется тем, что сформулированы рекомендации по управлению эффективности перемешивания жидкостей в наиболее распространенных микромиксерах и микрореакторах, создана база данных по коэффициентам вязкости и теплопроводности нескольких десятков наножидкостей и построены соответствующие корреляции, определяющие их зависимость от концентрации частиц среднего размера, сформулированы практические рекомендации по управлению характеристиками течения и теплообмена наножидкостей. Результаты исследования процесса вытеснения нефти с помощью наножидкости могут быть использованы для интенсификации нефтеотдачи при заводнении пласта на месторождениях, а исследования вынужденной конвекции и кризиса

кипения наножидкости – при повышении эффективности работы теплообменного оборудования.

Результаты работы могут найти применения в ИТПМ СО РАН г. Новосибирск; ИМСС УрО РАН, г. Пермь; ФГУП НИИПМ, г. Пермь; НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева, г. Железногорск; НИИ ООО «РН-КрасноярскНИПИ-нефть» и ряде других организаций.

Результаты диссертации использованы при выполнении следующих проектов: РНФ № 17-79-20218 (руководитель – А. В. Минаков); РФФИ № 12-08-33061, 16-48-243061 (руководитель – А. В. Минаков), грант Президента РФ МК6296.2013 (руководитель – А. В. Минаков); РНФ № 14-19-00312 (руководитель – В. Я. Рудяк, основной исполнитель – А. В. Минаков).

Результаты, представленные в диссертации, используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (при чтении курсов «Вычислительная гидродинамика и теплофизика», «Математические модели задач гидродинамики и теплообмена», «Вычислительная гидродинамика и теплофизика», «Математическое моделирование в технической физике» для подготовки бакалавров и магистров по направлениям «Ядерная энергетика и теплофизика», «Нанотехнология и микросистемная техника», «Техническая физика») и ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (при чтении курса «Процессы переноса в дисперсных средах, включая наножидкости»).

Основные научные положения, защищаемые автором:

- Установленные с помощью численного моделирования режимы течения в наиболее распространенных микромиксерах и факторы, влияющие на эти режимы;
- Численная методика моделирования двухфазных и двухжидкостных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла;
- Установленные механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды;
- Экспериментальные данные по реологическому поведению и коэффициентам вязкости и теплопроводности нескольких десятков наножидкостей;
- Экспериментальные корреляции для коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей;
- Данные о характеристиках теплообмена и ламинарно-турбулентном переходе при течении наножидкостей в круглых каналах;
- Математическая модель для описания течений и теплообмена наножидкостей с учетом их реологии и термодиффузии частиц на основе экспериментально измеренных коэффициентов переноса;
- Экспериментально установленные зависимости КТП при кипении наножидкостей на цилиндрических нагревателях от концентрации, размера,

материала частиц, диаметра нагревателя, длительности процесса кипячения и добавок ПАВ и полимеров.

Степень достоверности обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методов исследования теплофизических свойств жидкостей и тщательным их тестированием, использованием современных математических моделей, основанных на фундаментальных физических законах сохранения, применением апробированных и теоретически обоснованных численных методик и алгоритмов, систематическим тестированием разработанных моделей и методик на большом количестве тестовых задач и сопоставлением полученных результатов в предельных случаях с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Личный вклад автора. Диссертация является обобщением исследований автора, проводимых им в Сибирском федеральном университете с 2008 г. Представленные в диссертации результаты получены лично автором и при его непосредственном участии.

Выбор направлений исследований осуществлялся как лично диссертантом, так и совместно с научным консультантом профессором В. Я. Рудяком. Часть расчетных исследований по моделированию однофазных течений в Т-образном микроканале (раздел 1.5) выполнена совместно с А. С. Лобасовым. Часть экспериментальных исследований вязкости и теплопроводности наножидкостей проводилось совместно с М. И. Пряжниковым (раздел 3.1 -3.2 и 4.1-4.2). Часть экспериментальных исследований вынужденной конвекции наножидкостей (раздел 5.3) проводилось совместно с Д. В. Гузей. Постановка задач исследований, разработка математических моделей, и формулирование основных полученных результатов в совместных работах выполнено лично автором.

Апробация работы. Материалы диссертационного исследования были представлены более чем на 35 всероссийских и международных конференциях и семинарах, наиболее значимые из которых: European Conference on Microfluidics (2008, 2012, 2014), Conference of the International Marangoni Association «Interfacial Fluid Dynamics and Processes» (2012), Micro and Nano Flows Conference (2011, 2014), Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT, 2012), Diffusion in Solids and Liquids (2013), Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ, 2014, 2018), International Heat Transfer Symposium (2014), Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ (РКТС, 2014, 2018), Methods of Aerophysical Research (ICMAR, 2018), Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (Ставеровские чтения, 2012, 2019), Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (2015), Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий (2009, 2010, 2011, 2012, 2015), Сопряженные задачи механики, информатики и экологии (2018), Поляховские чтения (2018),

Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых (2017, 2018, 2019, 2020).

Публикация результатов. По результатам диссертационной работы опубликованы 48 статей в научных журналах, включенных в Перечень ВАК, из них 40 статей – в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Статьи автора диссертации также включены в три монографии.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Текстовая часть диссертации содержит 368 страниц, включая 260 рисунков и 34 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 556 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, дан краткий литературный обзор, мотивирована и сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава посвящена систематическому моделированию однофазных течений и теплообмена несжимаемых жидкостей в наиболее распространенных на сегодняшний день микромиксерах. Несмотря на сравнительно большое число работ, посвященных изучению течений и смешения в отдельных микромиксерах, систематических данных об имеющих место режимах течения и смешения в них все еще не было. Кроме того, число встречающихся и возможных микромиксеров на сегодняшний день столь велико, что, с одной стороны, необходимо их дальнейшее изучение, а с другой, проведение исследований по оптимизации этих миксеров. Для этих целей в рамках диссертации разработана и адаптирована численная методика моделирования процессов гидродинамики и теплообмена жидкостей в микроканалах. Описание этой методики приведены в разделе 1.1. Предложенная методика учитывает нестационарность и трехмерность процесса движения жидкости в микроканалах, адаптируется к реальной геометрии любого сложного объекта, легко обобщается на неизотермические задачи. Моделирование микротечений проводилось в рамках гидродинамического подхода, основанного на решении уравнений Навье–Стокса. Оценки показывают, что гидродинамическое описание вполне корректно использовать для микроканалов с характерными размерами вплоть до 1 мкм.

При изучении однофазных течений в микроканалах рассматриваются неизотермические потоки многокомпонентных смесей в общем случае неньютоновских жидкостей, которые описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) &= 0, & \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla p + \nabla \tau + \rho \mathbf{g}, \\ \frac{\partial \rho f_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho f_i \mathbf{v}) &= \nabla \cdot (\rho D_i \nabla f_i), & \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} h) &= \nabla(\lambda \nabla T) \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность смеси, $\mathbf{v}$ – вектор скорости потока, p – давление, τ – тензор вязких напряжений, D_i – коэффициент диффузии i -го компонента, λ – коэффициент теплопроводности смеси, h – энтальпия.

В качестве граничных условий на стенках каналов для компонент вектора скорости в большинстве рассмотренных задач использовались условия прилипания. Влияние условий скольжения рассмотрено в разделах 1.3–1.7 диссертации. Хотя при течении жидкости в микроканалах турбулентные режимы нетипичны, однако они в ряде случаев имеют место, поэтому также рассматривались. Для их моделирования использовалось прямое численное моделирование и $k\text{-}\omega$ SST RANS модель турбулентности.

Тестирование разработанной численной методики (раздел 1.2) выполнено на решении ряда задач гидродинамики и теплообмена в микроканалах: ламинарного изотермического течения в Т-образном микроканале; ламинарного и турбулентного течения в прямых микроканалах различного гидравлического диаметра; теплообмена в Т-образном микроканале и в микротеплообменнике, состоящем из 15 микроканалов прямоугольного сечения. Во всех случаях получено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными как по локальным характеристикам течения (форма профиля скорости и температуры, полученная $\mu\text{iso-PIV}$ и LIF измерениями), так и по интегральным параметрам (коэффициенты сопротивления и теплоотдачи).

В разделе 1.3 приведены результаты исследования течения в микромиксере Y-типа. Изучено влияние числа Рейнольдса и диффузионного числа Пекле на эффективность смешения и потери давления. Показано, что эффективность смешения при фиксированном значении числа Пекле не зависит от числа Рейнольдса (до $Re < 10$). Установлена зависимость эффективности смешения от числа Пекле: $M = 113.2 / (1 + 0.037Re^{0.7})$. Исследовано влияние на эффективность смешения угла раскрытия. Показано, что максимум эффективности смешения достигается при угле раскрытия 90° (Т-миксер), а эффективность смешения в несимметричном миксере ниже, чем в симметричном. Изучено влияния скольжения на стенках миксера. Показана возможность существенного снижения потерь давления при сохранении эффективности смешения при помощи нанесения на стенки канала супергидрофобных покрытий.

В разделе 1.4 приведены результаты исследования течения в микромиксере Т-типа при низких числах Рейнольдса. Проведено исследование влияния вставок на характеристики течения в Т-образном миксере. Проведена оптимизация количества, размера, формы и расположения вставок для получения наиболее эффективного перемешивания (см. рис. 1). Изучена зависимость эффективности смешения и перепада давлений от диффузионного числа Пекле и

числа Рейнольдса. Показано, что эффективность смешения при ползучем течении ($Re < 5$) практически не зависит от числа Re . При более высоких значениях числа Re за вставками образуются вихри, что значительно улучшает смешение. Здесь также изучено влияние скольжения на стенках вставок. Показано, что в отличие от рассмотренного выше случая Y -миксера без вставок скольжение на стенках канала существенно снижает эффективность смешения.

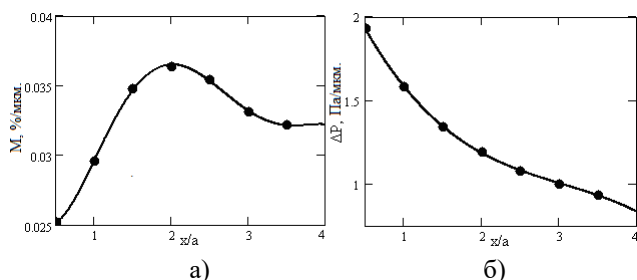


Рис. 1. Зависимость приведенной эффективности смешения (а) и приведенного перепада давления (б) в миксере с пятью прямоугольными вставками от безразмерного расстояния между ними.

Раздел 1.5 посвящен исследованию течения в микромиксере Т-типа при умеренных и высоких числах Рейнольдса (от 1 до 1000). Для моделирования переходных и турбулентных режимов течения использовалось прямое численное моделирование. Впервые систематически изучены все основные режимы течения в данном миксере. Были установлены следующие режимы течения.

1. Стационарное безвихревое течение, реализуемое при $Re < 5$. Эффективность смешения уменьшается с ростом числа Рейнольдса.

2. Стационарное вихревое течение с двумя симметричными подковообразными вихрями Дина на входе в канал смешения. Данный режим реализуется, если числа Рейнольдса изменяются в диапазоне $5 < Re < 145$. Эффективность смешения уменьшается с ростом числа Рейнольдса.

3. Стационарное асимметричное вихревое течение наблюдается в диапазоне чисел Рейнольдса $146 < Re < 240$. Из-за развития неустойчивости Тейлора–Гертлера, образующиеся на входе в канал смешения подковообразные вихри поворачиваются на угол 45° относительно центральной продольной плоскости канала смешения. В результате в канале смешения формируются два интенсивных вихря с одинаковым направлением вращения, но течение остается стационарным. В канале смешения образуется S-образная структура, в результате резко увеличивается эффективность смешения. При переходе течения от симметричного режима ($Re < 145$) к несимметричному ($Re > 145$) эффективность смешения возрастает более чем в 25 раз. Потери давления при этом не возрастают.

4. Нестационарное периодическое течение реализуется в диапазоне $240 < Re < 400$, эффективность смешения продолжает возрастать.

5. Переходное квазипериодическое течение реализуется в диапазоне $400 < Re < 600$ (см. рис. 2). Эффективность смешения меняется слабо.

6. Турбулентный режим течения фиксируется при $Re > 600$. S-образные вихревые структуры разрушаются, из-за чего эффективность смешения несколько снижается. Показано, что турбулентные пульсации потока максимальны вблизи входа в канал смешения в месте слияния потока. По мере продвижения по каналу смешения пульсации затухают. Это проиллюстрировано на рис. 2.

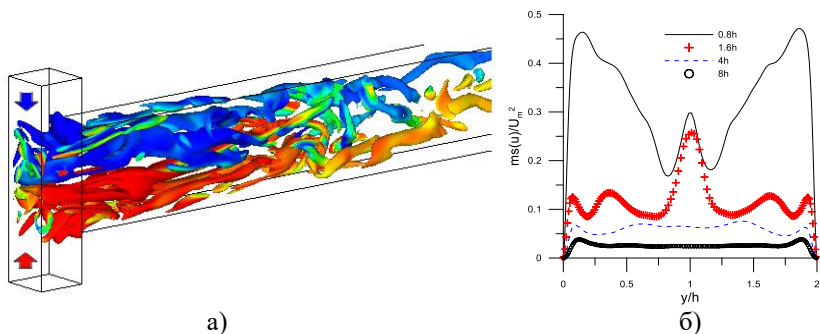
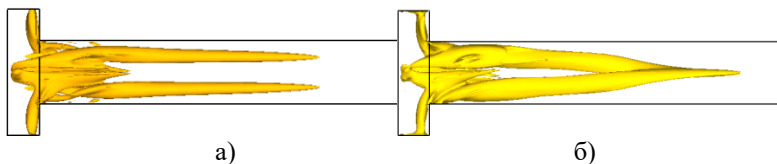


Рис. 2. Исоповерхность λ_2 , раскрашенная концентрацией краски для $Re = 600$ в Т-миксере (а) и профили пульсаций осевой скорости в центральном поперечном сечении на различных расстояниях от входа в канал смешения (б).

Далее систематически исследовано влияние на режимы течения плотности, вязкости и температуры смешивающихся жидкостей. Показано, что, изменяя эти факторы, можно управлять режимами течения. В частности, увеличивая разность температур жидкостей, можно сдвигать наступление режима асимметричного двухвихревого течения в сторону меньших чисел Рейнольдса (раздел 1.6). Отдельно был изучен случай смешения воды и наножидкости.

В разделе 1.7 изучено влияния на режимы течения условий скольжения на стенках миксера. Установлено, что наличие скольжения приводит не только к существенному изменению структуры потока в канале смешения (см. рис. 3), но и к смещению режимов течения в нем, снижая при этом гидравлические потери.



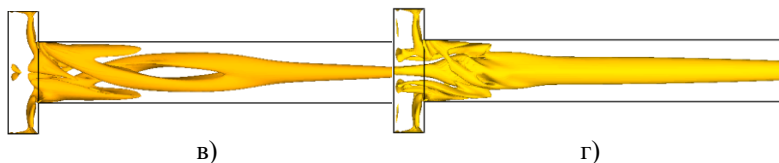


Рис. 3. Вихревая структура течений в микромиксере при различной длине скользяния b , $Re = 186$: а) $b = 0$; б) $b = 10$ мкм; в) $b = 30$ мкм; г) $b = 70$ мкм.

Показано, что наличие шероховатостей с относительной высотой меньше 2 % не оказывает значительного влияния на структуру течения в микромиксере. Наиболее значительные отличия по сравнению с гладким каналом наблюдаются в спектрах кинетической энергии турбулентных пульсаций. В средней и высокочастотной частях спектра для шероховатого канала присутствует гораздо больше частот, спектр ближе к сплошному. При более высоких числах Рейнольдса различия в спектрах пульсаций гладкого и шероховатого канала уменьшаются.

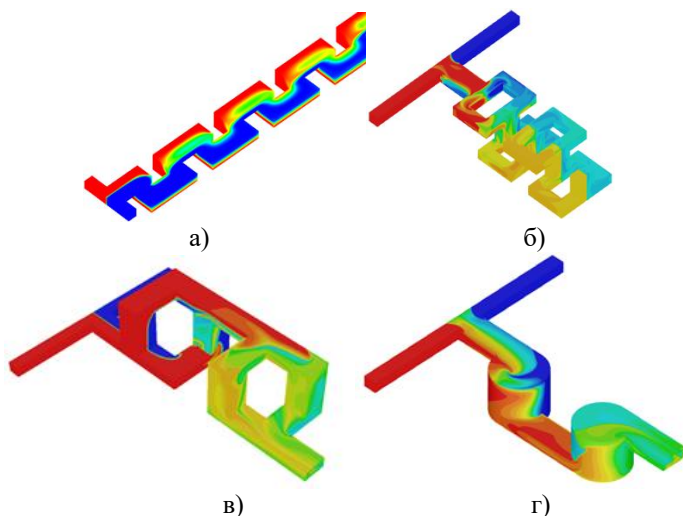


Рис. 4. Распределение концентрации на стенках при $Re = 120$ для а) S-миксера; б) миксера № 1; в) миксера № 2; г) миксера № 3.

В разделе 1.8 приведены результаты моделирования течения в микромиксере S-типа (рис. 4а). Определены оптимальная длина и число секций смешения (см. рис. 5). Сопоставление эффективности смешения на единицу длины канала для S и Т-миксеров показало, что для Т-миксера данная величина в среднем в два раза ниже, а перепад давления на единицу длины канала при этом больше.

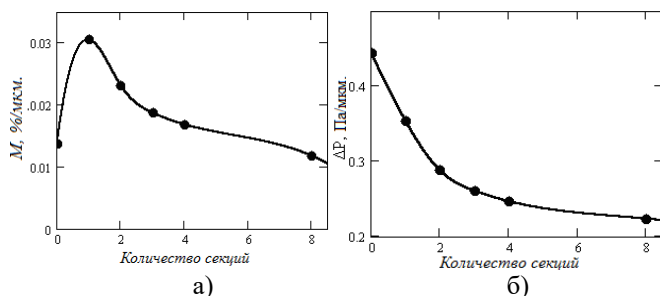


Рис. 5. Зависимость приведенной эффективности смешения (а) и приведенного перепада давления (б) криволинейных секций для микромиксера S-типа.

Раздел 1.9 посвящен изучению течения в микромиксерах сложной конфигурации, геометрия которых показана на рис. 4б, 4в, 4г. Высота канала смешения в этих миксерах равнялась 200 мкм, а ширина – 400 мкм. В этих конфигурациях реализованы различные принципы интенсификации смешения. В миксере № 1 реализован принцип поочередного разделения и слияния потоков. В миксере № 2 потоки, проходящие по каналам в камере смешения, разделяются на два, один продолжает двигаться прямо, второй уходит в перпендикулярный канал. Далее разделенные потоки вновь объединяются. В отличие от предыдущего миксера, при разделении на каналы, смешивающие жидкости движутся вместе. Из-за этого площадь контакта смешивающих сред после прохождения первой камеры смешения увеличивается в два раза, второй – в четыре раза и так далее. Тем самым реализуется так называемый принцип «умножения» потоков. В миксере № 3 потоки, проходящие по каналу смешения, смешиваются в цилиндрическом канале, после чего попадают в прямой канал и далее – в следующий цилиндр. Интенсификация смешения достигается за счет закрутки потока в цилиндрической камере. Наиболее эффективным данный миксер становится при числах Re больших 20, когда в камере смешения формируется вихрь. Для сопоставления рассмотренных миксеров в работе впервые введен критерий эффективности смешения, приведенный к перепаду давления между входом и выходом миксера. Такое сравнение приведено на рис. 6. Приведенная эффективность смешения значительно различается. Максимальной приведенной эффективностью смешения обладает миксер № 3. В диапазоне чисел $Re < 145$ он позволяет перемешивать жидкости примерно в 600 раз более эффективно, чем прямой Т-миксер. Миксер № 2 уступает ему по приведенной эффективности примерно в 1,5 раза. Миксер № 1 в этом диапазоне позволяет повысить эффективность перемешивания всего в 1,5 раза по сравнению с прямым каналом.

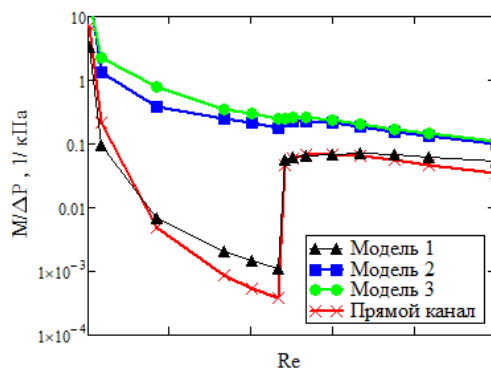


Рис. 6. Приведенная к потерям давления эффективность смешения для различных микромиксеров.

Раздел 1.10 посвящен изучению процесса смешения в активных микромиксерах. Изучен метод периодического изменения расхода на одном из входов в миксерах Y- и T-типа (см. рис. 7а). Исследованы зависимости эффективности смешения и потери давления от частоты и амплитуды пульсаций скорости на входе при различных значениях числа Рейнольдса. В результате установлены оптимальные параметры пульсаций потока на входе в миксер для достижения максимальной эффективности работы миксеров (рис. 7б).

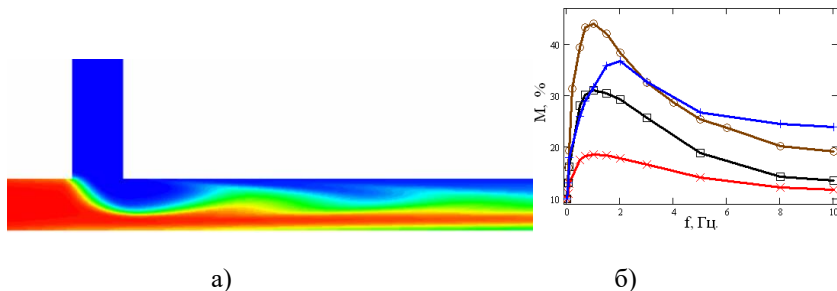


Рис. 7. Изолинии концентрации краски в центральном поперечном сечении миксера (а) для амплитуды пульсаций 1 мм/с и частоты $f = 10$ Гц. Зависимость осредненной эффективности смешения от частоты и амплитуды пульсаций скорости на входе (б).

Вторая глава посвящена моделированию течений двухфазных потоков в микроканалах. Раздел 2.1 посвящен описанию разработанной математической модели и численной методики расчета двухфазных течений в микроканалах. В данной диссертации для моделирования двухфазных и двухжидкостных потоков в микроканалах была разработана численная методика, базирующаяся

на VOF-методе. Данный метод позволяет моделировать несмешивающиеся многокомпонентные потоки газ–жидкость или жидкость–жидкость, решая уравнения сохранения массы и импульса и используя объемную долю каждой фазы. Для этого в каждой расчетной ячейке в рассмотрение вводится объемная доля второй фазы α . В этом случае плотность и вязкость смеси, входящей в уравнения Навье–Стокса, определяются следующим образом: $\rho = \rho_1(\varphi)\alpha + (1-\alpha)\rho_2$, $\mu = \mu_1(\varphi)\alpha + (1-\alpha)\mu_2$. Здесь $\rho_1(\varphi)$, $\mu_1(\varphi)$ – плотность и вязкость первой фазы, а ρ_2 , μ_2 – плотность и вязкость второй фазы. Поскольку в качестве одной фаз в работе рассматривается использование наножидкости, то методика в общем случае учитывает зависимость ее свойств от концентрации наночастиц φ .

Для моделирования движения межфазной границы раздела в процессе двухфазного течения решается следующее уравнение переноса:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla(\alpha \mathbf{v}) = 0$$

Для моделирования поверхностного натяжения при течении двухфазных потоков в микроканалах использовался алгоритм континуальной поверхностной силы (CSF), предложенный Brackbill et al. В этом методе эффекты поверхностного натяжения моделируются путем добавления источника в уравнение импульса: $\vec{F}_s = \sigma(\varphi)k\nabla\alpha$, $\sigma(\varphi)$ – коэффициент межфазного натяжения, который в случае использования наножидкости зависит от концентрации наночастиц, k – кривизна границы раздела, которая определяется как дивергенция вектора нормали, который, в свою очередь, определяется как градиент объемной доли фазы в ячейке. При этом на твердой стенке величина вектора нормали определяется по краевому углу смачивания $\theta(\varphi)$: $\vec{n} = \vec{n}_w \cos(\theta(\varphi)) + \vec{\tau}_w \sin(\theta(\varphi))$, где $\vec{n}_w$, $\vec{\tau}_w$ – нормальный и тангенциальный к стенке векторы. При моделировании несмешивающихся течений с наножидкостями в расчетах использованы экспериментально измеренные значения вязкости $\mu(\varphi)$, плотности $\rho(\varphi)$, межфазного натяжения $\sigma(\varphi)$ и угла смачивания $\theta(\varphi)$ наносuspензии в зависимости от концентрации φ и размера частиц.

При движущейся контактной линии краевой угол является динамическим и может значительно отклоняться от равновесного значения. Важность поверхностного натяжения и, в частности, динамических контактных углов, возрастает с уменьшением числа Вебера или капиллярного числа. Это характерно для течений в микроканалах. В диссертации были рассмотрены основные модели динамического угла смачивания: квазидинамическая модель, модель Кистлера, которая является более общим случаем известной модели Хоффмана–Войнова–Таннера, модель Йокои. Эти модели были реализованы, и проведено их тестирование для классических задач скатывания капель по наклонной поверхности и растекании капель после удара о твердую поверхность с различным смачиванием, а также течения несмешивающихся жидкостей в микрока-

налах прямоугольного сечения. Показано, что оптимальной в отношении точности расчета и устойчивости расчетного алгоритма является модель Кистлера, основанная на использовании равновесного значения контактного угла θ и капиллярного числа: $\theta_d = f(Ca + f^{-1}(\theta))$, где f^{-1} – обратное значение функции

Хоффмана.
$$f = \arccos \left\{ 1 - 2 \tanh \left(5.16 \left(\frac{x}{1 + 1.31x^{0.99}} \right)^{0.706} \right) \right\}, \quad x = Ca + f^{-1}(\theta),$$

$Ca = \frac{\mu U_{CL}}{\sigma}$ – капиллярное число. Скорость контактной линии U_{CL} определялась

как скалярное произведение тангенциальной компоненты вектора нормали межфазной границы на вектор скорости потока в ближайшей к стенке ячейки.

Раздел 2.2 посвящен моделированию газожидкостных потоков в микроканалах. Рассмотрены задачи: о движении газовых снарядов в прямоугольном миниканале; о газожидкостном течении в Т-образном микроканале круглого сечения; о моделировании стационарного газового снаряда в миниканале; о моделировании образования пузырей азота в водном растворе глицерина в Х-образном микроканале. Численное решение всех рассмотренных задач в целом хорошо качественно и количественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

В разделе 2.3 представлены результаты моделирования двухжидкостных потоков в микроканалах. Рассмотрены задачи моделирования течения воды, масла и ионной жидкости в Т-образном микроканале круглого сечения, течения воды и керосина и течения парафинового и касторового масел в Т-образном микроканале прямоугольного сечения. Проведено исследование возможных режимов течения этих смесей при различных расходах несущей и дисперсной фазы. В результате численного моделирования подтверждены режимы течения, ранее обнаруженные в эксперименте. Получены зависимости безразмерной толщины жидкой пленки, скорости снарядов от капиллярного числа, безразмерной длины снаряда от отношения расходов дисперсной и несущей фазы.

Показано, что для снарядного режима течения водо-керосиновой смеси принципиально невозможно описать поведение снаряда, используя статическую модель контактного угла. Расчеты со статическим контактным углом даже качественно не могут описать форму снаряда, наблюдаемую в эксперименте. Динамическая модель контактного угла, напротив, дает качественно и количественно правильную форму обоих менисков и размер снаряда. Расчет хорошо описывает данные эксперимента по форме, длине и скорости снарядов, толщине пленки для двухфазных несмешивающихся жидкостей в широком диапазоне капиллярного числа для микроканалов круглой и прямоугольной формы с различным отношением ширины к глубине.

Сравнение полученных расчетных данных с экспериментом и результатами других авторов приведено на рис. 8. Здесь кресты показывают экспериментальные данные А. А. Ягодницыной и др.; ромбы – расчетные данные;

сплошная кривая соответствует предложенной корреляции $L/d = 1 + 1.45(Qp/Qc)$, синие и красные треугольники – экспериментальные данные П. Гартеcki, зеленые точки – расчетные данные Р. Ражд и др.

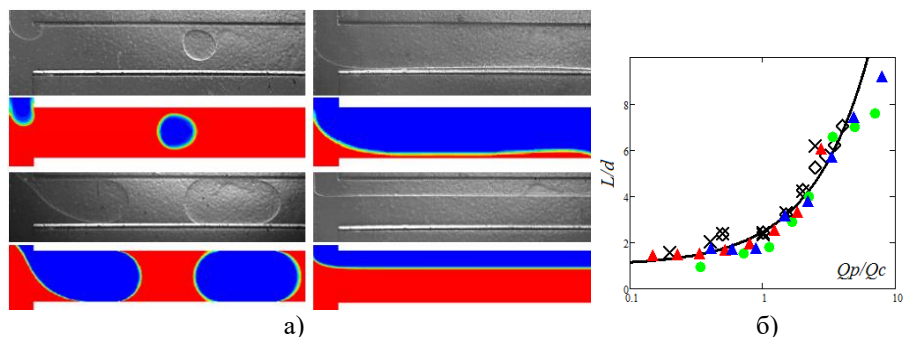


Рис. 8. Сравнение расчета и эксперимента (А. А. Ягоднищина и др.) для различных режимов течения парафинового и касторового масла в Т-миксере (а) и зависимость безразмерной длины снаряда от отношения расходов (б).

Проведено систематическое экспериментальное и численное исследование режимов течений воды и нефти в микроканале Y-типа. Установлено четыре различных типа режима течения вода–нефть в данном микроканале: параллельный, капельный, снарядный и хаотический. Определены диапазоны существования этих режимов течений. Построены карты обнаруженных режимов в различных координатах. Установлены зависимости длины, скорости и частоты образования снарядов воды в сырой нефти от параметров капельного и снарядного режима течения. Было продемонстрировано, что при определении безразмерных длин снарядов и числа Струхали отрыва капель необходимо учитывать не только отношение расхода дисперсной и несущей фазы, но и значение капиллярного числа. Построены универсальные корреляции, определяющие эти зависимости.

В разделе 2.4 приведены результаты изучения процесса вытеснения нефти наножидкостью из модельной горной породы.

Для получения данных по коэффициенту межфазного натяжения и краевому углу смачивания в системах наножидкость/нефть/горная порода проведены соответствующие систематические экспериментальные исследования. Экспериментально показано, что с увеличением концентрации наночастиц межфазное натяжение на границе нефть/наножидкость довольно значительно снижается. Так, добавка 1 мас.% наночастиц снижает межфазное натяжение в 1,7 раза. Анализ влияния добавки наночастиц на значения краевого угла смачивания показал, что с увеличением концентрации наночастиц краевой угол (для капли нефти) возрастает с 73 до 153°. Таким образом, установлено, что добавка наночастиц в воду существенно ухудшает смачиваемость нефтью горной поро-

ды. Впервые исследована зависимость характеристик смачивания в такой системе от размера наночастиц. Показано, что размер наночастиц также оказывается значимым фактором по влиянию на межфазное натяжение и особенно на краевой угол смачивания поверхности нефтью. С уменьшением размера наночастиц краевой угол смачивания на границе нефть/горная порода/наножидкость увеличивается, причем чем меньше средний размер частиц, тем быстрее с ростом концентрации наночастиц возрастает краевой угол смачивания.

Полученные экспериментальные данные были использованы для численного моделирования процесса вытеснения нефти наножидкостью. Пористая порода моделировалась засыпкой круглых шаров со средним размером 100 мкм. Установлено, что добавка наночастиц в вытесняющую жидкость значительно влияет на вытеснение нефти из пористой породы: наножидкость вытесняет нефть фактически однородным фронтом (рис. 9.). В результате значительно повышается коэффициент извлечения нефти. Показано, что наносuspension с 1 мас.% SiO_2 размером 5 нм позволяет повысить его по сравнению с водой более чем в два раза. Установлено, что основной причиной увеличения этого коэффициента при использовании наножидкости является улучшение смачивания водой горной породы.

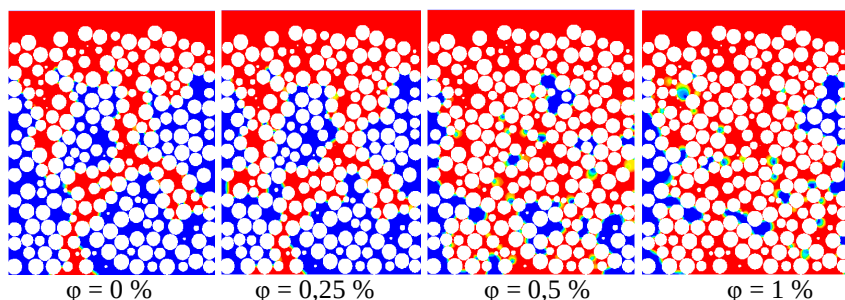


Рис. 9. Распределение нефти (синий) и наножидкости (красный) в пористой среде для различных концентраций наночастиц.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению вязкости и реологии наножидкостей. В работе представлены данные изучения нескольких десятков наножидкостей на основе дистиллированной воды, этиленгликоля и машинного масла с частицами Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и наноалмазов. Объемная концентрация наночастиц изменялась в диапазоне от 0,25 % до 6 %, а диаметр наночастиц – от 5 до 150 нм. Температура варьировалась от 25 до 60 °С. Изучено влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих ПАВ на вязкость наножидкостей. Отдельно изучены факторы, влияющие на реологию наножидкостей.

Раздел 3.1 посвящен описанию использованных методик приготовления наножидкостей и измерения вязкости. В разделе 3.2 приведены данные о зависимости коэффициента вязкости от концентрации наночастиц. Показано, что вязкость наножидкостей значительно выше, чем вязкость обычных крупнодисперсных суспензий, и она не описывается классическими теориями (Эйнштейна, Бэтчелора и т. д.). При умеренных концентрациях частиц зависимость коэффициента вязкости наножидкостей от концентрации частиц можно описать формулой: $\eta_r = 1 + a\varphi + b\varphi^2$. Однако это соотношение не универсально, и для разных жидкостей входящие сюда коэффициенты различны. Так, например, было показано, что вязкость наножидкостей на основе воды с частицами Al_2O_3 (150 нм) и TiO_2 (150 нм) описывается соответственно формулами: $\eta_r = 1 + 6\varphi + 72\varphi^2$, $\eta_r = 1 + 7.1\varphi + 148\varphi^2$ (см. рис 10а). Измерения выполненные в данной диссертации позволили установить, что неуниверсальность зависимости вязкости наножидкостей от концентрации наночастиц связана с двумя обстоятельствами: вязкость наножидкостей зависит от размера частиц и их материала.

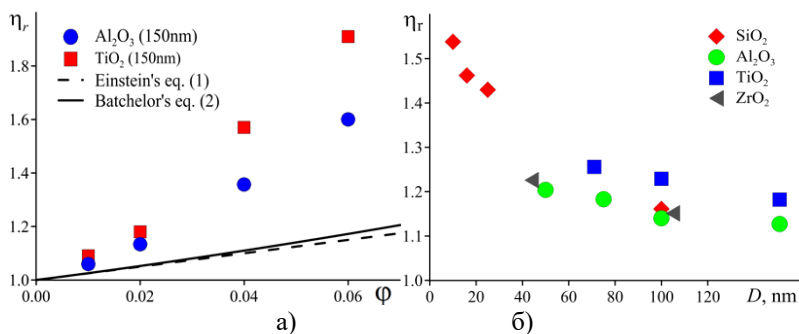


Рис. 10. Зависимость коэффициента относительной вязкости наножидкостей от концентрации частиц (а) и зависимость коэффициента относительной вязкости наножидкостей от размера частиц (б).

Зависимость вязкости от размера частиц и их материала исследована в разделе 3.3. Показано, что вязкость наножидкостей растет с уменьшением размера наночастиц (см. рис. 10б). Экспериментально установлено, что с увеличением размера наночастиц коэффициент вязкости наножидкости стремится к значениям, полученным для крупнодисперсных жидкостей. Кроме того, впервые экспериментально показано, что вязкость наножидкости зависит от материала наночастиц (см. рис. 10а).

Зависимость вязкости наножидкости от свойств базовой жидкости исследована в разделе 3.4. Было установлено, что, в отличие от классических крупнодисперсных суспензий, относительная вязкость наножидкости зависит

от вязкости базовой жидкости и ее приращение тем больше, чем выше вязкость базовой жидкости.

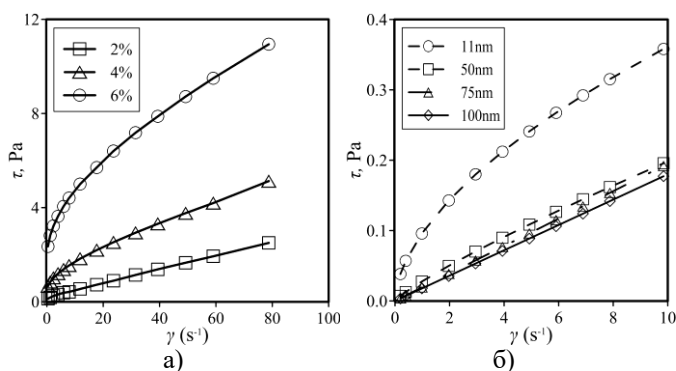


Рис. 11. Зависимость напряжений сдвига от скорости сдвига для наножидкости на основе этиленгликоля при разной концентрации частиц TiO₂ (а) размером 150 нм и разным размере частиц Al₂O₃ (б).

В разделе 3.5 представлены данные систематического экспериментального исследования реологии наножидкостей. Было установлено, что с увеличением концентрации частиц наножидкость может менять реологию. Неньютоновское поведение изученных наножидкостей хорошо описывается моделями псевдопластической или вязкопластической жидкости. Показано, что на возможность изменения реологии оказывается влияние концентрация наночастиц, их размер и материал. При низких концентрациях наночастиц реология наножидкостей лучше описывается степенной моделью. При повышении концентрации наночастиц в наножидкостях могут возникать предельные напряжения сдвига, и реология наножидкости лучше описывается моделью Хершеля–Балкли (см. рис. 11а). При этом с увеличением концентрации наночастиц такие неньютоновские характеристики, как индекс консистенции, пластическая вязкость и предельное напряжение увеличиваются, а индекс течения снижается.

Впервые было установлено, что переход от ньютоновского поведения к неньютоновскому в наножидкостях может происходить не только при увеличении концентрации наночастиц, как это имеет место для обычных крупнодисперсных суспензий, но и при уменьшении размеров наночастиц (см. рис. 11б).

Проведенные измерения позволили впервые экспериментально зафиксировать факт зависимости реологии наножидкостей от материала частиц. Было показано, что при прочих равных условиях реология наножидкостей с частицами оксидов титана и алюминия существенно отличается. Кроме того, было показано, что реология, помимо концентрации и размера наночастиц, зависит от свойств базовой жидкости. В отличие от наножидкости, приготовленной на основе воды, наножидкость, приготовленная на основе этиленгликоля, не обла-

дает неньютоновскими свойствами при тех же концентрациях наночастиц. Таким образом, экспериментально было показано, что вязкость и реология наножидкостей сложным образом зависят от многих факторов. Наличие подобной комплексной зависимости является одной из возможных причин имеющихся расхождений в данных, полученных ранее различными авторами.

Зависимость коэффициента вязкости наножидкостей от температуры изучена в разделе 3.6. Показано, что при не очень высоких концентрациях наночастиц относительная вязкость наножидкости практически постоянна, т. е. ее зависимость от температуры определяется соответствующей зависимостью базовой жидкости.

В разделе 3.7 приведены результаты исследований влияния поверхностно-активных веществ и полимеров на вязкость наножидкостей. Установлено, что добавки стабилизирующих веществ даже в малых концентрациях могут приводить к существенному изменению вязкости наножидкости. Так, в частности, было показано, что концентрация полиакриламида 40 мг/л повышает вязкость наножидкости с частицами оксида титана на 18 %, а аналогичная концентрация полимера «ГАММАКСАН» – практически в 2 раза. Кроме того, установлено, что при добавлении полимеров в наножидкость можно существенно изменить ее реологию.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению коэффициента теплопроводности тех же наножидкостей, что рассматривались в главе 3. В разделе 4.1 приведено описание специально созданной экспериментальной установки и результатов ее тестирования. Методика измерения коэффициента теплопроводности основана на нестационарном методе нагреваемой проволоки. Показано, что погрешность измерения составляет 3 %.

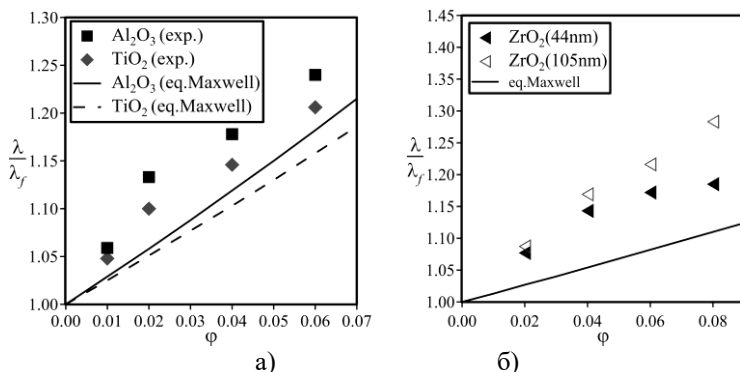


Рис. 12. Зависимость относительной теплопроводности наножидкости на основе воды с частицами Al_2O_3 и TiO_2 размером 150 нм (а) и с частицами ZrO_2 (б) от их концентрации.

В разделе 4.2 приведены результаты исследований зависимости коэффициента теплопроводности наножидкости от концентрации частиц. Во всех рассмотренных случаях с ростом концентрации частиц коэффициент теплопроводности наножидкостей увеличивается. Максимальное зафиксированное превышение коэффициента теплопроводности наножидкостей над соответствующим значением для воды составляет 28 %, что существенно больше значения, определяемого формулой Максвелла (см. рис. 12).

Характерной чертой поведения коэффициента теплопроводности наножидкостей является замедление ее роста с увеличением концентрации частиц. Эта зависимость относительного коэффициента теплопроводности можно описать формулой: $\lambda_r = 1 + b_1\varphi - b_2\varphi^2$. Входящие сюда коэффициенты, однако, не универсальны. Так, например, для наножидкости с частицами Al_2O_3 размером 150 нм: $\lambda_r = 1 + 6.42\varphi - 39.5\varphi^2$, с частицами TiO_2 размером 150 нм: $\lambda_r = 1 + 4.82\varphi - 23.1\varphi^2$, с частицами ZrO_2 размером 44 нм: $\lambda_r = 1 + 4.61\varphi - 28.7\varphi^2$, с частицами ZrO_2 размером 105 нм: $\lambda_r = 1 + 4.61\varphi - 13.4\varphi^2$. Эта неуниверсальность связана с тем, что они являются функциями размера наночастиц.

В разделе 4.3 приведены результаты исследований зависимости коэффициента теплопроводности наножидкости от размера частиц. Показано, что в рассматриваемом диапазоне размеров наночастиц (5 – 150 нм) во всех рассмотренных случаях наблюдался монотонный рост коэффициент теплопроводности с увеличением размера частиц.

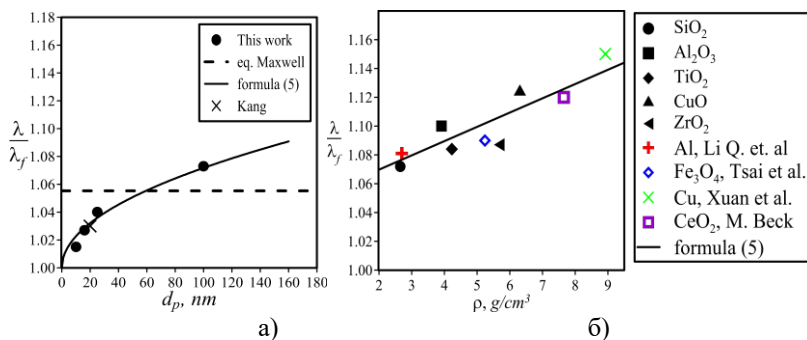


Рис. 13. Зависимость относительной теплопроводности наножидкости от размера наночастиц (Al_2O_3) (а) и от плотности материала наночастиц (б) для объемной концентрации 2 %.

Для наночастиц с оксидами металлов экспериментально было показано, что коэффициент теплопроводности наножидкости с достаточно малыми частицами может оказаться ниже предсказываемого теорией Максвелла значения (см. рис. 13а). Впервые установлено, что это поведение связано с размером наночастиц. При увеличении размера наночастиц коэффициент теплопроводности

сти наножидкостей растет и, начиная с некоторого размера частиц, превосходит предсказываемые классической теорией значения.

В разделе 4.4 представлены результаты исследований зависимости коэффициента теплопроводности наножидкостей от материала наночастиц. В диссертации впервые экспериментально установлена зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от плотности материала наночастиц. Показано, что при одинаковой концентрации и близком размере наночастиц коэффициент теплопроводности наножидкости возрастает прямо пропорционально плотности материала наночастиц (см. рис. 136). Эта зависимость согласуется с данными молекулярно-динамического моделирования. На основе полученных экспериментальных данных разработана эмпирическая корреляция для описания коэффициента теплопроводности наножидкостей, учитывающая зависимость от концентрации, размера и материала наночастиц в широком диапазоне параметров с погрешностью не превышающей 5 % :

$$\lambda_r = 1 + (0.0193 + 0.00383\tilde{\rho})\sqrt{\tilde{D}\phi},$$

где ϕ – объемная концентрация наночастиц,

$$\tilde{\rho} = \rho_p / \rho_f, \quad \rho_p, \rho_f - \text{плотность материала наночастиц и жидкости, } \tilde{D} = d / \sigma,$$

σ – эффективный размер молекулы несущей жидкости.

Раздел 4.6 посвящен изучению зависимости коэффициента теплопроводности наножидкости от свойств базовой жидкости. Установлено, что относительный коэффициент теплопроводности наножидкостей тем выше, чем ниже коэффициент теплопроводности базовой жидкости. В разделе 4.7 приведены результаты исследований зависимости коэффициента теплопроводности наножидкости от добавок стабилизирующих ПАВ и полимеров. Показано, что добавка изученных стабилизирующих веществ в наножидкость слабо влияет на ее коэффициент теплопроводности, при этом коэффициент вязкости наножидкости может увеличиваться в несколько раз.

Температурная зависимость коэффициента теплопроводности наножидкостей исследована в разделе 4.8. Установлено, что с увеличением температуры приращение коэффициента теплопроводности при добавлении в него наночастиц монотонно увеличивается. Кроме того, было показано, что с увеличением концентрации наночастиц приращение коэффициента теплопроводности, связанное с увеличением температуры, увеличивается. Принимая во внимание тот факт, что коэффициент теплопроводности базовой жидкости с ростом температуры тоже увеличивается, а коэффициент вязкости, напротив, снижается, становится очевидным, что с практической точки зрения применение наножидкостей в качестве теплоносителя будет более эффективным при более высоких температурах.

Пятая глава посвящена исследованию вынужденной конвекции наножидкостей. Несмотря на значительное количество экспериментальных и особенно расчетных работ в области конвективного теплообмена наножидкостей, вопрос об эффективности использования наножидкости в качестве теплоносителя и поиск оптимальных наножидкостей для их использования в тех или

иных условиях остается открытым. Это определяет важность проведения систематических экспериментальных и расчетных исследований вынужденной конвекции наножидкостей, выполненных в данной диссертационной работе. Изучен теплообмен более десятка наножидкостей на основе воды и этиленгликоля с частицами SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO и алмаза. Объемная концентрация частиц менялась от 0,25 до 6 %, а их размер – от 5 до 151 нм.

В разделе 5.1 приведено описание экспериментальной установки для исследования вынужденной конвекции наножидкости и результаты ее тестирования. Результаты тестирования экспериментальной установки показали, что она позволяет измерять локальный коэффициент теплоотдачи и также перепад давления с погрешностью около 5 % в ламинарном и турбулентном режимах.

Раздел 5.2 посвящен описанию математической модели вынужденной конвекции наножидкостей. Была разработана математическая модель вынужденной конвекции наножидкостей. Для описания гидродинамики и теплообмена наножидкостей рассмотрены несколько подходов. Первый основан на гомогенной модели, в которой наножидкость рассматривается как однородная среда со свойствами, зависящими от концентрации частиц. Второй подход основан на двухкомпонентной модели теплообмена с учетом диффузии и термодиффузии наночастиц, а также реологии наножидкости. При этом при построении моделей использовались экспериментально обоснованные значения коэффициентов переноса наножидкостей, зависящие от концентрации, размера, материала наночастиц, температуры и реологии.

В разделе 5.3. представлены результаты экспериментального исследования вынужденной конвекции наножидкостей в ламинарном режиме. Систематически изучена вынужденная конвекция наножидкостей в круглых прямых каналах с постоянной плотностью теплового потока на стенках, внутренний диаметр каналов составлял 6 – 10 мм. Показано, что с помощью добавок наночастиц в теплоноситель можно повысить среднее значение коэффициента теплоотдачи на 35 – 40 % (см. рис 14а). Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц локальный и средний коэффициенты теплоотдачи в ламинарном режиме течения возрастают и при фиксированном значении расхода теплоносителя, и при фиксированном значении числа Рейнольдса (см. рис. 14). Анализ результатов измерений показывает, что прирост коэффициента теплоотдачи, вызванный увеличением концентрации наночастиц в стабилизированной области, прямо пропорционален увеличению коэффициента теплопроводности наножидкости (см. рис.14а).

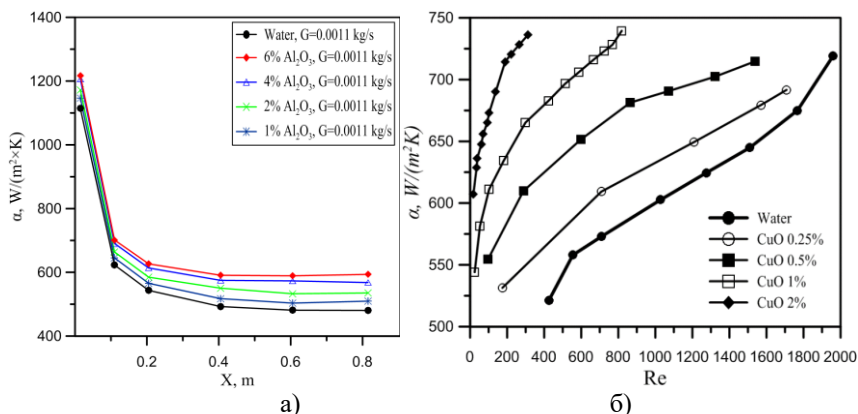


Рис. 14. Зависимость локального (а) и среднего коэффициента теплоотдачи (б) для различных концентраций наночастиц Al_2O_3 и CuO .

Впервые установлено, что при фиксированном массовом расходе коэффициент теплоотдачи при ламинарном вынужденной конвекции наножидкостей возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном значении числа Рейнольдса может иметь место экстремум. Такое поведение теплоотдачи определяется зависимостью коэффициентов переноса наножидкости от концентрации, размера и материала наночастиц. С увеличением среднего размера наночастиц коэффициент теплопроводности наножидкостей, как показано в третьей и четвертой главах, возрастает, а коэффициент вязкости, напротив, снижается. Экспериментально показано, что при одинаковом среднем размере наночастиц и их одинаковой концентрации наножидкости с различными материалами частиц могут иметь различные коэффициенты теплоотдачи, что также обусловлено влиянием коэффициентов переноса.

В разделе 5.4 приведены результаты экспериментального исследования вынужденной конвекции наножидкостей в турбулентном режиме. Показано, что с увеличением концентрации наночастиц локальный и средний коэффициенты теплоотдачи при фиксированном значении числа Re возрастают. При фиксированном значении массового расхода теплоносителя может иметь место снижение коэффициента теплоотдачи с ростом концентрации частиц (рис. 15а). Установлено, что при фиксированном расходе коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении наножидкости возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном числе Re может иметь место экстремум (рис. 15б). Положение этого экстремума и максимальное значение интенсификации теплообмена индивидуально для каждой наносuspension и зависит от материала и размера наночастиц, а также свойств базовой жидкости. Кроме того, установлено влияние материала наночастиц на величину коэффициента теплоотдачи и потери давления. Таким образом, было показано, что интенсификация теплообмена

фикация теплообмена за счет применения наносuspензий в турбулентном режиме является оптимизационной задачей. Положительный для интенсификации теплообмена эффект зависит от соотношения между вязкостью и теплопроводностью наножидкости, а значит, от материала частиц и их размера, концентрации и свойств базовой жидкости.

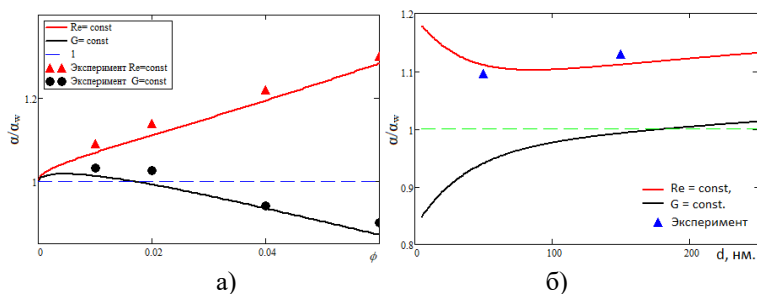


Рис. 15. Зависимость интенсификации теплообмена от концентрации наночастиц Al_2O_3 при их размере 150 нм (а) и размера при концентрации 2 % (б).

Раздел 5.5 посвящен численному моделированию вынужденной конвекции наножидкостей. При тестировании разработанных методик моделирования и расчетных исследований использовались экспериментально измеренные значения теплофизических характеристик, соответствующих конкретным наножидкостям. Впервые проведена экспериментальная верификация двухкомпонентной модели теплообмена наножидкости с учетом диффузии и термодиффузии наночастиц (рис. 16а). Показано, что термодиффузия приводит к уменьшению концентрации наночастиц вблизи стенок канала, в результате чего здесь уменьшается локальная вязкость и увеличивается скорость потока. Это приводит к тому, что теплообмен за счет эффекта термодиффузии интенсифицируется. Однако вклад термодиффузии при разумных условиях обычно невелик (от одного до пяти процентов). Влияние термодиффузии увеличивается с ростом концентрации наночастиц и уменьшением расхода теплоносителя. Сравнение результатов расчетов с экспериментом показало, что расхождение по обоим моделям находится в пределах погрешности экспериментов.

С помощью численного моделирования изучено влияние реологии наножидкости на характеристики ее течения и теплообмена. Показано, что в отличие от термодиффузии изменение реологии может вносить значительный вклад в теплообмен наножидкостей. С помощью моделирования установлено, что с увеличением концентрации наночастиц неньютоновской наножидкости профиль скорости в канале выполаживается, а, поскольку расход жидкости сохраняется, локальная скорость у стенки возрастает (см. рис. 16б). Увеличение скорости вблизи стенки приводит к дополнительному увеличению коэффици-

ента теплопередачи. С увеличением концентрации наночастиц индекс течения степенной модели наножидкости уменьшается и этот эффект усиливается. Таким образом, был установлен дополнительный механизм интенсификации теплообмена при конвективной теплоотдаче неньютоновских наножидкостей, помимо увеличения коэффициента теплопроводности.

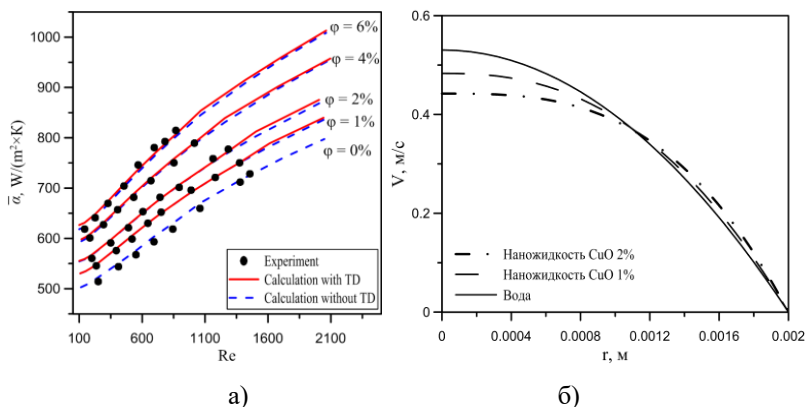


Рис. 16. Зависимость коэффициента теплоотдачи (а) и профиль скорости в канале для различных концентраций наночастиц (б).

В целом по итогам расчетного исследования показано, что при использовании экспериментально обоснованных коэффициентов переноса разработанная математическая модель может хорошо описывать данные экспериментов по вынужденной конвекции наножидкостей в прямых круглых каналах.

В разделе 5.6 представлены результаты экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода при течении наножидкостей в круглой трубе. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход при течениях наножидкостей наблюдается при меньших значениях числа Рейнольдса, чем в базовой жидкости. С увеличением концентрации наночастиц значение критического числа Рейнольдса снижается (см. рис. 17а). Кроме того, впервые было показано, что в наножидкостях с уменьшением размера наночастиц ламинарно-турбулентный переход происходит при меньших значениях числа Рейнольдса (см. рис. 17б).

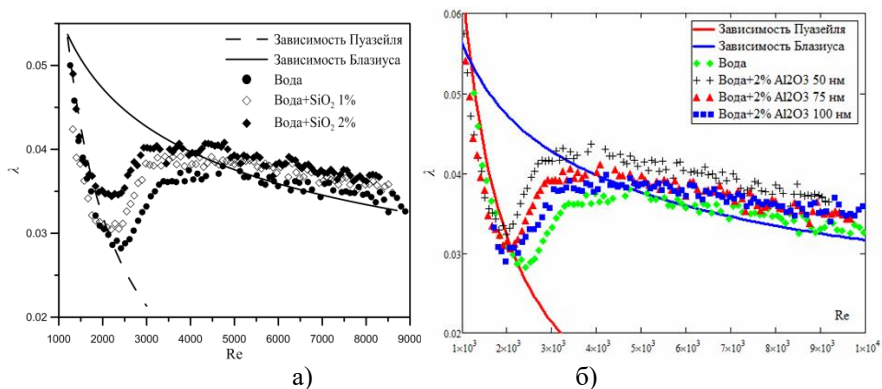


Рис. 17. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для различных концентрации и размеров наночастиц SiO_2 (а) и Al_2O_3 (б).

Шестая глава посвящена экспериментальному исследованию кризиса кипения наножидкостей на цилиндрическом нагревателе. Изучено влияние концентрации, размера и материала наночастиц, добавки стабилизирующих ПАВ, а также размеров нагревателя и длительности кипения. В разделе 6.1 дано описание экспериментальной установки по изучению кризиса кипения наножидкостей. Для кипения чистой жидкости проведено тестирование экспериментальной методики. Полученные значения плотности теплового потока в зависимости от температуры перегрева в пределах 10 % погрешности описываются зависимостью Розенау. Величина критической плотности теплового потока (КТП) при этом согласуется со значением по теории С. С. Кутателадзе.

В разделе 6.2 приведены результаты исследования зависимости КТП от концентрации наночастиц. Показано, что использование наножидкостей позволяет в разы увеличить критическую плотность теплового потока при кипении даже при незначительных концентрациях наночастиц (менее 0,5 %). Это продемонстрировано на рис.18а. При этом с увеличением концентрации наночастиц критическая плотность теплового потока растет. Несмотря на то, что зависимость КТП от концентрации для каждой частиц индивидуальна, качественно зависимости схожи и описываются корреляцией вида: $q/q_w = 1 + a\phi^b$, где $a = 2,169$, $b = 0,1903$ для частиц SiO_2 (25 нм); $a = 1,125$, $b = 0,4117$ для частиц алмаза (5 нм); $a = 0,8595$, $b = 0,3292$ для частиц оксида железа Fe_3O_4 (100 нм).

Систематически исследована микроструктура поверхности образцов нагревателя после кипения. Обнаружено, что на поверхности нагревателя образуются достаточно плотные отложения наночастиц. Рельеф отложений из наночастиц на поверхности нагревателя можно видеть на рис. 18б. С увеличением концентрации частиц толщина отложений и степень покрытия при прочих равных условиях также растет.

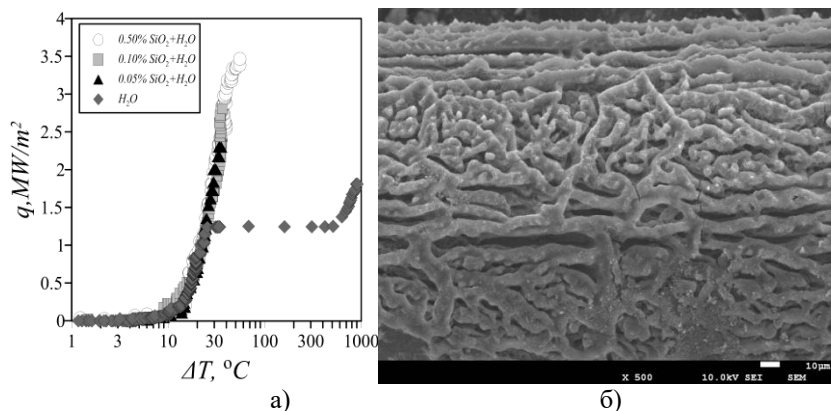


Рис. 18. Кривые кипения в дистиллированной воде и наножидкостях с различной концентрацией частиц SiO_2 (а) и РЭМ изображение поверхности нихромовой проволоки после кипения в наножидкости (б).

Раздел 6.3 посвящен исследованию зависимости КТП от размера наночастиц. Установлено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей зависит от размера наночастиц. С ростом размера наночастиц критическая плотность теплового потока увеличивается (см. рис. 19а). Установлена взаимосвязь между размером наночастиц и рельефом поверхности отложений, формирующихся на поверхности нагревателя при кипении наножидкости.

Результаты исследований зависимости КТП от размера нагревателя приведены в разделе 6.4. Установлено, что с уменьшением размера нагревателя относительная критическая плотность теплового потока значительно повышается. Таким образом, показано, что действие наночастиц на кризис кипения существенно сильнее сказывается на проволоках меньшего размера. С увеличением размеров нагревателя эффект от наличия наночастиц на кризис кипения уменьшается (см. рис. 19б).

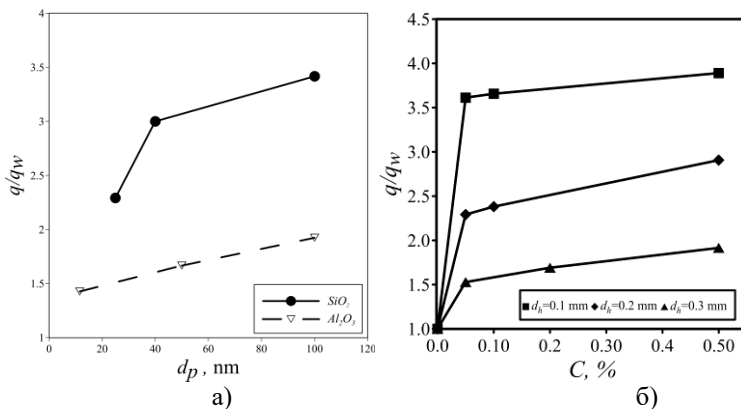


Рис. 19. Зависимость относительной критической плотности теплового потока от размера наночастиц при концентрации 0,05 % (а) и зависимость относительной критической плотности теплового потока от концентрации наночастиц SiO_2 для различных диаметров проволоки (б).

Раздел 6.5 посвящен исследованию зависимости КТП от длительности процесса кипения. Впервые обнаружено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей зависит от длительности процесса кипения. Показано, что с ростом времени кипения критическая плотность теплового потока быстро возрастает и далее выходит на некоторый установившийся уровень. Зависимость критической плотности теплового потока от длительности хорошо описывается корреляцией вида $q/q_w = 1 + at^b$, где $a = 0,734$, $b = 1/5$ для частиц SiO_2 (25 нм). Объяснить такое поведение можно исходя из гипотезы влияния на КТП осаждения частиц на нагревателе. Рост и формирование отложений на поверхности нагревателя не является мгновенным процессом. На это требуется определенное время, после достижения которого наступает некоторое равновесное состояние, в котором высота микрошероховатой поверхности перестает меняться. Полученный в экспериментах факт существования такой временной зависимости можно рассматривать как прямое подтверждение ключевой роли процесса осаждения в кризисе кипения наножидкостей. Данные электронной микроскопии отложений подтверждают это.

В разделе 6.6 представлены результаты исследований КТП при кипении наножидкостей с различным материалом наночастиц. Установлено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкости с частицами оксида алюминия существенно ниже (почти вдвое), чем с частицами оксида кремния при одинаковом размере частиц (100 нм). Показано, что и структура, и толщина отложений на поверхности нагревателя для различных частиц также значительно различаются. Из приведенных выше данных следует, что ключе-

вую роль в кризисе кипения наножидкостей играют отложения наночастиц на поверхности нагревателя.

Проведен анализ влияния свойств наножидкости на кризис кипения. Было показано, что теплофизические свойства наножидкости напрямую не могут так существенно повлиять на кризис кипения. Более того, с точки зрения этих свойств добавление наночастиц должно отрицательно сказываться на КТП, поскольку вязкость с увеличением концентрации частиц растёт, а поверхностное натяжение уменьшается. Полученные в экспериментах факты существования зависимостей КТП от концентрации, размера, материала частиц, диаметра нагревателя и длительности процесса кипячения можно рассматривать как прямое подтверждение ключевой роли процесса осаждения в кризисе кипения наножидкостей. Установлена связь между краевым углом смачивания поверхности, покрытой осадками из наночастиц, длительностью процесса кипячения и величиной критической плотности теплового потока. Таким образом, в результате исследований было показано, что основным механизмом интенсификации КТП при кипении наножидкостей является улучшение смачиваемости поверхности, за счет формирования капиллярно-пористых отложений на поверхности нагревателя.

В разделе 6.7 показано, что покрытие из наночастиц SiO_2 , полученное кипячением наножидкости, увеличивает величину критического теплового потока даже при кипении чистой воды. При этом это увеличение довольно значительное. Критическая плотность теплового потока на покрытой проволоке в 2,7 раз выше, чем на чистой. Это сопоставимо с теми приращениями, что были продемонстрированы в работах различных авторов на капиллярно-пористых покрытых покрытиях, созданных другими методами.

В разделе 6.8 впервые исследовано влияние стабилизирующих веществ на кризис кипения наножидкостей. В результате было показано, что добавка ПАВ к наножидкости может дополнительно повысить КТП на 30 – 70 %.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы настоящей работы.

1. Разработана и протестирована численная методика моделирования течений и теплообмена одно- и многофазных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла. В результате тестирования получено хорошее качественное и количественное согласие расчетов и эксперимента как по локальным, так и по интегральным характеристикам течения и теплообмена.

2. С помощью численного моделирования систематически изучены основные режимы течения и проведена оптимизация наиболее распространенных микромиксеров. Обнаружены новые режимы течения и установлены факторы, позволяющие управлять режимами течения и эффективностью перемешивания жидкостей в микромиксерах.

3. Проведено систематическое исследование двухфазных и двухжидкостных течений в микроканалах. Проведено систематическое

экспериментальное и численное исследование режимов течений воды и нефти в микроканале Y-типа. Установлены четыре различных типа режима течения вода–нефть в данном микроканале: параллельный, капельный, снарядный и хаотический. Впервые исследованы и установлены механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой породы. Показано, что при помощи наножидкостей можно значительно повысить КИН при заводнении пласта. Установлено, что основным механизмом увеличения нефтеотдачи при закачке наножидкости в насыщенную нефтью микропористую среду является улучшение смачиваемости.

4. Проведено систематическое экспериментальное изучение коэффициентов вязкости и реологии нескольких десятков наножидкостей. Изучено влияние концентрации, размера, материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих веществ. Показано, что вязкость наножидкостей существенно превышает вязкость крупнодисперсных суспензий и увеличивается с уменьшением размера частиц. При этом переход от ньютоновского поведения к неньютоновскому в наножидкостях может происходить не только при увеличении концентрации наночастиц, как это имеет место для обычных суспензий, но и при уменьшении размеров наночастиц. Кроме того, впервые экспериментально показано, что коэффициент вязкости зависит от материала наночастиц.

5. Проведено систематическое экспериментальное изучение коэффициентов теплопроводности нескольких десятков наножидкостей. Изучено влияние концентрации, размера, материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих веществ. Показано, что коэффициент теплопроводности наножидкостей в общем случае превышает значения, предсказываемые теорией Максвелла, и растет с увеличением размера частиц. Вместе с тем установлено, что при достаточно малом размере наночастиц коэффициент теплопроводности может быть и меньше значений, предсказываемых формулой Максвелла. Впервые экспериментально установлена зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от плотности материала наночастиц. Коэффициент теплопроводности наножидкости возрастает пропорционально плотности материала наночастиц.

6. Разработана и протестирована математическая модель течений и теплообмена наножидкостей с учетом их реологии, термодиффузии и турбулентности. Показано, что при использовании экспериментально обоснованных коэффициентов переноса гомогенная модель может хорошо описывать данные экспериментов по вынужденной конвекции наножидкостей в прямых круглых каналах. Установлено, что термодиффузия в отличие от реологии слабо влияет на характеристики теплообмена наножидкостей в типичных условиях.

7. Проведены систематические экспериментальные исследования вынужденной конвекции более десятка различных наножидкостей. Исследовано влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости на коэффициент теплоотдачи и перепад давления при ламинарной и турбулентной вынужденной конвекции в прямых круглых каналах, обогреваемых с постоянной плотностью теплового потока. Показано, что с помощью добавок наночастиц в теплоноситель можно повысить среднее значение коэффициента теплоотдачи на 35 – 40 %. Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц коэффициент теплоотдачи при ламинарном теплообмене возрастает, а в турбулентном теплообмене при фиксированном значении массового расхода теплоносителя может иметь место снижение коэффициента теплоотдачи с ростом концентрации частиц. Впервые установлено, что при фиксированном массовом расходе коэффициент теплоотдачи при ламинарном и турбулентном теплообмене наножидкости возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном значении числа Рейнольдса может иметь место экстремум. Такое поведение теплоотдачи определяется зависимостью коэффициентов переноса наножидкости от концентрации, размера и материала наночастиц.

8. Проведено экспериментальное исследование ламинарно-турбулентного перехода при течении наножидкостей в круглой трубе. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход в течениях наножидкостей наблюдается при меньших значениях числа Рейнольдса, чем в базовой жидкости. С увеличением концентрации наночастиц значение критического числа Рейнольдса снижается. Кроме того, впервые было показано, что в наножидкостях с уменьшением размера наночастиц ламинарно-турбулентный переход происходит при меньших значениях числа Рейнольдса.

9. Систематически исследован кризис кипения наножидкостей. Установлены зависимости КТП от концентрации, размера, материала частиц, диаметра нагревателя и длительности процесса кипячения, добавки ПАВ. Показано, что основным механизмом интенсификации КТП при кипении наножидкостей является улучшение смачиваемости поверхности за счет формирования капиллярно-пористых отложений на поверхности нагревателя.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Гаврилов А. А., Дектерев А. А. Моделирование течений в микромиксерах // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 601–612.

2. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Gavrilov A. A., Dekterev A. A. On Optimization of Mixing Process of Liquids in Microchannels // Журнал СФУ, серия: математика и физика. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 146–156.
3. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гаврилов А. А., Дектерев А. А. Смешение в микромиксере Т-типа при умеренных числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 5. – С. 577–587.
4. Минаков А. В., Лобасов А. С., Дектерев А. А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 4. – С. 481–488.
5. Лобасов А. С., Минаков А. В. Компьютерное моделирование тепломассообменных процессов в микроканалах с использованием CFD-пакета SigmaFlow // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4. – № 4. – С. 781–792.
6. Минаков А. В., Ягодницына А. А., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном микроканале // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – Т. 152. – № 3. – С. 18–21.
7. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Dekterev A. A., Gavrilov A. A. Investigation of slip boundary conditions in the T-shaped microchannel // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2013. – Vol. 43. – P. 161–169.
8. Minakov A. V., Yagodnitsina A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Ya., Bilsky A. V. Study of fluid flow in micromixer with symmetrical and asymmetrical inlet conditions // La Houille Blanche. – 2013. – № 5. – P. 12–21.
9. Minakov A. V., Yagodnitsina A. A., Lobasov A. S., Rudyak V. Y., Bilsky A. V. Micro-LIF and Numerical Investigation of Mixing in Microchannel // Журнал СФУ, серия: техника и технологии. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 15–27.
10. Минаков А. В., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Пряжников М. И. Расчетное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе наночастиц Al_2O_3 // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. – № 5. – С. 194–200.
11. Rudyak V. Ya., Minakov A. V. Modeling and optimization of Y-type micromixers // Micromachines. – 2014. – Vol. 5. – № 4. – P. 886–912.
12. Минаков А. В. Численный алгоритм решения задач гидродинамики с подвижными границами и его тестирование // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2014. – Т. 54. – № 10. – С. 1618–1629.
13. Минаков А. В., Лобасов А. С., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряжников М. И. Измерение критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей на цилиндрическом нагревателе // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – № 13. – С. 44–51.
14. Минаков А. В., Гузей Д. В., Дектерев Д. А., Лобасов А. С., Пряжников М. И. Расчетно-экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе оксида алюминия в прямоточном теплообменнике // Журнал СФУ, серия: техника и технологии. – 2014. – Т. 7. – С. 32–47.

15. Ryzhkov I. I., Minakov A. V. The effect of nanoparticle diffusion and thermophoresis on convective heat transfer of nanofluid in a circular tube // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 2014. – Vol. 77. – P. 956–969.
16. Minakov A. V., Lobasov A. S., Pryazhnikov M. I., Guzei D. V. Experiment-calculated investigation of the forced convection of nanofluids using single fluid approach // *Defect Diffusion Forum*. – 2014. – Vol. 348. – P. 123–138.
17. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди в цилиндрическом канале // *Теплофизика высоких температур*. – 2015. – Т. 53. – № 2. – С. 256–264.
18. Minakov A. V., Lobasov A. S., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Rudyak V. Ya. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 88. – P. 140–148.
19. Пряхников М. И., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Влияние диаметра, материала наночастиц и размера нагревателя на критическую плотность теплового потока при кипении наножидкостей // *Письма в Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 41. – № 18. – С. 53–59.
20. Гузей Д. В., Минаков А. В., Пряхников М. И., Дектерев А. А. Численное моделирование газожидкостных потоков в мини и микроканалах // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2015. – Т. 1. – С. 61–72.
21. Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А. Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале // *Ученые записки Казанского университета, серия: Физико-математические науки*. – 2015. – Т. 157. – № 3. – С. 85–96.
22. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В., Пряхников М. И., Лобасов А. С. Измерение коэффициента теплопроводности наножидкостей методом нагреваемой нити // *Инженерно-физический журнал*. – 2015. – Т. 88. – № 1. – С. 148–160.
23. Лобасов А. С., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Влияние вязкости на режимы течения в микромиксере Т-типа // *Известия РАН: механика жидкости и газа*. – 2016. – № 3. – С. 89–98.
24. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Пряхников М. И. О ламинарно-турбулентном переходе в течениях наножидкостей // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 807–810.
25. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // *Физическая мезомеханика*. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 75–83.
26. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Пряхников М. И. Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42. – С. 9–16.
27. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Сметанина М. С., Пряхников М. И. Экспериментальные данные о зависимости вязкости наножидкостей на основе воды и

- этиленгликоля от размера и материала частиц // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 467. – № 3. – С. 289–291.
28. Minakov A. V., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Ya. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 102. – P. 745–755.
29. Minakov A. V., Guzei D. V., Meshkov K. N., Popov I. A., Shchelchikov A. V. Experimental study of turbulent forced convection of nanofluid in channels with cylindrical and spherical hollows // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 115. – P. 915–925.
30. Минаков А. В., Шебелева А. А., Ягодницына А. А., Ковалев А. В., Бильский А. В. Расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа // Письма в Журнал технической физики. – 2017. – Т. 43. – № 18. – С. 82–89.
31. Пузырь А. П., Минаков А. В., Буров А. Е., Жарков С. М., Максимов Н. Г., Пряжников М. И. Влияние электролитически введенных ионов серебра на вязкость и теплопроводность коллоидного раствора наноалмаза // Коллоидный журнал. – 2017. – Т. 79. – № 2. – С. 206–211.
32. Pryazhnikov M. I., Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Guzei D. V. Thermal conductivity measurements of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 104. – P. 1275–1282.
33. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Guzei D. V., Zeer G. M., Rudyak V. Ya. The experimental study of nanofluids boiling crisis on cylindrical heaters // International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – Vol. 116. – P. 214–223.
34. Лобасов А. С., Минаков А. В., Рудяк В. Я. Изучение режимов смешения жидкости и наножидкости в Т-образном микромиксере // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91. – № 1. – С. 133–145.
35. Lobasov A. S., Minakov A. V. Analyzing mixing quality in a T-shaped micro-mixer for different fluids properties through numerical simulation // Chemical engineering and processing. – 2018. – Vol. 124. – P. 11–23.
36. Lobasov A. S., Minakov A. V., Kuznetsov V. V., Rudyak V. Y., Shebeleva A. A. Investigation of mixing efficiency and pressure drop in T-shaped micromixers // Chemical engineering and processing. – 2018. – Vol. 134. – P. 105–114.
37. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Rheological behavior of water and ethylene glycol based nanofluids containing oxide nanoparticles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2018. – Vol. 554. – P. 279–285.
38. Rudyak V. Y., Minakov A. V. Thermophysical properties of nanofluids // The European Physical Journal E. – 2018. – Vol. 41. – № 15. – URL: <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9>.
39. Минаков А. В., Михиенкова Е. И., Неверов А. Л., Бурюкин Ф. А. Экспериментальное исследование влияния добавки наночастиц на реологические свойства суспензии // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – № 9. – С. 3–11.

40. Лобасов А. С., Шебелева А. А., Минаков А. В. Изучение режимов смешения воды и этанола в Т-образных микромиксерах // Журнал СФУ, серия: математика и физика. – 2019. – Т. 12. – № 2. – С. 202–212.
41. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Yagodnitsyna A. A., Kovalev A. V., Bilsky A. V. Flow Regimes of Viscous Immiscible Liquids in T-Type Microchannels // Chemical Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 42. – № 5. – P. 1037–1044.
42. Guzei D. V., Minakov A. V., Rudyak V. Ya. On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 139. – P. 180–192.
43. Минаков А. В., Гузей Д. В., Жигарев В. А., Пряхников М. И., Шебелева А. А. Экспериментальное исследование транспорта магнитных наночастиц в круглом миниканале в постоянном магнитном поле // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 5. – С. 2277–2285.
44. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids // Heat Transfer Engineering. – 2020. – Vol. 41. – No. 5. – P. 457–460.
45. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Suleymana Y. N., Meshkova V. D. An experimental study of the effect of the addition of silicon oxide nanoparticles on the wettability characteristics of rocks with respect to oil // Technical Physics Letter. – 2020. – Vol. 46. – No. 2. – P. 1238–1240.
46. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Suleymana Y. N., Meshkova V. D., Guzei D. V. Experimental study of nanoparticle size and material effect on the oil wettability characteristics of various rock types // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – V. 321. – No. 114906. – 10 p.
47. Minakov A. V., Lobasov A. S., Shebeleva A. A., Shebelev A. V. Analysis of Hydraulic Mixing Efficiency in Widespread Models of Micromixers // Fluids. – 2020. – Vol. 5(4). – No. 211. – URL: <https://doi.org/10.3390/fluids5040211>
48. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Y., Filimonov S. A. Numerical Study of the Mechanisms of Enhanced Oil Recovery Using Nanosuspensions // Theor. Comput. Fluid Dyn. – 2021. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00162-021-00569-9>

Монографии:

1. Рудяк В. Я., Анискин В. М., Кузнецов В. В., Маслов А. А., Минаков А. В., Миронов С. Г. Моделирование микро- и нанотечений. – М.: НГАСУ, 2014. – 340 с.
2. Рудяк В. Я., Минаков А. В. Современные проблемы микро- и нанофлюидики. – М.: Наука, 2016. – 296 с.
3. Rudyak V. Ya., Aniskin V. M., Maslov A. A., Minakov A. V., Mironov S. G. Micro- and Nanoflows. Modeling and Experiments. Fluid Mechanics and its Applications. – Amsterdam: Springer Int. Publishing, 2018. – 241 p.