

На правах рукописи



Гузей Дмитрий Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ
НАНОЖИДКОСТЕЙ**

1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск — 2021

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

Научный руководитель:

Минаков Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий межкафедральной научно-исследовательской лабораторией фундаментальных исследований Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации».

Косьянчук Василий Викторович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории Наномеханики Научно-исследовательский института механики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»

Защита состоится «24» июня 2022 г. в 11:⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д 003.035.02) в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, http://itam.nsc.ru/education/dissertation_board.html

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Задача интенсификация конвективного теплообмена на сегодняшний день является крайне актуальной. Огромное количество теплообменного оборудования в различных отраслях промышленности требует постоянного обновления и модернизации. В условиях неуклонного роста цен на сырье, энергоносители, металл и прочие материалы требуется повышение эффективности работы и уменьшение габаритов теплообменного оборудования, с целью уменьшения материалоемкости. Помимо этого, существует острая необходимость микротеплообменных устройств вызванная, прежде всего, развитием микропроцессорной техники, где уже сейчас проблемы охлаждения выходят на первое место и в будущем могут стать серьезным тормозом в развитии электронно-вычислительных систем. Теплообменные системы с микро и наноразмерами оказываются гораздо более энергоэффективными, по сравнению с макросистемами, с характерными размерами порядка 1-100 мкм.

Одним из путей решения проблемы интенсификации теплообмена является использование так называемых наножидкостей. Наножидкость – это суспензия наноразмерных частиц (1-100 нм) металлов, оксидов металлов, углеродных нанотрубок, композитных частиц в базовой жидкости.

Анализ современного состояния работ, посвященных исследованиям наножидкостей, показывает, что на сегодняшний день опубликовано большое количество работ посвященных исследованию конвективного теплообмена наножидкостей. В работах показано, что использование наножидкостей позволяет добиться интенсификации теплообмена на десятки процентов, а в некоторых работах и сотни процентов. Этот факт говорит о том, что использование наножидкостей может стать одним из путей решения проблемы интенсификации конвективного теплообмена в различных отраслях без существенного изменения теплообменного оборудования. Но добавка наночастиц повышает вязкость базовой жидкости, а, следовательно, и величину перепада давления. В существующих работах анализируется только интенсификация теплообмена и не уделяется внимания значению перепада давления при использовании наножидкостей в качестве теплоносителя. На сегодняшний день нет ответа на вопрос теплогидравлической эффективности применения наножидкостей для интенсификации теплообмена. Исследование теплогидравлической эффективности применения наножидкостей и сравнение ее с существующими методами интенсификации теплообмена является актуальной задачей для исследований.

Исследования в данной предметной области чрезвычайно актуальны, и содержат значительный объем научной новизны. Так как помимо исследований коэффициента теплоотдачи и перепада давления необходимо экспериментальное исследование коэффициентов вязкости и теплопроводности используемых наножидкостей. Реализация данных исследований позволит со-

здать новые технологий энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла, но и ответить на некоторые принципиальные вопросы теплофизики и гидродинамики наножидкостей.

Цель работы заключается в систематическом исследовании теплоотдачи и потерь давления при вынужденной конвекции наножидкостей.

Задачи, решенные для достижения поставленной цели.

1. Создание экспериментальной установки по исследованию коэффициента теплоотдачи и потерь давления при вынужденной конвекции наножидкостей.

2. Исследование эффективности применения наножидкостей для интенсификации вынужденной конвекции в прямых круглых каналах.

3. Исследование влияния поверхностных интенсификаторов на эффективность теплообмена наножидкостей в круглом канале.

4. Исследование воздействию магнитного поля на эффективность теплообмена магнитных наножидкостей.

5. Разработка численной модели для описания конвективного теплообмена наножидкостей с учетом влияния магнитного поля.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментального исследования эффективности применения наножидкостей для интенсификации вынужденной конвекции в прямых круглых каналах.

2. Результаты экспериментального исследования влияния поверхностных интенсификаторов на эффективность конвективного теплообмена наножидкостей в круглом канале.

3. Результаты экспериментального исследования воздействия магнитного поля на эффективность теплообмена магнитных наножидкостей.

4. Численная методика для описания течения и теплообмена магнитных наножидкостей в неоднородном магнитном поле.

Научная новизна работы определяется следующими положениями.

1. Впервые экспериментально обосновано применение наножидкостей для интенсификации конвективного теплообмена в гладких круглых каналах и установлены основные факторы, от которых зависит теплогидравлическая эффективность наножидкостей в различных режимах течения.

2. Впервые экспериментально показано, что наножидкости позволяют получить теплогидравлическую эффективность, сопоставимую с теплогидравлической эффективностью каналов с искусственными интенсификаторами теплообмена.

3. Разработана математическая модель для описания течения теплообмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле на основе эйлера двухкомпонентного подхода с однокоростным приближением.

4. С помощью PIV-метода, тепловизионных измерений и численного моделирования установлено, что основным механизмом аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи магнитной наножидкости в постоян-

ном магнитном поле является изменение локальной структуры потока и вихреобразование за счет формирующихся под действием магнитного поля отложений наночастиц.

Практическая значимость состоит в том, что впервые экспериментально обосновано применение наножидкостей для интенсификации конвективного теплообмена. Установлены основные факторы, от которых зависит теплогидравлическая эффективность наножидкостей в различных режимах течения. Показано, что, варьируя материал, концентрацию и размер наночастиц, входную температуру теплоносителя и вид базовой жидкости, можно добиться интенсификации теплообмена при вынужденной конвекции наножидкостей в гладких круглых каналах на 30–40 %. Впервые показано, что наножидкости в гладких каналах имеют теплогидравлическую эффективность, сопоставимую с теплогидравлической эффективностью воды в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена. Использование наножидкостей позволяет дополнительно на 30–40 % интенсифицировать теплообмен в каналах с поверхностными интенсификаторами. Показано, что при помощи магнитного поля можно еще дополнительно интенсифицировать теплообмен магнитных наножидкостей на 40–80 %.

Основные результаты работы вошли в научно-технические отчеты по грантам РФФИ (№18-48-243016 p_мол_a, №16-48-243061 p_мол_a).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новой математической модели для описания течения и теплообмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле на основе эйлера двухкомпонентного подхода с односкоростным приближением. С помощью разработанной математической модели и PIV-метода был установлен новый механизм аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции магнитной наножидкости в магнитном поле.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается использованием поверенных измерительных приборов, современных аппаратных и программных средств для обработки данных, сопоставлением и согласованием полученных результатов с известными в литературе данными, использованием физически обоснованных математических моделей и результатами их систематического тестирования и сопоставления с эталонными результатами и экспериментами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 51-я Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (2013), Всероссийская конференция молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (2013), Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева (2013, 2015, 2017), V Всероссийская конференция «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий» (2015), Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар» (2014, 2017, 2018, 2019), Национальный конгресс по энер-

гетике (2014), 4th European Conference on Microfluidics (2014), International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (2017), 13-я Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической газодинамики» (2015), Российская национальная конференция по теплообмену (2014, 2018), Российская конференция «Ультрадисперсные порошки и наноструктуры» (2019), XI Семинар вузов по теплофизике и энергетике (2019), Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (2016, 2017, 2019).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 32 работы, в том числе 14 статей в рецензируемых журналах, из которых 14 рекомендованы ВАК для представления основных результатов диссертации, и все 14 индексируемы Scopus и WoS. Остальные публикации материалы конференций.

Личный вклад автора заключается в создании экспериментального стенда; выполнении тестовых опытов и основной программы экспериментов по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению; проведении обработки и анализа результатов экспериментов; проведении численного моделирования процессов теплообмена; формулировке выводов; написании научных статей. Часть экспериментальных исследований вынужденной конвекции наножидкостей в гладких каналах проводилась совместно с научным руководителем А. В. Минаковым.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 67 наименований. Материал изложен на 161 страницах, содержит 108 рисунков и 6 таблиц.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи диссертации, научная новизна и практическая значимость результатов работы, и основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приводится анализ современного состояния исследований конвективного теплообмена наножидкостей. В данной главе собраны результаты работ по экспериментальному и численному исследованию вынужденной конвекции наножидкостей. Анализ современного состояния работ, посвященных исследованию конвективного теплообмена наножидкостей, показывает, что на сегодняшний день существует множество работ по исследованию конвективного теплообмена наножидкостей. В экспериментах в большинстве случаев используются наночастицы оксидов металлов, а именно оксиды титана, алюминия, меди и другие, так же проводятся исследования с использованием углеродных нанотрубок. В существующих работах предпринимались попытки выяснить влияние концентрации и размера наночастиц на конвективный теплообмен. Но полученные в ходе исследований результаты имеют противоречивый характер. Нет окончательного понимания относительно влияния даже основных параметров (концентрация и размер наночастиц) на теплогидравлическую эффективность применения наножидкостей.

Во многих работах по исследованию конвективного теплообмена нет контроля размера частиц, не исследуются коэффициенты вязкости и теплопроводности используемых суспензий наноразмерных частиц, отсутствуют результаты измерения потерь давления. Это не дает возможность интерпретировать полученные результаты с позиций эффективности применения наножидкостей. Таким образом, проведя анализ существующих исследований в области конвективного теплообмена наножидкостей, очевидно, что задача систематического исследования конвективного теплообмена наножидкостей до сих пор является актуальной.

В главе 2 представлено описание использовавшихся экспериментального оборудования и методики для численного моделирования изучаемых течений. Для проведения экспериментальных исследований конвективного теплообмена наножидкостей была создана экспериментальная установка (см. рис. 1). Установка является замкнутой по теплоносителю. С помощью насоса исследуемая жидкость из сборного резервуара подается в измерительный обогреваемый участок после прохождения, которого поступает в теплообменник, где охлаждается до заданной входной температуры. Нужный расход теплоносителя в контуре устанавливался с помощью регулирующих вентилей и линии байпаса. Для осуществления контроля расхода жидкости в контуре использовался скоростной расходомер.

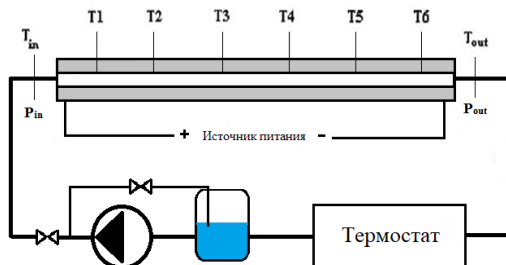


Рис. 1. Схема измерительной установки.

Измерительный участок прямой круглый канал с длиной обогреваемого участка 0,9 м. В экспериментах использовались каналы с внешним диаметром 6, 8 и 10 мм, толщина стенки у всех каналов была равна 1мм. Нагрев измерительного участка производился с помощью подаваемого на внешнюю стенку канала электрического тока. Данный способ нагрева позволяет получить постоянную плотность теплового потока на стенке трубки. И может быть, легко применим к каналам любого поперечного сечения. Мощность нагрева регулируется изменением подаваемого на понижающий трансформатор напряжения. В ходе эксперимента измерялась сила тока, подаваемая с понижающего трансформатора на стенку трубки. Для измерения локальной температуры на внешней стенке измерительного участка на равном расстоянии друг от друга располагались 6 медь-константановых термопар. Измере-

ния температуры осуществлялось с помощью измерителей ОВЕН ТРМ. Измерительный участок был теплоизолирован с помощью многослойной теплоизоляции. Толщина теплоизоляции была выбрана с помощью проведения серии постановочных экспериментов для чистых жидкостей и теоретических расчетов.

Для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из измерительного участка располагались термодпары. Для обеспечения однородности температуры потока теплоносителя после прохождения измерительного участка использовался дополнительный участок теплоизолированного контура. В ходе эксперимента осуществлялось измерение перепада давления, затрачиваемого на прокачивание исследуемого теплоносителя. Для этого использовался дифференциальный манометр ОВЕН ПД200. В ходе эксперимента осуществляется автоматическая запись всех измеряемых величин с помощью ЭВМ.

Возможности этой установки позволяют проводить измерения среднего коэффициента теплоотдачи и перепада давления для различных режимов течения теплоносителя. Максимальное значение числа Рейнольдса в экспериментах было равно 20000 (для воды). Показано, что отклонение экспериментальных значений числа Нуссельта в ламинарном режиме течения от эмпирических корреляций не превышает 2%, а в турбулентном – 5%.

В качестве одного из инструментов исследования вынужденной конвекции наножидкостей, в ламинарном и турбулентном режимах течения, в данной работе было использовано численное моделирование. В работе использовались два подхода к моделированию наножидкости. Гомогенная модель наножидкости, с экспериментально определёнными зависимостями коэффициентов переноса наножидкостей (вязкость, теплопроводность) от объёмной концентрации наночастиц и их размера. Для гомогенной модели наножидкость рассматривается как однородная несжимаемая ньютоновская среда, течение которой описывается уравнениями Навье-Стокса:

$$\nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}, \quad (1)$$

где ρ – плотность наножидкости, p – давление, \mathbf{v} – вектор скорости, а \mathbf{T} – тензор вязких напряжений.

Уравнение сохранения энергии рассматривается в следующем виде

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho v h) = \nabla(\lambda \nabla T), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности наножидкости, а $h(T) = \int_{T_0}^T C_p dT$ – эн-

тальпия среды. Здесь – $C_p = \frac{(1-\varphi)\rho_f C_{p,f} + \varphi\rho_p C_{p,f}}{\rho}$ – удельная теплоём-

кость, где φ – объёмная доля наночастиц, ρ_f – плотность базовой жидкости, ρ_p – плотность материала наночастиц, $C_{p,f}$ – теплоёмкость базовой жидкости, $C_{p,p}$ – теплоёмкость материала частиц. Плотность наножиждкости в свою очередь вычислялась так: $\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot (T - T_0)}$, где $\rho_0 = (1 - \varphi) \cdot \rho_f + \varphi \cdot \rho_p$ – плотность наножиждкости при комнатной температуре T_0 , а β – коэффициент термического расширения наножиждкости, определяемый соотношением:

$$\beta = \frac{(1 - \varphi) \rho_f \beta_f + \varphi \rho_p \beta_p}{\rho_0},$$

где β_f и β_p – коэффициенты термического расширения базовой жидкости и частиц.

Математическая модель турбулентного теплообмена построена на основе RANS подхода. Суть этого подхода заключается в решении осреднённых уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \left(\boldsymbol{\tau} - \rho \overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'} \right) + \mathbf{F}, \quad (3)$$

где \mathbf{v} – усреднённое по времени поле скоростей; $-\rho \overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'}$ – тензор рейнольдсовых напряжений.

При построении двухпараметрических моделей турбулентности для определения компонент тензора рейнольдсовых напряжений использовалась гипотеза Буссинеска:

$$-\rho \overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (4)$$

где μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, а k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций.

Использование концепции Буссинеска позволяет построить ряд двухпараметрических полуэмпирических моделей. В данной работе для моделирования турбулентного течения в качестве основной модели использовалась двухзонная двухпараметрическая модель Ментера SST.

Уравнение сохранения энергии рассматривается в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla(\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla(\lambda_{\text{eff}} \nabla T),$$

где λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t$ (λ_t – турбулентный коэффициент теплопроводности, определяемый в соответствии с используемой моделью турбулентности).

Для описания течения и теплообмена, магнитных наножидкостей в магнитном поле, разработана модель транспорта магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле на основе эйлера подхода. Описание течения магнитной наножидкости под действием неоднородного поля в данной диссертации было выполнено на основе односкоростного приближения для смеси. Данный подход предполагает, что разность скоростей наночастиц и потока мала, это позволяет редуцировать уравнения переноса дисперсной фазы до уравнения конвективно-диффузионного типа. Такое приближение справедливо для малоинерционных наночастиц.

В рамках данного подхода скорость наночастиц можно выразить через дрейфовую скорость \mathbf{v}_s и скорость смеси \mathbf{v}_m : $\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_m + (1-C)\mathbf{v}_s$, где C - массовая концентрация наночастиц.

Уравнение неразрывности смеси имеет вид: $\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0$.

Уравнение сохранения импульса несущей среды:

$$\frac{\partial \rho_m \mathbf{v}_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p_m - \nabla \cdot (\rho_m C(1-C)\mathbf{v}_s \mathbf{v}_s) + \nabla T_m + \frac{\phi \mathbf{F}_M}{V_p} + \rho_m \mathbf{g},$$

$\mathbf{T}_m = \mu_m \cdot (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)$, где \mathbf{F}_M - магнитная сила, V_p - объем частицы.

Уравнение переноса массовой доли наночастиц имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_m C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m C) = -\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_s C(1-C)).$$

Дрейфовая скорость второй фазы находится из уравнения:

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{v}_p - \mathbf{v}_m = \frac{\tau_p}{C_D} \left(\frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \right) \left(\mathbf{g} - \left(\frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial t} + \mathbf{v}_m \cdot \nabla \mathbf{v}_m \right) \right) + \frac{\tau_p \mathbf{F}_M}{C_D},$$

здесь τ_p время релаксации частиц, которое определяется следующим образом:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f}.$$

Коэффициент сопротивления рассчитывается по модели Schiller - Naumann:

$$C_D = \begin{cases} 1.0 + 0.15 \text{Re}_s^{0.687} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \cdot \text{Re}_s & \text{Re} > 1000 \end{cases},$$

При этом число Рейнольдса определяется по относительной скорости:

$$\text{Re}_s = \frac{\rho_f d_p |\mathbf{v}_s|}{\mu_f}.$$

Для описания коэффициента вязкости концентрированной суспензии в отложениях наночастиц использовалась аппроксимация из работы:

$$\mu_m = \mu_f \exp \left\{ \frac{2.5}{\beta} \left[\frac{1}{(1-\varphi)^\beta} - 1 \right] \right\}, \text{ где } \beta=2 - \text{ подгоночный параметр.}$$

Согласно данной формулы вязкость смеси при приближении концентрации частиц к концентрации соответствующей плотной упаковки 0,63 возрастает примерно в 1000 раз.

Уравнение сохранения энергии для смеси имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_p C_{pf} \varphi T + \rho_f C_{pf} (1-\varphi) T) + \nabla \cdot (\rho_p C_{pf} \varphi \cdot T \cdot \mathbf{v}_p) + \nabla \cdot (\rho_f C_{pf} (1-\varphi) \cdot T \cdot \mathbf{v}_f) = -\nabla \cdot (\lambda_m \nabla T),$$

где T - температура смеси, \mathbf{v}_f , \mathbf{v}_p - скорости несущей среды и частиц выражаются через дрейфовую скорость \mathbf{v}_s и скорость смеси \mathbf{v}_m .

Для описания коэффициента теплопроводности смеси в данном случае использовалась корреляция: $\lambda_m = \lambda_f (1 + (0.0193 + 0.00383\tilde{\rho})\sqrt{\varphi\tilde{D}})\lambda_f$, где $\tilde{\rho} = \rho_p / \rho_f$, $\tilde{D} = d_p / \sigma$, σ - эффективный размер молекул несущей жидкости.

Магнитная сила, действующая на отдельную частицу, определяется: $\vec{F}_M = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 V_p (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$, где H - напряженность магнитного поля, M - намагниченность частицы, которая определяется как:

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} \frac{3\chi}{3+\chi} \vec{H} & \text{если } \frac{3\chi}{3+\chi} H < M_s \\ \frac{M_s}{H} \vec{H} & \text{если } \frac{3\chi}{3+\chi} H > M_s \end{pmatrix},$$

здесь χ - магнитная восприимчивость материала частиц, M_s - намагниченность насыщения материала частиц.

Для замыкания модели к системе уравнений движения необходимо добавить уравнения магнитостатики. Определение компонент магнитного поля вокруг магнита наиболее удобно находить при помощи вектор-потенциал магнитного поля: $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$.

Уравнение на вектор-потенциал магнитного поля в случае отсутствия вихревых токов имеет вид: $\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{A} - \vec{B}_R) \right) = 0$, где \vec{B}_R - остаточная магнитная индукция, которая всюду равна нулю кроме области занятой магнитом. Напряженность магнитного поля определяется как: $\vec{H} = \vec{B} / \mu_0$.

Граничные условия.

Для моделирования течения и теплообмена, немагнитных наножидкостей, использовалось осесимметричная постановка. Схема расчетной области представлена на рис. 2. Расчетная область состояла из проточной части и твердой стенки канала. На входе в расчетную область задавались условия Дирихле и условие постоянной температуры потока. На выходной границе расчетной области для всех рассматриваемых величин задавались условия Неймана. На внешней стенке обогреваемой части трубки в расчетах задавалось значение плотности теплового потока, соответствующее экспериментальным данным.

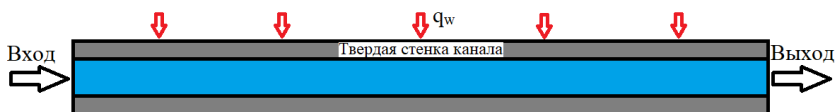


Рис. 2. Схема расчетной области.

Моделирование течения и теплообмена, магнитных наножидкостей проведено с использованием трехмерной геометрии прямого круглого канала, с твердой стенкой. Для задач транспорта магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле на входной границе, помимо условий Дирихле и значения температуры потока, задавалось значение концентрации частиц на входе. Для объемной доли жидкой и твердой фаз на стенке задаются условия отсутствия диффузионных потоков. Для решения задач магнитостатики на внешней стенке расчетной области задавались условия равенства нулю производных по нормали от компонент вектор-потенциала магнитного поля.

Тестирование использованных алгоритмов выполнялось как сопоставлением полученных расчетных данных с известными аналитическими решениями и существующими экспериментальными данными. В качестве примера на рис. 3 представлено сопоставление расчетных профилей скорости в центральном сечении с аналитическим решением для ламинарного и турбулентного режимов течения воды в круглом канале. На рис. 4 расчетная зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса была сопоставлена с экспериментальными данными и корреляцией Михеева. Также было проведено исследование влияния детализации расчетной сетки на точность расчетов. Были рассмотрены расчетные сетки с количеством расчетных узлов 100, 200 и 800 тысяч. Расчетные зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса полученные на сетках с разной детализацией показаны на рис. 4. Как видно из графика, представленного на рис. 4, с увеличением количества узлов решение приближается к значениям корреляции и экспериментальным данным. Расчетная зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса, рассчитанная на расчетной сетке с количеством узлов 800000 и сгущением к стенкам канала, хорошо коррелирует с экспериментальными данными и эмпирической зависимостью, разброс полученных данных находится в пределах 5 %.

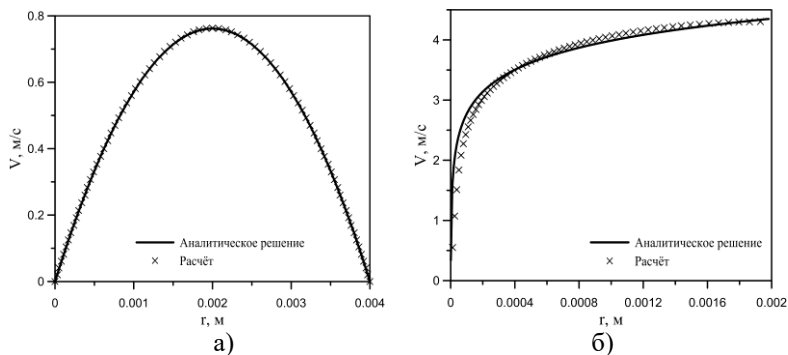


Рис. 3. Профили скорости в ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах течения.

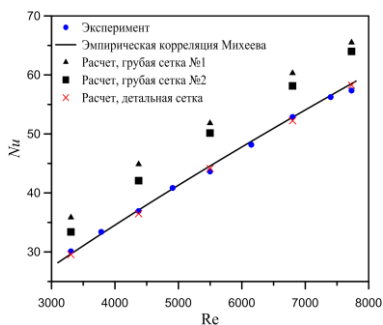


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса.

В главе 3 изложены результаты систематического экспериментального исследования конвективного теплообмена наножидкостей в прямом круглом канале с постоянной плотностью теплового потока на стенке. Исследованы зависимости локального и среднего коэффициентов теплоотдачи наножидкостей от различных факторов: концентрации, размера и материала частиц для ламинарного и турбулентного режима течения.

В экспериментах объемная концентрация наночастиц варьировалась от 0,25 до 6%. Все наножидкости, используемые в экспериментах, готовились двухшаговым методом без использования ПАВ. Для разрушения конгломератов частиц и получения однородной концентрации наножидкости обрабатывались ультразвуковым диспергатором. В экспериментах использовались наночастицы оксидов кремния, алюминия, циркония и титана (компания ОАО "Плазмотерм", Москва) и наночастицы алмаза (ФНПЦ "Алтай", Бийск).

Для систематического исследования вынужденной конвекции наножидкостей требуется знание точных значений теплофизических свойств используемых жидкостей и в первую очередь вязкости и теплопроводности.

Поэтому для всех использованных в экспериментах наножидкостей были экспериментально определены коэффициенты вязкости и теплопроводности. Размер частиц в жидкости контролировался с помощью электроакустического спектрометра DT1202, который позволяет определять размер частиц непосредственно в жидкости.

Вязкость и реология наножидкостей измерялась посредством ротационных вискозиметров Брукфилда, точность измерений составляла 1-2%. Для измерения теплопроводности был разработан специальный стенд на основе нестационарного метода нагреваемой нити. Точность измерения коэффициента теплопроводности была не хуже 2-3%.

В ходе экспериментов изучалась зависимость коэффициента теплоотдачи от концентрации, размера и материала наночастиц, а также от свойств базовой жидкости при ламинарной вынужденной конвекции наножидкости в круглом канале.

Установлено, что коэффициент теплоотдачи наножидкости в ламинарном режиме течения возрастает при увеличении концентрации частиц. В качестве примера на рис. 5 представлены данные зависимости среднего коэффициента наножидкости с частицами оксида алюминия на основе воды при разных объемных концентрациях частиц. Во всех случаях коэффициент теплоотдачи наножидкости существенно превышает соответствующее значение для воды. Так при фиксированном значении числа Рейнольдса значение коэффициента теплоотдачи для 6% наножидкости на 40% выше аналогичного значения для воды. С уменьшением концентрации наночастиц величина коэффициента теплоотдачи снижается, однако и при наименьшей концентрации частиц остается заметной. Стоит также отметить, что эффект растет с увеличением числа Рейнольдса.

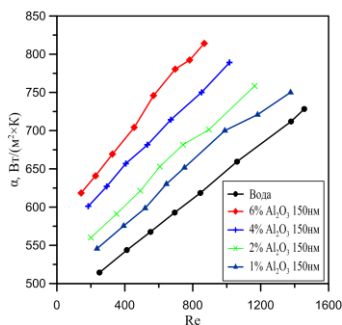


Рис. 5. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса.

Исследовано влияние размера частиц на конвективный теплообмен. В ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи всегда возрастает при увеличении среднего размера наночастиц. Наножидкость со средним размером частиц ZrO₂ 44 нм, интенсифицирует теплообмен на 13 %, а для

среднего размера частиц ZrO_2 105 нм интенсификация составляет 20 % относительной базовой жидкости (см. рис. ба). Коэффициент теплоотдачи ламинарной вынужденной конвекции пропорционален коэффициенту теплопроводности, который возрастает с ростом размера частиц.

В отличие от ламинарного режима течения в турбулентном режиме зависимость среднего коэффициента теплоотдачи наножидкости от размера частиц имеет максимум. Так как в турбулентном режиме течения коэффициент теплоотдачи пропорционален комплексу вязкости и теплопроводности. С увеличением размеров размеров частиц коэффициент теплопроводности наножидкости повышается, а коэффициент вязкости напротив уменьшается. Для наножидкости с частицами SiO_2 максимум коэффициент теплоотдачи наблюдается для среднего размера частиц 25 нм (см. рис. бб). С другой стороны, величина перепада давления снижается с увеличением размера частиц.

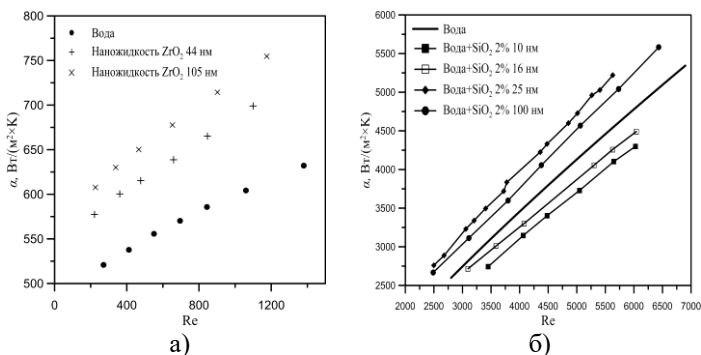


Рис. 6. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от размера частиц в ламинарном (а) и турбулентном (б) режиме течения.

Для оценки эффективности применения наножидкости важным критерием является потребляемая мощность, необходимая для перекачки жидкости. Расход энергии на перекачку жидкости пропорционален падению давления в канале. Если при фиксированном падении давления наножидкость увеличивает коэффициент теплопередачи по сравнению с базовой жидкостью, то такая наножидкость обычно считается эффективной. Показано, что так определенная эффективность использования наножидкостей для интенсификации конвективного теплообмена зависит от концентрации, размера, материала наночастиц и свойств базовой жидкости. Эта эффективность хорошо иллюстрируется зависимостью коэффициента теплоотдачи от перепада давления, затрачиваемого на прокачивание (рис. 7). В ламинарном режиме течения эффективность возрастает с увеличением концентрации и размера частиц (рис. 7а). В турбулентном режиме течения ситуация много сложнее. Положительный для интенсификации эффект зависит от соотношения между вязкостью и теплопроводностью наножидкости, а значит от материала частиц и их разме-

ра. На рис. 7б приведена зависимость коэффициента теплоотдачи от перепада давления в канале для воды и наножидкостей на основе оксидов алюминия и кремния. Как видно, наножидкость на основе оксида алюминия примерно на 15% эффективнее в качестве теплоносителя по сравнению с чистой водой, тогда как наножидкость с оксидом кремния при больших перепадах давления менее эффективна.

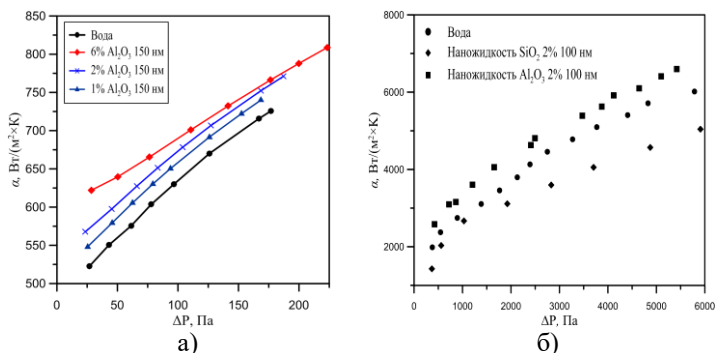


Рис. 7. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от перепада давления в ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах течения.

С другой стороны, следует иметь в виду, что на практике нередко реализуются ситуации, когда именно коэффициент теплоотдачи является основным фактором эффективности соответствующего устройства. Здесь преимущества наножидкостей бесспорны.

Установлено, что входная температура оказывает существенное влияние на турбулентный конвективный теплообмен наножидкостей. С практической точки зрения выгодно иметь входную температуру наножидкости в диапазоне от 20-35 °С. В этом диапазоне вследствие уменьшения вязкости увеличивается теплоотдача и уменьшается перепад давления, затрачиваемый на прокачивание наножидкости в рабочем участке.

Показано, что значение интенсификации теплообмена зависит от базовой жидкости на основе, которой приготовлена наножидкость. Приращение коэффициента теплоотдачи будет выше для жидкостей с меньшим коэффициентом теплопроводности. Например, при одинаковой объемной концентрации частиц (1%) наноалмазов в дистиллированной воде повышение значения коэффициента теплоотдачи составит 7%, а в этиленгликоли коэффициент теплоотдачи возрастает на 15%.

Вторая часть этой главы посвящена численному моделированию вынужденной конвекции наножидкостей. Здесь исследована вынужденная конвекция наножидкости с частицами Al₂O₃ в ламинарном режиме течения и частицами SiO₂ в турбулентном для круглого канала с постоянной плотностью теплового потока на стенках. На рис. 8а представлено сопоставление расчет-

ных (пунктирные линии) и экспериментальных (метки) данных, для воды и наножидкостей на основе воды с наночастицами оксида алюминия размером 150 нм, концентрация частиц изменялась снизу-вверх от 1 до 6%. Гомогенная модель наножидкости, с экспериментально определёнными коэффициентами переноса наножидкости (вязкость и теплопроводность), позволяет с неплохой точностью описывать гидродинамику и теплообмен наножидкостей, при низких концентрациях.

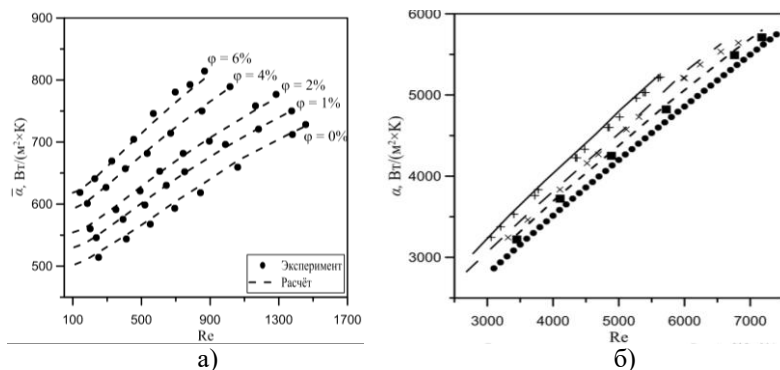


Рис. 8. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса в ламинарном (а) и турбулентном (б) режимах течения.

Для турбулентного течения расчетные данные зависимости коэффициента теплоотдачи для наножидкости на основе воды с частицами SiO_2 размером 25 нм представлены на рис. 8б. Здесь метки снова соответствуют экспериментальным данным, а непрерывные линии – их численному моделированию. Верхняя линия и метки соответствуют концентрации 2%, средние – 1% и нижние – 0.5%.

Таким образом, численное моделирование в рамках гомогенной модели с экспериментально определёнными коэффициентами переноса наножидкости (вязкость и теплопроводность) в данном случае достаточно хорошо воспроизводит данные эксперимента. Кроме того, оно позволяет получить и данные, которые экспериментально получить не удастся, например, профили скорости и температуры в канале.

В главе 4 изложены результаты проведённого экспериментального исследования вынужденной конвективного теплообмена наножидкостей на основе воды и наноразмерных частиц оксида циркония в круглом канале и в круглых каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена на стенках. Целью являлось сопоставление эффективности использования наножидкости с одним из лучших способов интенсификации теплообмена на сегодняшний день, а именно поверхностными интенсификаторами. В экспериментах использовались каналы со сферическими выступами и с кольцевой накаткой на стенках. Канал с кольцевыми выступами имеет следующие ха-

рактические характеристики: внутренний диаметр трубки $D = 8$ мм, высота выступов 1 мм, диаметр по вершинам выступов $d = 6$ мм, относительная высота выступов $d/D = 0,75$, шаг выступов $s = 10$ мм, относительный шаг выступов $s/D = 1,25$. Канал со сферическими выступами имел следующие характеристики: внутренний диаметр труб матрицы $D = 8$ мм, высота выступов $h = 1$ мм, диаметр по вершинам выступов $d = 6$ мм, относительная высота выступов $d/D = 0,75$, продольный шаг выступов $t = 9$ мм, поперечный шаг выступов $s = 4$ мм. Круглый канал имел внутренний диаметр 10 мм, толщина стенок равнялась 1 мм.

Экспериментальное исследование вынужденной конвекции проведено для наножидкостей с частицами ZrO_2 со средним размером 44 и 105 нм. Базовой жидкостью в экспериментах была дистиллированная вода. Объемная концентрация частиц в экспериментах равнялась 4%. Для используемых наносuspензий, экспериментально определены коэффициенты вязкости и теплопроводности.

В ходе проведенного экспериментального исследования получены зависимости среднего коэффициента теплоотдачи и перепада давления от числа Рейнольдса в гладком канале и каналах с поверхностными интенсификаторами. Эксперименты показали, что наножидкость с частицами ZrO_2 размером 44 нм в круглом канале интенсифицирует теплообмен на 35% по сравнению с теплообменом на чистой воде при фиксированном числе Рейнольдса. С увеличением размера частиц, при фиксированном числе Рейнольдса, величина интенсификации снижается для наножидкости с размером наночастиц 105 нм и составляет 20%. Полученные данные суммированы в таблице 1. Получается, что интенсификация и потери давления зависят от формы канала. Здесь экспериментальные значения среднего коэффициента теплоотдачи и перепада давления нормированы на соответствующие значения для воды.

Таблица 1. Результаты экспериментов.

Тип канала	ZrO_2 44 нм		ZrO_2 105 нм	
	$\frac{\alpha}{\alpha_0}$	$\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$	$\frac{\alpha}{\alpha_0}$	$\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$
Круглый канал	1,4	1,8	1,27	1,25
Кольцевая накатка	1,35	1,85	1,23	1,3
Сферические выступы	1,35	1,95	1,2	1,35

Показано, что при использовании наножидкости в каналах с интенсификаторами теплообмена коэффициент теплоотдачи несколько снижается, а перепад давления наоборот – повышается, относительно гладкого канала. Эта тенденция сохраняется в обоих случаях.

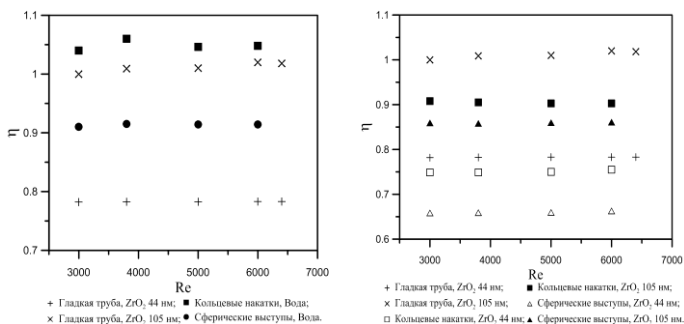


Рис. 9. Зависимость теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса.

Для каждого используемого в экспериментальном исследовании канала был проведен анализ теплогидравлической эффективности. Данная величина вычислялась по формуле: $\eta = \left(\frac{\alpha}{\alpha_g} \right) / \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_g} \right)$. Зависимости теплогидравлической эффективности от числа Рейнольдса, для различных каналов и наножидкостей представлены на рис. 9. Показано, что наножидкости в круглом канале позволяют получить теплогидравлическую эффективность сопоставимую с теплогидравлической эффективностью каналов с искусственными интенсификаторами теплообмена на стенках для чистой воды. Так наножидкость с частицами оксида кремния размером 105 нм показала теплогидравлическую эффективность сопоставимую с теплогидравлической эффективностью для каналов с кольцевой накаткой на стенках для чистой воды. Экспериментальное исследование показало, что для эффективного использования наножидкости в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена необходимо выбирать наножидкости с высоким коэффициентом теплопроводности и низким коэффициентом вязкости. Так как повышение гидравлического сопротивления использования интенсификаторов теплообмена и увеличения вязкости может привести к снижению теплогидравлической эффективности.

Глава 5 посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям течения и теплообмена наножидкостей в магнитном поле. Перспективным способом управления свойствами наножидкостей может являться приложение к ним электромагнитных полей. После того, как стало понятно, что максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи за счет использования наножидкостей, как правило, не превышает нескольких десятков процентов, начались поиски способов дальнейшего повышения эффективности применения наножидкостей. Здесь крайне интересными и полезными во многих приложениях могут быть наножидкости на основе ферромагнитных материалов, (например, частицы железа, его оксиды Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , никеля т.д).

Эксперименты выполнялись для наножидкостей с частицами оксида железа (IV) (компания «Передовые порошковые технологии», Томск). Средний размер частиц равнялся 100 нм. Их объемная концентрация варьировалась от 0,01 до 0,25%. Наножидкости приготавливались с помощью стандартного двухшагового метода. В исследуемые наножидкости ПАВ не добавлялись. Для разрушения конгломератов частиц применялась обработка ультразвуковым диспергатором.

С помощью PIV (Particle Image Velocimetry) методики впервые для данного класса течений были измерены профили скорости в продольном сечении канала. Поток засеивался твердыми флуоресцентными частицами размером 20 мкм. Для освещения потока использовался импульсный двухканальный Nd:YAG лазера с энергией каждого импульса 200 мДж. Засеянный поток освещался второй гармоникой. Для развертки лазерного луча в нож использовалась оптическая система из цилиндрической и сферической линзы. Толщина сфокусированного ножа в плоскости измерений составляла менее 1 мм. Для заведения лазерного ножа в измерительную плоскость использовалось зеркало, просветленное на длине волны 532 нм, с коэффициентом отражения 90 %. Синхронизация лазерной и оптической систем выполнялась программируемым синхронизирующим процессором. Временная задержка между парой импульсов лазера устанавливалась в интервале 300 – 3000 мкс, в зависимости от режима потока. Временная задержка выбиралась так, чтобы обеспечить смещение трассеров на 8-10 пикселей. Регистрация трассерных изображений осуществлялась цифровой камерой (ImperX IGV-B2020). Использовался объектив NICON 50 мм (F2,8) с установленным узкополосным оптическим фильтром с пропускающей способностью в 60 % на длине волны флуоресценции трассерных частиц (560 нм). Полная ширина пропускания на полувысоте составляет 20 нм. Из полученных изображений частиц вычитался фоновый сигнал, и обрабатывались итерационным кросскорреляционным алгоритмом с непрерывным смещением расчетных областей и их деформацией. Минимальный размер расчетной ячейки составлял 32x32 пикселя (примерно 1x1 мм).

В отличие от известных работ в экспериментах основное внимание было уделено изучению локальных характеристики течения и теплообмена. Впервые с помощью PIV метода проведено измерение полей скорости в течениях наножидкостей в канале под действием магнитного поля. Исследовано совместное влияние наночастиц и магнитного поля на локальную структуру течения и теплообмена наножидкости в канале. Измерены средние и локальные значения коэффициентов теплоотдачи на стенках канала. Показано, что при помощи магнитного поля можно значительно интенсифицировать теплообмен магнитных наножидкостей (в 1,4-1,8 раз). При этом максимальная интенсификация наблюдается в ламинарном режиме течения. С увеличением числа Рейнольдса влияние магнитного поля ослабевает. С помощью тепловизионной съёмки обнаружена существенная локальная неоднородность темпе-

ратурного поля на стенке нагревателя при вынужденной конвекции наножидкости под действием постоянного магнитного поля.

Разработана математическая модель теплообмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле. Для описания течения и теплообмена наножидкостей при этом использовалась разработанная численная методика на основе эйлерова двухкомпонентного подхода с односкоростным приближением (инерционно-диффузионная модель). Впервые проведено тестирование данного подхода на данных PIV измерений. Сравнение экспериментально измеренного и расчётного профилей скорости при течения наножидкости с магнитными частицами в круглом канале без влияния магнитного поля представлено на рис. 10(а). На рис. 10 (б) представлен график сравнения экспериментальных данных по перепаду давления для воды и наножидкости с концентрацией частиц 0,25% с результатами численного моделирования, для различных значений числа Рейнольдса.

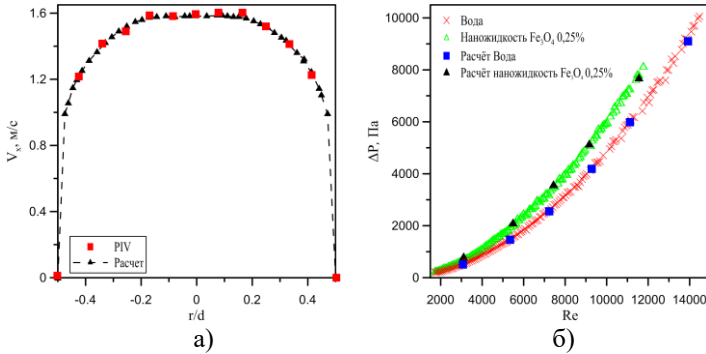
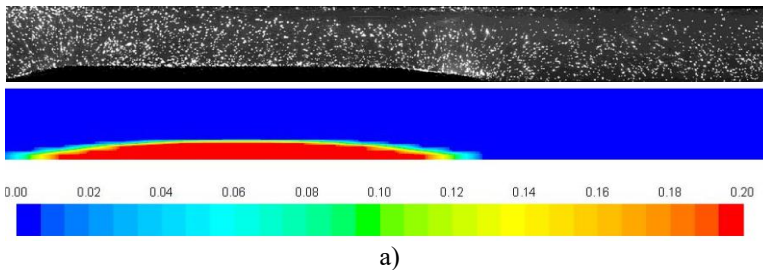


Рис. 10. Сопоставление экспериментального (красные метки) и расчетного профиля скорости, $Re=8400$ (а); сопоставление расчетного и экспериментально измеренного перепада давления в канале без магнитного поля (б).

Фотография частиц-трассеров и измеренное поле скорости в центральном продольном сечении трубки в эксперименте, концентрация наночастиц и модуль скорости потока в расчете для $Re = 1400$ показаны рис. 11.



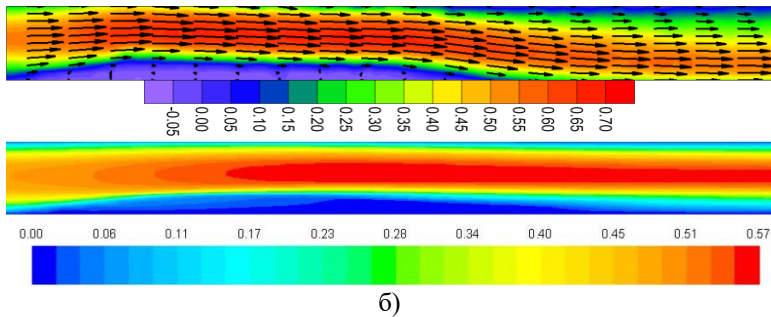


Рис. 11. Фотография частиц-трассеров и концентрация наночастиц в расчете в центральном продольном сечении трубки в эксперименте (а) и измеренное поле скорости и модуль скорости потока в расчете (б) для $Re = 1400$.

В результате серии расчетных и экспериментальных исследований впервые удалось объяснить причины аномально высокого значения коэффициента теплоотдачи наножидкостей в магнитном поле. С помощью PIV метода, тепловизионных измерений и численного моделирования было установлено, что основным механизмом аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции магнитной наножидкости в постоянном магнитном поле являются формирующиеся в канале отложения из наночастиц. Было показано, что отложения из наночастиц играют роль дискретных вихрегенераторов, которые широко используются для интенсификации конвективного теплообмена. Формирование и управление этими отложениями с помощью изменения магнитного поля может стать весьма перспективным способом интенсификации и управления процессами теплообмена в различных приложениях. Установленные в диссертации зависимости и закономерности можно использовать в качестве практических рекомендаций по интенсификации этих процессов.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработана экспериментальная установка по исследованию теплогидравлических характеристик при вынужденной конвекции наножидкостей в прямых круглых каналах. Проведенное систематическое тестирование экспериментальной установки и методики измерений показало хорошее согласование полученных данных с известными аналитическими решениями, эмпирическими корреляциями и результатами численных решений для ламинарного и турбулентного теплообмена.

2. Проведено экспериментальное исследование теплогидравлической эффективности наножидкостей при вынужденной конвекции в гладких круглых каналах в ламинарном и турбулентном режимах течения. Установлены основные факторы, от которых зависит теплогидравлическая эффективность наножидкостей в различных режимах течения. Показано, что, варьируя материал, концентрацию и размер наночастиц, входную температуру теплоноси-

теля и вид базовой жидкости, можно добиться эффективной интенсификации теплообмена при вынужденной конвекции наножидкостей в гладких круглых каналах в ламинарном и турбулентном режимах течения.

3. Проведено экспериментальное исследование коэффициента теплоотдачи и гидравлических потерь при вынужденной конвекции наножидкостей в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена. Установлено, что использование наножидкостей позволяет дополнительно на 20–40 % интенсифицировать теплообмен в таких каналах. Впервые показано, что наножидкости в гладких каналах имеют теплогидравлическую эффективность, сопоставимую с теплогидравлической эффективностью воды в каналах с поверхностными интенсификаторами теплообмена.

4. Проведено расчетно-экспериментальное исследование течений и теплообмена магнитных наножидкостей под воздействием неоднородного магнитного поля. Исследованы локальные и интегральные характеристики течения. Показано, что при помощи магнитного поля можно дополнительно интенсифицировать теплообмен магнитных наножидкостей на 40–80 %. С помощью PIV-метода, тепловизионных измерений и численного моделирования было установлено, что основной причиной аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции магнитной наножидкости в магнитном поле являются формирующиеся в канале локальные отложения из наночастиц, которые приводят к значительному вихреобразованию и изменению локальной структуры потока.

5. Для описания течения и теплообмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле разработана модель на основе эйлерова двухкомпонентного подхода с односкоростным приближением (инерционно-диффузионная модель). Впервые проведено тестирование данного подхода на данных PIV-измерений. Показано удовлетворительное качественное и количественное согласие расчета и эксперимента.

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Д.В. Гузей, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк Численное моделирование ламинарной вынужденной конвекции наножидкостей с учетом термофореза // Инженерно-физический журнал, 2022, Т.95, №3.
2. D.V. Guzei, A.V. Minakov, V.Y. Rudyak On efficiency of convective heat transfer of nanofluids in laminar flow regime // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, Vol.139, pp.180-192.
3. А.В. Минаков, Д.В. Гузей, В.А. Жигарев, М.И. Пряжников, А.А. Шебелева Экспериментальное исследование транспорта магнитных наночастиц в круглом миниканале в постоянном магнитном поле // Инженерно-физический журнал, 2019, Т.92 (5), С. 2277-2285.
4. A.V. Minakov, D.V. Guzei, K.N. Meshkov, I.A. Popov, A.V. Shchelchikov 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, pp. 915-925.

5. M.I. Pryazhnikov, A.V. Minakov, V.Y. Rudyak, D.V. Guzei Thermal conductivity measurements of nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, Vol. 104, pp. 1275-1282.

6. A.V. Minakov, A.S. Lobasov, D.V. Guzei, M.I. Pryazhnikov, V.Ya Rudyak The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // Applied Thermal Engineering, 2015, №88, pp.140-148

7. A.V. Minakov, D.V. Guzei, M.I. Pryazhnikov, V.A. Zhigarev, V.Ya. Rudyak. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // International Journal of Heat and Mass Transfer 102. 2016. p.745–755

8. A.V. Minakov, A.S. Lobasov, M. I. Pryazhnikov, D.V. Guzei Experiment-Calculated Investigation of the Forced Convection of Nanofluids Using Single Fluid Approach // Defect and Diffusion Forum Vol. 348. 2014. pp 123-138.

9. Д.В. Гузей, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк. Исследование теплоотдачи наножидкостей в турбулентном режиме течения в цилиндрическом канале // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 65-75.

10. Д.В. Гузей, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк, А.А. Дектерев Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе оксида меди в цилиндрическом канале // Журнал Письма в журнал Технической физики том 40, выпуск 5., 2014, С.34-42.

11. А.В. Минаков, В.Я. Рудяк, Д.В. Гузей, А.С. Лобасов Измерение коэффициента теплоотдачи жидкости на основе воды и наночастиц оксида меди в цилиндрическом канале. // Теплофизика высоких температур, 2015, Т.53 № 2, С. 256-263

12. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Гузей Д.В., Жигарев В.А., Пряжников М.И. О ламинарно-турбулентном переходе в течениях наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика, 2016

13. А.В. Минаков, Д.В. Гузей, В.А. Жигарев Турбулентная вынужденная конвекция наножидкостей в круглом канале // Учёные записки Казанского государственного университета, 2015, Т.157, № 3, С.85-96.

14. А.В. Минаков, Д.В. Гузей, А.С. Лобасов, Д.А. Дектерева, М.И. Пряжников Расчетно-экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкости на основе оксида алюминия в прямоточном теплообменнике // Научный журнал СФУ Техника и технологии Красноярск, 2014, Т.7. С.32-47.

Подписано в печать ДД.ММ.2022. Печать плоская
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. №№
Тираж №№ экз. Заказ №

Отпечатано в Библиотечно-издательском комплексе

Сибирского федерального университета

660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а

Тел. (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>

E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru