

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

К. Маркса ул., д. 10, Казань, 420111
Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32
E-mail: kai@kai.ru, <http://www.kai.ru>
ОКПО 02069616, ОГРН 1021602835275
ИНН/КПП 1654003114/165501001
01.06.2012 № 20-0106-66
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
инновационной деятельности
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Казанский национальный

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Гузей Дмитрия Викторовича
«Исследование вынужденной конвекции наножидкостей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы исследования

На протяжении XX и начала XXI веков специалисты и ученые стремятся к тому, чтобы производимые ими устройства имели все более увеличивающуюся мощность при наименьших размерах. Именно поэтому постоянно велись и ведутся работы по поиску новых типов интенсификации теплообмена, в том числе за счет поиска новых теплоносителей с принципиально улучшенными свойствами. К таким теплоносителям относятся и нанодисперсные жидкости (наножидкости) – чаще всего водные (либо на основе различных органических жидкостей) дисперсии наночастиц (частиц, хотя бы одно из измерений которых менее 100 нм).

Большое внимание исследователей по всему миру они привлекли благодаря особым свойствам – по сравнению с чистыми жидкостями наножидкости обладают: повышенной теплопроводностью; более интенсивном теплообменом при конвекции и кипении; существенно увеличенным критическим тепловым потоком при кипении.

Вообще, дисперсии исследователями изучаются достаточно давно, однако до недавнего времени минимально достигнутым порядком размера частиц был микрометр. В отличие от коллоидов подобного рода, наножидкости более стабильны, что ярко проявляется при их долговременном наблюдении, не подвержены седиментации; их использование сопровождается меньшим эрозивным износом поверхностей, меньшими потерями давления, меньшей вероятностью засорения каналов.

Разрозненные экспериментальные данные и попытки их обобщения и анализа показывают, что методы классической термодинамики гидродинамики, принятые для коллоидов с микрочастицами соотношения и корреляции не могут правильно описать свойства и поведение наножидкости. Прежде всего, причиной этому называют яркое проявление размерных, волновых и когерентных эффектов. Для наножидкости не удастся корректно применить термодинамические

характеристики типа равновесия, а также уравнения переноса массы, энергии и импульса в их классическом представлении.

Все вышеперечисленное делает актуальной тему диссертационного исследования Гузей Д.В.

Новизна результатов исследований

Научная новизна исследований Гузей Д.В. состоит в том, что 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. Также впервые экспериментально показано, что наножидкости позволяют получить теплогидравлическую эффективность, сопоставимую с теплогидравлической эффективностью каналов с искусственными интенсификаторами теплообмена. Разработана математическая модель для описания течения тепло-обмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле на основе эйлера двухкомпонентного подхода с односкоростным приближением. С помощью PIV-метода, тепловизионных измерений и численного моделирования установлено, что основным механизмом аномально высокого повышения коэффициента теплоотдачи магнитной наножидкости в постоянном магнитном поле является изменение локальной структуры потока и вихреобразование за счет формирующихся под действием магнитного поля отложений наночастиц.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

Практическая значимость состоит в том, что впервые установлены основные факторы, от которых зависит теплогидравлическая эффективность использования наножидкостей при различных режимах течения в теплообменном оборудовании. 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 %. Показано, что использование наножидкости в гладких каналах позволяет достичь теплогидравлической эффективности теплообменного оборудования, сопоставимой с теплогидравлической эффективностью оборудования при использовании чистой 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 увеличить уровень интенсификации теплообмена магнитных наножидкостей до 40–80%. Результаты работы вошли в ряд научно-технических отчетов по грантам РФФИ. Результаты работы могут использоваться при разработке компактных систем охлаждения высоконагруженных элементов электроники и энергетики, а также при разработке современных высокоэффективных теплотехнических систем и теплообменного оборудования.

Достоверность основных положений, результатов, выводов

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 решениями и экспериментами.

Общие сведения о диссертационной работе

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

Во введении проведено обоснование актуальности проводимых исследований. Приведена и обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведена структура работы и ее краткая характеристика.

В первой главе приводится анализ современного состояния исследований конвективного теплообмена наножидкостей. Показано, что на сегодняшний день существует значительное количество работ по исследованию конвективного теплообмена при течении 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. Анализ работ показывает, что основное направление исследований – это выяснение влияния концентрации и размера наночастиц в наножидкостях 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 теплообменных аппаратов с применением 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 и выяснить механизмы воздействия на теплоотдачу и эффективность теплообменного оборудования при применении 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.

По результатам анализа сформулирована основная цель и конкретные задачи исследования.

Во второй главе представлено описание использованных экспериментального оборудования и методики для численного моделирования изучаемых течений.

Для проведения экспериментальных исследований конвективного теплообмена наножидкостей была создана экспериментальная установка, представляющая замкнутый по теплоносителю водный контур с последовательно установленными рабочим участком, насосом, гасителем гидроударов и нагревателем/охладителем рабочей жидкости. Стенд оснащен измерительной аппаратурой. Разработана методика проведения и обработки экспериментальных данных. Проведена оценка неопределенности измеряемых величин. Показана работоспособность экспериментальной установки и достоверность получаемых результатов.

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 наножидкости (вязкость, теплопроводность) от объёмной концентрации наночастиц и их размера. Для гомогенной модели наножидкость рассматривается как однородная несжимаемая ньютоновская среда. Математическая модель турбулентного теплообмена построена на основе RANS подхода. 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. Для описания течения и теплообмена, магнитных наножидкостей в магнитном поле, разработана модель транспорта магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле на основе эйлерова 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 третьей главе изложены результаты 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%. В экспериментах использовались наночастицы оксидов кремния, алюминия, циркония и титана и наночастицы алмаза. Предварительно определены реология, коэффициенты вязкости и теплопроводности для всех наножидкостей.

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. Выявлено и описано влияние всех определяющих режимных параметров на теплоотдачу. Установлены уровни повышения коэффициентов теплоотдачи при использовании наножидкостей.

Вторая часть третьей главы посвящена численному моделированию вынужденной конвекции наножидкостей. Здесь исследована вынужденная конвекция наножидкости с частицами Al_2O_3 в ламинарном режиме течения и частицами SiO_2 в турбулентном для круглого канала с постоянной плотностью теплового потока на стенках. Показано, что, 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 четвертой главе 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 результатами использования поверхностных интенсификаторов в виде сферических выступов и кольцевой накаткой на стенках.

В ходе проведенного экспериментального исследования получены зависимости среднего коэффициента теплоотдачи и перепада давления от числа Рейнольдса в гладком канале и каналах с поверхностными интенсификаторами. 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.

Для каждого используемого в экспериментальном исследовании канала был проведен анализ теплогидравлической эффективности. Показано, что наножидкости в круглом канале позволяют получить теплогидравлическую эффективность сопоставимую с теплогидравлической эффективностью каналов с искусственными интенсификаторами теплообмена 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.

Пятая глава 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.

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 диссертации представлены основные выводы по работе.

Апробация результатов работы.

Работа прошла широкую апробацию. Результаты работ докладывались 20 международных и всероссийских конференциях. 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.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Содержание диссертации полностью соответствует специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы» (физико-математические науки) по пунктам 16 - Тепломассоперенос в газах и жидкостях, . 7 - Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии), 17 - Гидромеханика сред, взаимодействующих с гравитационным и электромагнитным полями. Динамика плазмы Паспорта этой специальности.

Замечания по диссертационной работе

- 1 Стилистическое замечание – автор часто пишет «теплогидравлическая эффективность наножидкости». Наверное лучше писать эффективность канала при течении наножидкости.
- 2 Канал (труба) на рабочем участке нагревается омическим способом. Учитывались ли потери через изоляцию в окружающую среду? П.3 методики обработки экспериментальных данных это не показывает! Как соотносятся тепловые потоки по п.3 и по п.7 методики?
- 3 В работе оценивается погрешность измерений. Уже давно перешли по ГОСТ 34100.3-2017 на оценку неопределенности.
- 4 Все таки существует разброс размеров частиц в партии. Насколько правомерно было считать размер частиц точным, как он выбирался, какое распределение по размерам в партии частиц. Показано, что плотность наножидкости определялась расчетно через массовую долю. Была ли проверка плотности экспериментально, через взвешивание? Совпадают ли значения?
- 5 Почему оставили обсуждение по перепаду давления, а не по коэффициентам гидравлического сопротивления. Лучше по всем параметрам переходить на безразмерные параметры для использования теории подобия.
- 6 Для инженерных расчетов теплообменного оборудования результаты было бы желательно представлять в обобщенном виде. С графиков считывать уровни коэффициентов теплоотдачи сложно, особенно со множества графиков, из-за влияние комплекса определяющих параметров.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в положении о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Гузей Дмитрий Викторович посвящена исследованию вынужденной конвекции наножидкостей и соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертация Гузей Д.В. является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, результаты которой представляют собой решение научной задачи, полностью соответствует всем требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук", а ее автор Гузей Дмитрий Викторович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв обсужден на заседании кафедры теплотехники и энергетического машиностроения (протокол № 12 от 31 мая 2022 г.).

Заведующий кафедрой теплотехники
и энергетического машиностроения,
д.т.н., профессор,
академик АН РТ

Гортышов Ю.Ф.

Д.т.н., профессор кафедрой теплотехники
и энергетического машиностроения,
член-корреспондент АН РТ

Попов И.А.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Телефон: +7 (843)-231-01-09

E-mail: kai@kai.ru

Адрес официального сайта в сети интернет: <https://kai.ru>

31.05.2022

Подпись *Гортышов*
заверяю: Началь
делами КНИТУ-К

Сведения о ведущей организации по диссертации
Гузей Дмитрия Викторовича
"Исследование вынужденной конвекции наножидкостей" по специальности 1.1.9 —
 Механика жидкости, газа и плазмы
 на соискание ученой степени **кандидата физико-математических наук.**

Полное наименование организации в соответствии с уставом:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом:	КНИТУ-КАИ
Ведомственная принадлежность организации	Учредитель образовательной организации: Российская Федерация. Функции и полномочия учредителя осуществляет Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Полное наименование структурного подразделения, составляющего отзыв:	Кафедра теплотехники и энергетического машиностроения
Почтовый адрес организации:	420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10
Веб-сайт	http://kai.ru/
Телефон	8 (843) 231-97-34
Адрес электронной почты	kai@kai.ru

Список основных публикаций работников структурного подразделения, составляющего отзыв, в рецензируемых научных изданиях за **последние пять лет** по теме диссертации (не более 15 публикаций).

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	Aksyanov R.A., Kokhanova Y.S., Kuimov E.S., Gortyshov Y.F., Popov, I.A.	Recommendations for Improving the Efficiency of Radio-Electronic Equipment Cooling Systems // Russian Aeronautics, 2021, -Vol.64 (2), -Pp. 291-296.
2	Баранова Т.А., Данильчик Е.С., Жукова Ю.В., Кадыров Р.Г., Маршалова Г.С., Миронов А.А., Попов И.А., Скрышник А.Н., Чорный А.Д.	Сопротивление и теплообмен одиночной трубы с поверхностными генераторами вихрей // Тепловые процессы в технике, 2021, -Т.13(11), -С. 495-508.
3	Tiunov S.V., Skrypnik A.N., Marshalova G.S.,	Experimental investigation of thermal and hydraulic characteristics of finned flat tubes of the oil air cooling device // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and

	Gureev V.M., Popov I.A., Kadyrov R.G., Chorny, A.D., Zhukova Y.V.	Power Engineering Associations, 2020, –Vol. 63 (2), –Pp. 138-150.
4	Миронов А.А., Исаев С.А., Скрыпник А.Н., Попов И.А., Гортышов Ю.Ф.	Физическое моделирование теплогидравлических характеристик каналов с овально-траншейными вихрегенераторами // Тепловые процессы в технике, 2020, - Т.12. -№ 9. -С. 386-402.
5	Mironov A.A., Isaev S.A., Popov I.A., Aksyanov, R.A., Skrypnik A.N.	Improving the Efficiency of Aircraft Heat Exchangers // Russian Aeronautics, 2020, -Vol. 63 (1), -Pp. 147-154.
6	Тарасевич С. Э., Шишкин А. В., Гиниятуллин А. А.	Теплоотдача в канале с оребренными скрученными лентами // ТВТ, 2020, -Т.58(1), -С.107–112.
7	Гуреев М.В., Ермаков А.М., Жукова Ю.В., Кадыров Р.Г., Калимуллин Р.Р., Маршалова Г.С., Миронов А.А., Низамутдинов Р.М., Попов И.А., Скрыпник А.Н., Тиунов С.В., Усенков Р.А., Хабибуллин И.И., Чорный А.Д.	Повышение надежности прогнозирования теплогидравлических характеристик трубчато-ребристых радиаторов аппаратов воздушного охлаждения энергоустановок на основе численного и экспериментального исследования // Тепловые процессы в технике, 2020, -Т.12. -№ 11. -С. 482-502.
8	Isaev S., Gritckevich M., Leontiev A., Popov I.	Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall // Acta Astronautica, 2019, -Vol.163, -Pp. 202-207.
9	Popov I.A., Shchelchkov A.V., Aksyanov R.A., Skrypnik A.N., Isaev, S.A.	Effect of Surface Heat Exchange Intensifier Geometry on Heat Transfer Tube Strength // Russian Aeronautics, 2019, -Vol.62 (3), -Pp. 373-380.

10	Олимпиев В. В., Мирзоев Б. Г., Попов И. А., Щелчков А. В., Скрыпник А. Н.	Повышение эффективности теплообменных труб энергетических установок // Инженерно-физический журнал, 2019, -Т.92, №3. С. 608-618.
11	Isaev S.A., Leontiev A.I., Milman O.O., Popov I.A., Sudakov A.G.	Influence of the depth of single-row oval-trench dimples inclined to laminar air flow on heat transfer enhancement in a narrow micro-channel // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, -Vol.134, -Pp. 338-358.
12	Giniyatullin A.A., Tarasevich S.E., Yakovlev A.B.	Heat Transfer in a Water Flow in Tubes with Ribbed Twisted Tape Inserts // High Temperature, 2018, -Vol.56 (2), -Pp. 302-305.
13	Skrypnik A.N., Shchelchkov A.V., Popov I.A., Ryzhkov D.V., Sverchkov S.A., Zhukova Y.V., Chorny A.D., Zubkov N.N.	Thermohydraulic Efficiency of Tubes with Internal Spiral Finning // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2018, -Vol.91 (1), -Pp. 52-63.
14	Shchukin A.V., Il'inkov A.V., Takmoltsev V.V., Khabibullin I.I.	Specifics of heat and mass transfer in spherical dimples under the effect of external factors // Thermal Engineering, 2017, -Vol.64 (6), -Pp. 450-457.

Даю свое согласие на публикацию предоставленных в настоящем заявлении данных об организации на сайте ИТПМ СО РАН, а также их хранение и использование в целях, связанных с обеспечением процедуры научной аттестации.

Проректор по НИИД,

д.т.н., профессор

ов Сергей Анатольевич

подписи (полностью)

Попов И.А.