

ТВЕРЖДАЮ:  
Ректор  
О «Сибирский  
университет»  
Л.В. Румянцев

8бря 2021 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Диссертация «Исследование вынужденной конвекции наножидкостей» выполнена в Лаборатории физико-химических технологий разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов (НЛ-1) НИЧ СФУ.

В период подготовки диссертации соискатель Гузей Дмитрий Викторович работал в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», в Лаборатории физико-химических технологий разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов (НЛ-1) НИЧ СФУ, в должности научный сотрудник.

В 2012 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» по специальности «Теплофизика». В 2016 г. окончил аспирантуру Сибирского федерального университета по направлению 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №889 от 29 октября 2021 г. выдана Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель – Минаков Андрей Викторович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт инженерной физики и радиоэлектроники, директор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### 1. Диссертация посвящена

Исследованию гидродинамики и теплообмена при вынужденной конвекции

наножидкостей.

## 2. Актуальность темы

Актуальность темы исследования определяется необходимостью интенсификация конвективного теплообмена. 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 теплообменного оборудования 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 мм. 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 исследованию наножидкостей, показывает, что на сегодняшний день опубликовано большое количество работ посвященных 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 создать новые технологий энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла, но и ответить

на некоторые принципиальные вопросы теплофизики и гидродинамики наножидкостей.

### **3. Научная новизна**

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.

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

Разработана математическая модель для описания течения и теплообмена наножидкостей в неоднородном магнитном поле на основе эйлерова 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.

**4. Достоверность результатов** обеспечена использованием в работе 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.

**5. Научная и практическая значимость работы** 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%. Разработана новая математическая модель 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.

## **6. Личный вклад автора.**

Заключается в создании экспериментального стенда. Автор лично выполнил тестирование экспериментального стенда и основную программу экспериментов по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению наножидкостей. Диссертант осуществлял проведение обработки и анализа результатов экспериментов. Автором создана расчетная модель и проведено численное моделирование процессов теплообмена. Основные результаты проведенных исследований опубликованы в рецензируемых журналах. Результаты работы были доложены автором на конференциях, в том числе международных.

## **7. Автором представляется к защите:**

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

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

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

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

## **8. Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: 51-й конференции «Студент и научно-технический прогресс» (2013), Всероссийской конференции 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-ой Всероссийской конференции «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий» (2015), Всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (2014, 2017, 2018, 2019), Национального конгресса по энергетике (2014), 4th European Conference on Microfluidics (2014), International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (2017), 13-ой Международной конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической газодинамики» (2015), Российская национальная конференция по теплообмену (2014, 2018), Российской конференции «Ультрадисперсные порошки и наноструктуры» (2019), Семинар вузов по теплофизике и



энергетике (Санкт-Петербург, 2019), Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (2016, 2017, 2019).

## 9. Публикации

По теме диссертации опубликованы 14 работ в 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. Shchelchkov 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. М.И. 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. Vol. 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. 2016. Vol. 102. pp.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. 2014. Vol. 348. pp 123-138.
9. Д.В. Гузей, А.В. Минаков, В.Я. Рудяк. Исследование теплоотдачи наножидкостей в турбулентном режиме течения в цилиндрическом канале // Изв. РАН. МЖГ. 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. 2014. Т. 40. № 5. 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. Т. 23. № 5. С.807-810.

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. 2014. Т.7. С.32-47.

Учитывая вышеизложенное, постановили:

Диссертация «Исследование вынужденной конвекции наножидкостей» Гузей Дмитрия Викторовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании расширенного семинара Лаборатории физико-химических технологий разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов (НЛ-1) НИЧ и кафедры Теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ).

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: "за" - 14 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол N 3 от "27" октября 2021 г.

Председатель семинара кандидат физико-математических наук, директор Института инженерной физики и радиоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Минаков Андрей Викторович

Сопредседатель семинара кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой Теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

—Дектерев Александр Анатольевич

Секретарь семинара кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Теплофизики Института инженерной физики и радиоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Финников Константин Андреевич