

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.129.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ
ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 24.12.2021 № 10/2021

О присуждении Минакову Андрею Викторовичу гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей» по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 24.09.2021 (протокол заседания № 5–2/2021) диссертационным советом 24.1.129.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Минаков Андрей Викторович 13 января 1982 года рождения защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Численное моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости с подвижными границами» в 2008 году в диссертационном совете, созданном на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), работает директором Института инженерной физики и радиоэлектроники СФУ, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Диссертация выполнена на кафедре Теплофизики СФУ.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, профессор Кафедры теоретической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» Рудяк Валерий Яковлевич.

Официальные оппоненты:

Бардаханов Сергей Прокопьевич – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Лаборатория

аэрофизических исследований дозвуковых течений, главный научный сотрудник;

Кузнецов Гений Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, профессор;

Смирнов Евгений Михайлович, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики, профессор;

– дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» в своем положительном отзыве, подписанном заведующим Кафедрой прикладной газовой динамики и горения, д.ф.-м.н., профессором Шрагером Геннадием Рафаиловичем указала, что: «...Диссертационная работа А. В. Минакова является законченным исследованием, выполненным на современном уровне, и может характеризоваться как научно-квалификационная работа, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и получены теоретико-экспериментальные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области механики жидкости и газа. Диссертация полностью соответствует требованиям пп. 9—11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Минаков Андрей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы...»

По результатам диссертационной работы опубликованы 48 статей в научных журналах, включенных в Перечень ВАК, из них 40 статей – в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Статьи автора диссертации также включены в три монографии. Недостоверные сведения об опубликованных работах отсутствуют. Вклад автора состоит в постановке задач исследований, разработке математических моделей, проведении расчетов и экспериментов, обработке и анализе полученных данных, и формулировании основных полученных результатов, подготовке публикаций.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Minakov A. V., Lobasov A. S., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Rudyak V. Ya. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – Vol. 88. – P. 140–148.
2. Minakov A. V., Guzei D. V., Pryazhnikov M. I., Zhigarev V. A., Rudyak V. Ya. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 102. – P. 745–755.
3. Minakov A. V., Guzei D. V., Meshkov K. N., Popov I. A., Shchelchikov A. V. Experimental study of turbulent forced convection of nanofluid in channels with cylindrical and spherical hollows // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 115. – P. 915–925.
4. Pryazhnikov M. I., Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Guzei D. V. Thermal conductivity measurements of nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 104. – P. 1275–1282.
5. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Guzei D. V., Zeer G. M., Rudyak V. Ya. The experimental study of nanofluids boiling crisis on cylindrical heaters // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2017. – Vol. 116. – P. 214–223.
6. Lobasov A. S., Minakov A. V. Analyzing mixing quality in a T-shaped micromixer for different fluids properties through numerical simulation // *Chemical engineering and processing*. – 2018. – Vol. 124. – P. 11–23.
7. Minakov A. V., Shebeleva A. A., Yagodnitsyna A. A., Kovalev A. V., Bilsky A. V. Flow Regimes of Viscous Immiscible Liquids in T-Type Microchannels // *Chemical Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 42. – № 5. – P. 1037–1044.
8. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Pryazhnikov M. I. Systematic Experimental Study of the Viscosity of Nanofluids // *Heat Transfer Engineering*. – 2020. – Vol. 41. – No. 5. – P. 457–460.
9. Minakov A. V., Pryazhnikov M. I., Suleymana Y. N., Meshkova V. D., Guzei D. V. Experimental study of nanoparticle size and material effect on the oil wettability characteristics of various rock types // *Journal of Molecular Liquids*. – 2020. – V. 321. – No. 114906. – 10 p.
10. Minakov A. V., Lobasov A. S., Shebeleva A. A., Shebelev A. V. Analysis of Hydraulic Mixing Efficiency in Widespread Models of Micromixers // *Fluids*. – 2020. – Vol. 5(4). – No. 211. – URL: <https://doi.org/10.3390/fluids5040211>

На автореферат поступило 6 отзывов. Все отзывы положительные, некоторые содержат замечания. В отзывах отмечается новизна, научная и практическая значимость, достоверность полученных результатов, актуальность направления исследований.

Отзывы Бадмаева Бадма Банзаракцаевича д.т.н., главного научного сотрудника лаборатории физики молекулярных структур ФГБУН Института

физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук и Владимира Михайловича Анискина д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника лаборатории физических проблем управления газодинамическими течениями ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук не содержат замечаний.

Отзыв д.ф.-м.н. Исаева Сергея Александровича, заведующего лабораторией фундаментальных исследований ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации содержит следующие замечания:

1. Глава 1 блестящая, но явно перегруженная материалом. Интересно, чем физически обосновано включение условий скольжения и как определяется M ?
2. По 2 главе возникает вопрос о дискретности. Как выбор сеток, организации процессов интегрирования и осреднения влияют на адекватность численных прогнозов?
3. По моделированию газожидкостных потоков в микро-каналах. Отмечается, что численное решение всех рассматриваемых задач в целом хорошо качественно и количественно согласуется с имеющимися экспериментальными данными. В каких диапазонах определяющих параметров?
4. Какое влияние оказывает природа наножидкостей на турбулентность потока?
5. На сколько возрастает теплоотдача при ламинарном теплообмене с увеличением размера наночастиц и на сколько снижается критическое число Рейнольдса при ЛТП при уменьшении размера наночастиц.
6. В процессе длительного кипения не происходит ли изменение физических свойств наножидкостей? Критическая плотность теплового потока при этом снижается?

Отзыв д.т.н. Попова Игоря Александровича, член-корреспондента АН РТ, профессора кафедры теплотехники и энергетического машиностроения ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ содержит следующие замечания:

1. В тексте автореферата, особенно в главах 1 и 2, используется термин «моделирование». Не понятно, когда оно численное, а когда экспериментальное. Если – численное, то была ли проведена верификация разработанных численных моделей, результатов исследований, в первую очередь карты режимов в разделе 1.5 или потери давления (на основе экспериментальных исследований)?

2. В разделе 2.4 описано влияние наночастиц на межфазное натяжение. Указано, что 1 мас. % наночастиц снижает натяжение в 1.7 раз и увеличение краевого угла. Но не сказано каких частиц – концентрация, материал, диаметр частиц.

3. Какие причины ухудшения смачиваемости нефтью горных породы при добавлении наночастиц? Тоже и в других разделах диссертации (по автореферату) – какая причина изменения теплопроводности жидкости при добавлении наночастиц, почему изменяется интенсивность кипения и критические тепловые потоки? В автореферате не раскрыта физика, механизмы процесса воздействия наночастиц на свойства и процессы, а дана скрупулёзное описание наблюдаемых факторов.

4. Чем может быть вызвано снижение интенсивности теплоотдачи при течении наножидкостей с ростом концентрации частиц при $Q=\text{const}$ в условиях вынужденной турбулентной конвекции (рис. 15 а)?

5. Заключение могло бы содержать больше количественных характеристик по исследованным диапазонам геометрических и режимных параметров, достигнутым эффектами.

Отзыв д.ф.-м.н. Стрижака Павла Александровича, профессора Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет содержит следующие замечания:

1. Цель работы сформулирована в виде действия, а не результата. В частности, указано: «цель – систематическое моделирование ...». Важно конкретизировать цель для обеспечения возможности оценки степени ее достижения и полноты выполнения запланированных задач.

2. Автором диссертации разработана методика моделирования течений и теплообмена одно- и многофазных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла. Целесообразно было бы в выводах описать границы ее применимости по конкретным характеристикам межфазных потоков и каналов. Не приведены значения ключевых характеристик последних, для которых правомерно применение предложенной методики.

3. В автореферате приведены изоповерхности, изолинии и распределения концентраций в цветовой гамме, но не представлены цветовые шкалы-палитры с диапазоном и единицами измерений. Сложно оценить интенсивность протекания соответствующих процессов в приведенных каналах и сечениях.

4. На 32 стр. автореферата указано, что в разделе 6.8 впервые исследовано влияние стабилизирующих веществ на кризис кипения наножидкостей. Целесообразно пояснить, какие стабилизирующие вещества использованы,

каковы их концентрации, каковы причины их выбора, какие перспективные и нецелесообразные к использованию ПАВ.

Отзыв д.ф.-м.н. Бекежановой Виктории Бахытовны, ведущего научного сотрудника, заведующего отделом дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук - обособленного подразделения ФГБНУ Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук" содержит следующие замечания:

1. Из текста автореферата остаётся неясным проводилась ли верификация численных моделей? Исследовалось ли влияние способа осреднения для метода, используемого в главе 2, на результаты моделирования?
2. В автореферате не упоминаются причины, обеспечивающие изменение смачиваемости нефтью вмещающих пород, при использовании наножидкостей. Проводился ли анализ механизмов, в результате которых меняются свойства смачиваемости?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации являются признанными специалистами в областях науки, непосредственно связанных с темой диссертации. Ведущая организация-ТГУ, несомненно, является одним из лидеров в области механики жидкости, газа и плазмы, в ней работают специалисты, которые могут дать полноценную экспертную оценку научной и практической значимости результатов работы (д.ф.-м.н., профессор А.Б. Ворожцов, д.ф.-м.н., профессор М.А. Шеремет, д.ф.-м.н., профессор Г.Р. Шрагер и др.). Официальные оппоненты д.ф.-м.н. С.П. Бардаханов, д.ф.-м.н. Г.В. Кузнецов и д.ф.-м.н. Е.М. Смирнов являются признанными специалистами в области механики жидкости и газа, многофазных потоков, численного моделирования, синтеза и исследований наноматериалов. Оппоненты имеют многочисленные научные работы в области, изучению которой посвящена диссертационная работа, опубликованные в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработана и апробирована численная методика моделирования течений и теплообмена одно- и многофазных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла. Систематически изучены режимы течения в наиболее распространенных микромиксерах и проведена их оптимизация с целью повышения эффективности перемешивания. Обнаружены новые режимы течения и установлены факторы, позволяющие управлять режимами течения и эффективностью перемешивания жидкостей в микромиксерах.

Установлены механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой породы. Получены новые экспериментальные данные о коэффициентах вязкости и теплопроводности наножидкостей на основе дистиллированной воды, этиленгликоля и машинного масла с частицами Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и наноалмазов. Экспериментально установлены зависимости коэффициентов вязкости и теплопроводности наножидкостей от размера материала наночастиц. Разработана и протестирована математическая модель течений и теплообмена наножидкостей с учетом их реологии и термодиффузии. Полученные новые экспериментальные данные по вынужденной конвекции указанных наножидкостей. Показано, что с помощью добавок наночастиц в теплоноситель можно значительно повысить среднее значение коэффициента теплоотдачи. Впервые установлено, что при фиксированном массовом расходе коэффициент теплоотдачи при ламинарном и турбулентном теплообмене наножидкости возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном значении числа Рейнольдса может иметь место экстремум. Установлено, что ламинарно-турбулентный переход при течениях наножидкостей наблюдается при меньших значениях числа Рейнольдса, чем в базовой жидкости. Получены новые экспериментальные данные о кризисе кипения наножидкостей. Подтверждено, что основным механизмом увеличения критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей является улучшение капиллярно-транспортных свойств поверхности за счет формирования капиллярно-пористых отложений на поверхности нагревателя.

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

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена сформулированными рекомендациями по управлению течениями и смешением жидкостей в наиболее распространенных микромиксерах и

микрореакторах, полученными экспериментальными корреляциями по коэффициентам вязкости и теплопроводности большого числа наножидкостей с оксидными частицами, рекомендациями по управлению характеристиками течения и тепломассообмена наножидкостей. В результате работы было показано, что при помощи наножидкостей можно значительно повысить коэффициент извлечения нефти при заводнении пласта. Это может быть использовано при разработке новых методов увеличения нефтеотдачи. Исследование процессов тепломассообмена наножидкостей показало, что их использование позволяет существенно повысить коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции и увеличить критическую плотность теплового потока при кипении на нагревателях малого диаметра. Эти результаты могут быть использованы при разработке новых технологий интенсификации процессов тепломассообмена. Разработанные в работе математические модели и численные методики могут быть использованы при исследованиях и оптимизации многофазных потоков, включая наножидкости, в различных микрофлюидных и теплообменных устройствах.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в организациях, занимающихся проектированием и оптимизацией современного теплообменного и микрофлюидного оборудования: ИТПМ СО РАН г. Новосибирск; ИТ СО РАН г. Новосибирск; ИМСС УрО РАН, г. Пермь; ФГУП НИИПМ, г. Пермь; Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск; АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева, г. Железногорск; НПП «Радиосвязь», г. Красноярск, а также организациями, занимающимися разработкой новых методов увеличения нефтеотдачи: НИИ ООО «РН-КрасноярскНИПИ-нефть», ООО «Тюменский нефтяной научный центр» и ряде других организаций.

Результаты исследований, полученные в диссертации, могут быть также использованы в учебном процессе в ВУЗах по дисциплинам «Вычислительная гидродинамика и теплофизика», «Математические модели задач гидродинамики и теплообмена», «Тепломассообмен», «Нанотехнологии и микросистемная техника», «Процессы переноса в дисперсных средах».

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов обеспечена использованием современных методов вычислительной гидрогазодинамики, основанных на фундаментальных физических законах, применением апробированных численных алгоритмов и экспериментальных методик, многократным тестированием и сопоставлением полученных результатов в предельных случаях с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований,

разработке и тестировании новых математических моделей для описания течений и теплообмена многофазных потоков, включая наножидкостей, в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения динамического контактного угла, а также экспериментально измеренных коэффициентов переноса, реологии и термодиффузии наножидкостей, проведении расчетов по установлению режимов течения в микроканалах и теплообмену наножидкостей, обработке и анализе полученных данных, и формулировании основных полученных результатов, подготовке публикаций. Разработка и создание экспериментальных стендов, обработка и анализ экспериментальных данных осуществлялись лично автором, либо при его непосредственном участии.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация А.В. Минакова является законченным научным исследованием, выполненным на современном уровне, и может характеризоваться как научно-квалификационная работа, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и получены теоретико-экспериментальные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области механики многофазных потоков и микрофлюидики.

На заседании 24.12.2021 диссертационный совет принял решение присудить Минакову Андрею Викторовичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человека, из них 7 докторов наук по специальности «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали за присуждение ученой степени – 20, против – 1, не действительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

д.ф.-м.н., академик РАН

Алексеев Сергей Владимирович

Ученый секретарь

д.ф.-м.н., профессор РАН

Терехов Владимир Викторович

27 декабря 2021 г.