

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ворожцов Александр Борисович

« 11 » ноября 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Минакова Андрея Викторовича «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация А. В. Минакова посвящена изучению гидродинамических и теплофизических процессов в микроканалах и определению реологических и теплофизических характеристик наножидкостей в зависимости от свойств несущей среды и наночастиц.

Актуальность темы.

Работы, посвященные исследованию течений наножидкостей в микроканалах, появились буквально три десятилетия назад и в настоящее время тематика переживает бурное развитие. В этой связи возникло новое самостоятельное направление механики жидкости и газа под названием микрофлюидика (микрогидродинамика) – междисциплинарная наука, изучающая закономерности поведения жидкостей и газов, движущихся по узким каналам внутри герметичных миниатюрных устройств – микрочипов. Интерес к данной проблеме прежде всего связан с многочисленными приложениями микросистемной техники в различных медицинских технологиях, в фармацевтической промышленности, при создании новых образцов вычислительной техники и т.п. Течения жидкостей в микроканалах также широко распространены в природе. Это и процессы переноса веществ в растениях и живых организмах, многофазная фильтрация флюидов в микропористых коллекторах нефти и газа и многое другое. Многообразие практических приложений результатов исследований в данной области, отсутствие полного понимания возникающих физических эффектов обуславливает большое количество работ по данной тематике. Однако объем экспериментальной информации, уровень

разработки математических моделей и опыт их реализации в данной области науки нельзя считать достаточным. Анализ современного состояния проблемы показывает несомненную актуальность выполненного исследования.

Общая характеристика работы.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 368 страниц, список литературы включает 556 наименований.

Во введении характеризуется современное состояние проблемы, определены цель и задачи исследования и обоснована их актуальность, формулируется практическая и теоретическая значимость, достоверность и новизна полученных результатов. Здесь же изложены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов на различных конференциях и о публикациях автора по теме диссертации, представлена краткая аннотация диссертации.

В первой главе сформулирована математическая модель для описания многокомпонентных потоков с учетом диффузии и теплообмена в микроканалах, в том числе и для наножидкостей. Модель построена на базе гидродинамического подхода, основанного на использовании уравнений Навье–Стокса, неразрывности, диффузии и энергии с учетом неньютоновского поведения среды и различных условий на стенках микроканалов. Здесь же описывается разработанный численный алгоритм для реализации математической модели, приводятся результаты его тестирования, выполненного на решении ряда задач гидродинамики в микроканалах, показана высокая эффективность алгоритма. С помощью численного моделирования получены результаты исследования течения и процесса смешения жидкостей в различных микромиксерах. При этом были рассмотрены как наиболее простые и распространенные формы миксеров, так и микромиксеры со сложной геометрией, применяемые на практике. Изучено влияние геометрии каналов, числа Рейнольдса, свойств смешиваемых жидкостей, входной температуры, условий скольжения и шероховатостей на стенках канала на режимы течения и эффективность смешения. В целях уменьшения сопротивления микроканалов было изучено влияние гидрофобных покрытий стенок канала. Показано существенное падение сопротивления при практически неизменных характеристиках смешения. С практической точки зрения наибольший интерес представляет режим с образованием двухвихревой S-образной структуры, при переходе к которому эффективность смешения увеличивается в десятки раз без дополнительного роста потерь давления. Проведено исследование факторов, способствующих наступлению данного режима.

Во второй главе характеризуется современное состояние проблемы, связанной с изучением двухфазных потоков в микроканалах, описывается

вычислительная технология расчета двухфазных и двухжидкостных потоков в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического контактного угла смачивания, разработанная на базе VOF-метода. Проведено тестирование разработанной численной методики на решении ряда задач газожидкостного и двухжидкостного течения несмешивающихся сред в мини- и микроканалах различной геометрии и продемонстрировано качественное согласование полученных результатов с экспериментальными и теоретическими данными других авторов. При помощи разработанной численной методики проведено исследование двухфазных и двухжидкостных течений в мини- и микроканалах различной формы. Проведено экспериментальное и численное исследование режимов течений воды и нефти в микроканале Y-типа. Установлены зависимости длины, скорости и частоты образования снарядов воды в сырой нефти от параметров капельного и снарядного режима течения. Проведены исследования по влиянию добавок наночастиц на эффективность вытеснения нефти из микропористой породы. С помощью разработанной методики получены результаты расчетного исследования процесса вытеснения нефти наножидкостью из микропористой среды.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования вязкости нескольких десятков наножидкостей. Исследуемые наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды и этиленгликоля с наночастицами Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 и наноалмазов. Исследовано влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих веществ на вязкость наножидкостей. Исследованы также факторы, влияющие на реологию наножидкостей. Показано, что вязкость наножидкостей значительно выше, чем вязкость обычных микродисперсных суспензий, поэтому она не описывается классическими теориями (например, Эйнштейна, Батчелора и т. д.). Впервые экспериментально показано, что при одинаковом размере и концентрации наночастиц наножидкости с разным материалом наночастиц могут иметь разную вязкость.

В результате изучения вязкости нескольких десятков наножидкостей впервые были получены систематические данные по реологическому поведению наножидкостей. Впервые было установлено, что переход от ньютоновского поведения к неньютоновскому в наножидкостях может происходить не только при увеличении концентрации наночастиц, как это имеет место для обычных суспензий, но и при уменьшении размеров наночастиц. Экспериментально было показано, что вязкость и реология наножидкостей зависят от многих факторов, главными из которых являются концентрация, размер, материал наночастиц и свойства базовой жидкости. Наличие подобной комплексной зависимости является

одной из причин имеющихся расхождений в данных, полученных ранее различными авторами.

В четвертой главе описывается установка для определения коэффициента теплопроводности наножидкостей и представлены результаты экспериментального исследования коэффициента теплопроводности нескольких десятков различных наножидкостей. Исследуемые наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды, этиленгликоля и машинного масла с шестью различными материалами наночастиц (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , CuO , SiO_2 , и алмазов). Исследовано влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих веществ на коэффициент теплопроводности наножидкостей. Показано, что коэффициент теплопроводности наножидкостей в общем случае превышает значения, предсказываемые теорией Максвелла, и во всех рассмотренных случаях растет с увеличением размера частиц. Вместе с тем экспериментально установлено, что при достаточно малом размере наночастиц коэффициент теплопроводности наножидкости может быть и меньше значений, предсказываемых формулой Максвелла. На основе полученных в работе экспериментальных данных выписана универсальная эмпирическая формула для определения коэффициента теплопроводности наножидкостей, учитывающая зависимость от концентрации, размера и материала наночастиц в широком диапазоне параметров с погрешностью, не превышающей 5 %.

В пятой главе описывается установка для экспериментального изучения вынужденной конвекции, представлены результаты исследования вынужденной конвекции более десятка различных наножидкостей. Продемонстрировано влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости на коэффициент теплоотдачи и перепад давления при ламинарной и турбулентной вынужденной конвекции в прямых круглых каналах, обогреваемых с постоянной плотностью теплового потока. Установлено, что с увеличением концентрации наночастиц коэффициент теплоотдачи при ламинарном теплообмене всегда возрастает, а при турбулентном теплообмене при фиксированном значении массового расхода теплоносителя может иметь место снижение коэффициента теплоотдачи с ростом концентрации частиц. Впервые установлено, что при фиксированном массовом расходе коэффициент теплоотдачи при ламинарном и турбулентном теплообмене наножидкости возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном значении числа Рейнольдса может иметь место экстремум. Разработана и протестирована математическая модель течений и теплообмена наножидкостей с учетом реологии, термодиффузии и турбулентности. Проведена экспериментальная верификация двухкомпонентной модели теплообмена наножидкости с учетом диффузии и термодиффузии наночастиц. С помощью численного моделирования изучено влияние реологии на

характеристики течения и теплообмена наножидкостей. Проведено экспериментальное исследование ламинарно-турбулентного перехода при течении наножидкостей в круглой трубе. Впервые было показано, что в наножидкостях с уменьшением размера наночастиц ламинарно-турбулентный переход происходит при меньших значениях числа Рейнольдса.

В шестой главе описывается установка и методика эксперимента по изучению кризиса кипения наножидкостей, представлены результаты экспериментального исследования этого процесса на цилиндрическом нагревателе. Продемонстрировано влияние концентрации, размера и материала наночастиц, добавки стабилизирующих веществ, а также размеров нагревателя и длительности кипячения на критическую плотность теплового потока при кипении наножидкостей. Впервые обнаружено, что критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей зависит от длительности процесса кипячения, доказано, что при прочих равных условиях (концентрация, размер, длительность кипячения) на кризис кипения наножидкостей оказывает влияние материал наночастиц. Исследовано влияние ПАВ на кризис кипения наножидкостей. В результате исследований показано, что основным механизмом интенсификации критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей является улучшение смачиваемости поверхности, за счет формирования капиллярно-пористых отложений на поверхности нагревателя.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы проведенных исследований.

Научная новизна результатов диссертации.

В диссертации получены новые результаты, в качестве которых можно выделить следующие:

1. Сформулирована математическая постановка и разработана вычислительная технология расчета многофазных течений, в том числе и наножидкостей, в мини - и микроканалах с учетом межфазного натяжения, динамического контактного угла, реологии и термодиффузии.

2. Результаты параметрических расчетов выявленных режимов течения и смешения в типичных микромиксерах, установление факторов, влияющих на эти режимы.

3. Установлены и исследованы методы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды.

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

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

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

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

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

Достоверность и обоснованность результатов диссертации.

Достоверность обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методов исследования теплофизических свойств жидкостей и тщательным их тестированием, использованием современных математических моделей, адекватно описывающих физическое содержание исследуемых процессов, применением апробированных и теоретически обоснованных численных методик и алгоритмов, тестированием разработанных моделей и методик на большом количестве тестовых задач и согласованием полученных результатов в предельных случаях с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Материалы диссертационного исследования были представлены и обсуждены более чем на 35 всероссийских и международных конференциях и семинарах. 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.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает результаты исследований.

Теоретическая значимость результатов определяется разработкой новых математических моделей для описания течений и теплообмена многофазных потоков, включая наножидкости, в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения, динамического контактного угла, экспериментально обоснованных коэффициентов переноса, реологии и термодиффузии наножидкостей,

полученными новыми знаниями, способствующими более глубокому пониманию процессов теплообмена в микрофлюиде.

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

Результаты работы могут найти применения в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск); Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь); АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (г. Пермь); Новосибирском государственном архитектурно-строительном университете (Сибстрин); Национальном исследовательском Томском государственном университете; АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М. Ф. Решетнева (г. Железногорск); НИИ ООО «РН-КрасноярскНИПИ-нефть» и ряде других организаций.

Кроме того, результаты, представленные в диссертации, используются в учебном процессе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет».

Замечания по диссертации.

1. Высокие значения эффективной вязкости и малые значения ширины каналов могут приводить к существенным эффектам вязкой диссипации. В работе отсутствует оценка возможного влияния этого фактора.

2. Математические постановки задач динамики наножидкостей, рассмотренные в работе, содержат сингулярности, которые следует учитывать при организации вычислительного алгоритма. Это некорректность традиционной постановки задачи о течении вязкой жидкости со свободной поверхностью при наличии линии трехфазного контакта, особенность «бесконечной вязкости» для псевдопластичной жидкости Оствальда – де Вааля ($n < 1$), жидкостей Шведова – Бингама и Балкли – Гершеля, угловые точки областей течения. Однако в работе

отсутствует информация, как же автор преодолевает эти дополнительные трудности.

3. При изучении влияния периодических течений на процесс смешения представляется более удобным использовать критерий Струхала, при анализе течений вязкопластичных сред - воспользоваться числом Бингама.

4. Течения вязкопластичных сред характеризуются наличием квазитвердых ядер в потоке. Был бы интересен анализ структуры потока с точки зрения таких особенностей течений жидкостей с пределом текучести.

5. В первоначальном варианте VOF – метода (Hirt C.W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) methods for the dynamic of free boundaries. Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 39. – P. 201–226) свободная поверхность аппроксимируется ступенчатой поверхностью. В этой связи следовало бы описать модификацию метода, которая обеспечивает достаточную точность расчета кривизны поверхности раздела.

6. При формулировке математической модели конкретных течений в некоторых случаях автор ограничивается словесным описанием условий задачи, не конкретизируя расположение системы координат и количество узлов по ее осям, формул зависимости вязкости от температуры, расшифровку обозначений и т.п., что затрудняет чтение материала диссертации и требует дополнительного обращения к публикациям автора.

Заключение

Несмотря на указанные замечания, отметим, что в диссертации выполнен большой объем исследований по актуальному направлению и получены результаты, пополняющие объем знаний в данной области. Тема и содержание диссертации несомненно соответствуют специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

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.

Таким образом, данная 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.

Отзыв составлен заведующим кафедрой прикладной газовой динамики и горения, доктором физико-математических наук, профессором Шрагером Геннадием Рафаиловичем, обсужден и одобрен на расширенном заседании научного семинара кафедры прикладной газовой динамики и горения физико-технического факультета ТГУ, протокол № 276 от 22.11.2021.

Заведующий кафедрой прикладной газовой динамики и горения
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
доктор физико-математических наук
(1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор



Шрагер Геннадий Рафаилович

22.11.2021

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Адрес: Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Тел.: (3822) 52-98-52, e-mail: rector@tsu.ru, сайт: <https://www.tsu.ru>