

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Минакова Андрея Викторовича «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертационной работы. Актуальность работы во многом обусловлена наблюдающейся в последнее время тенденцией к миниатюризации устройств и аппаратов. По мере развития микро- и нанотехнологий и их внедрения в наукоёмкое производство возникают всё более сложные задачи, связанные с течениями жидкостей и двухфазных сред в микро- и наноканалах. Несмотря на значительное количество работ по данной тематике, многообразие и сложность многофазных течений в микрофлюидных системах требовали проведения дальнейших систематических исследований по разработке соответствующих математических моделей для их описания и поиску путей для изучения и оптимизации режимов этих течений, что являлось одной из задач данной диссертации. С другой стороны, создание новых микрофлюидных устройств требует использования материалов с уникальными характеристиками. К таким уникальным материалам по праву относятся наножидкости. Исследование свойств наножидкостей и возможностей их применения в различных приложениях стало трендом современной науки в последние десятилетия. Достижения в области синтеза наночастиц сделали возможным получение стабильных наножидкостей с контролируемым размером наночастиц. Число работ, в которых изучаются различные свойства наножидкостей растет экспоненциально быстро, однако ответа на многие принципиальные вопросы в этой области до сих пор получено не было. Выяснилось, что свойства наножидкостей не универсальны и не описываются классическими теориями. Все это делает актуальным дальнейшие систематические исследования этих свойств. Ключевыми здесь являются вопросы о зависимости коэффициентов переноса и характеристик течений и теплообмена наножидкостей от концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих веществ, и т.д. Систематические исследования, выполненные в данной диссертации, позволили ответить на многие из этих вопросов.

Следует отметить, что тематика диссертационного исследования относится к приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ (п. 8. «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика») и входит в перечень критических технологий РФ (п. 14. «Технологии наноустройств и микросистемной техники»). Таким образом, актуальность исследования, выполненного в диссертационной работе А.В. Минакова «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических

характеристик наножидкостей», не вызывает сомнений и результаты исследований представляют, как теоретический, так и практический интерес.

Характеристика содержания диссертационной работы. Работа посвящена систематическому моделированию и изучению течений и теплообмена многофазных потоков в мини- и микроканалах и экспериментальному изучению коэффициентов переноса и теплообмена наножидкостей. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 368 страницах машинописного текста, включая 260 рисунков, 34 таблиц и список литературы из 556 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследуемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и задачи работы, перечислены полученные новые результаты, их научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, а также обоснованность и достоверность результатов и выводов, дана краткая характеристика разделов диссертации.

В первой главе приведены результаты систематического моделирования однофазных течений и теплообмена несжимаемых жидкостей в наиболее распространенных на практике микромиксерах. Приведено описание и результаты тестирования разработанной численной методики моделирования процессов гидродинамики и теплообмена жидкостей в микроканалах. Показано удовлетворительное согласие расчетов и экспериментов. Систематически изучены основные режимы течения и проведена оптимизация наиболее распространенных микромиксеров. Обнаружены новые режимы течения и установлены факторы, позволяющие управлять эффективностью перемешивания жидкостей в микромиксерах.

Во второй главе приведены результаты моделирования двухфазных потоков в микроканалах. Дано подробное описание и приведены результаты тестирования разработанной методики расчета двухфазных течений в микроканалах с учетом межфазного натяжения и динамического угла смачивания. Продемонстрировано, что численное решение всех рассмотренных задач в целом хорошо согласуется с имеющимися данными экспериментальных исследований. Приведены результаты систематического исследования двухфазных и «двухжидкостных» течений в микроканалах. Описаны результаты экспериментального и численного исследования режимов течений воды и нефти, в том числе и в процессе вытеснения нефти наножидкостью из микропористой среды.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования коэффициента вязкости и реологии нескольких десятков наножидкостей на основе различных базовых жидкостей с наночастицами оксидов металлов и наноалмазов в очень широких диапазонах концентраций и средних размеров частиц. Приведены результаты

систематического исследования влияния концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих ПАВ и полимеров на вязкость наножидкостей. Отдельно впервые изучены факторы, влияющие на реологию наножидкостей.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального изучения коэффициента теплопроводности рассмотренных наножидкостей. Дано описание созданной экспериментальной установки и результатов ее тестирования. Изучено влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавки стабилизирующих ПАВ и полимеров на коэффициент теплопроводности наножидкостей. На основе полученных экспериментальных данных разработаны эмпирические корреляции для описания коэффициента теплопроводности наножидкостей.

В пятой главе приведены результаты изучения вынужденной конвекции рассмотренных наножидкостей. Получены зависимости коэффициента теплоотдачи и потерь давления в канале от концентрации, размера, материала наночастиц и свойств базовой жидкости. Впервые систематически изучен ламинарно-турбулентный переход в наножидкостях. Дано подробное описание разработанной математической модели вынужденной конвекции наножидкостей с учетом термодиффузии и реологии наножидкости, а также результатов ее тестирования. Представлены результаты систематического расчетного исследования конвективного теплообмена наножидкостей.

В шестой главе представлены результаты экспериментального исследования кризиса кипения наножидкостей на тонких проволоках. Систематически исследован кризис кипения наножидкостей. Изучено влияние концентрации, размера и материала наночастиц, добавки стабилизирующих полимеров, а также размеров нагревателя и длительности кипячения. Сделано предположение, что основным механизмом интенсификации КТП при кипении наножидкостей является улучшение смачиваемости поверхности за счет формирования капиллярно-пористых отложений на поверхности нагревателя.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы, сделанные на основе проведенных исследований.

Научная новизна. В основном можно согласиться с формулировками автора о новизне работы, которая заключается в следующем. 1. Впервые с помощью численного моделирования изучены основные режимы течения и смешения в типичных микромиксерах, установлены факторы, влияющие на эти режимы, сформулированы критерии оптимизации работы микромиксеров. 2. Разработана численная методика расчета многофазных течений, в том числе и наножидкостей, в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения, динамического контактного угла, реологии и термодиффузии. 3. Исследованы и установлены

механизмы 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 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 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.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Разработан ряд новых математических моделей для описания течений и теплообмена многофазных потоков в мини- и микроканалах с учетом межфазного натяжения, динамического контактного угла, экспериментально обоснованных коэффициентов переноса, исследованных реологии и термодиффузии наножидкостей. Изучены основные режимы течения в наиболее распространённых микромиксерах, и определены факторы, от которых эти режимы зависят. Установлены основные механизмы увеличения нефтеотдачи при течении нефти и наножидкости в пористых средах. Установлены основные закономерности поведения коэффициентов переноса и характеристик тепломассообмена наножидкостей. Сформулированы рекомендации по управлению течением и смешением жидкостей в наиболее распространенных микромиксерах и микрореакторах. Разработаны экспериментальные корреляции по коэффициентам вязкости и теплопроводности нескольких десятков наножидкостей. Сформулированы рекомендации по управлению характеристиками течения и тепломассообмена наножидкостей. Показано, что при помощи наножидкостей можно на десятки процентов повысить коэффициент извлечения нефти при заводнении пласта, на десятки процентов повысить коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции и в разы увеличить критическую плотность теплового потока при кипении. Эти результаты могут быть использованы при разработке новых технологий увеличения нефтеотдачи и 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.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов подтверждается использованием современных методов вычислительной гидродинамики, основанных на фундаментальных физических законах сохранения, 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, использованием современных и хорошо зарекомендовавших себя экспериментальных методов, повторяемостью полученных результатов.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Диссертация А.В. Минакова соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы по областям исследования в пунктах: 1. Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях; 3. Ламинарные и турбулентные течения; 6. Течения многофазных сред; 7. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. 11. Пограничные слои, слои смешения, течения в следе. 13. Гидродинамическая устойчивость. 15. Тепломассоперенос в газах и жидкостях. 18. Аналитические, асимптотические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные, спектральные, методы конечного объема, методы прямого моделирования и др.).

Публикации, отражающие основное содержание диссертации и апробация работы. 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. Результаты диссертационной работы были представлены на более чем 35 всероссийских и международных конференциях и семинарах.

Замечания по содержанию диссертации:

1. В уравнениях движения жидкости в микроканалах отсутствует слагаемое, связанное с учетом силы тяжести. Обоснования этого в тексте не приводится. В связи с этим неясно, как учет силы тяжести мог бы повлиять на основные режимы течения в изученных микроканалах.

2. При изучении реологии автор ограничился изучением лишь вязкопластических свойств наножидкостей. При этом вязкоупругие свойства наножидкостей не были рассмотрены в работе, хотя они также представляют значительный интерес.

3. В текстах диссертации и автореферата неоднократно встречается упоминание, что исследования проводились с использованием нескольких десятков (или «более десятка») наножидкостей. В то же время оппоненту не встретился их список. Имеется ли в виду, что на основе использования базовых жидкостей – воды (W), этиленгликоля (EG) и машинного масла (O) – и с введением большого числа различных наночастиц и приготавливались эти «несколько десятков»?

4. В диссертации был изучен коэффициент теплопроводности наножидкостей с оксидными наночастицами, в то время как из литературы известно, что максимальные приращения коэффициента теплопроводности наблюдаются у наножидкостей с металлическими и углеродными частицами (УНТ, графен). Чем обоснован выбор веществ?

5. Замечание 4 хотелось бы еще дополнить. Диссертант совершенно справедливо отмечает, что в прежних исследованиях обнаружено влияние множества факторов на коэффициенты переноса в наножидкостях, в частности, существование зависимостей от формы и материала наночастиц. Однако, по мнению оппонента, даже для наночастиц одних и тех же материала (вещества), формы (в частности, сферической), среднего размера, существуют и более глубокие различия (самые простые лиофильность-лиофобность), определяющие взаимодействие с диспергирующей жидкостью. В частности, в строении поверхности наночастиц, которое определяется способом их получения – производства. Эти особенности могут влиять на реологию и процессы теплопереноса, однако в диссертации они нисколько не отмечены для обсуждения взаимодействий «внутри» наножидкости, разве что изучалось влияние гидрофобности стенок для уменьшения сопротивления микроканалов.

6. При обосновании математической модели и численных методик, основываясь на значениях числа Кнудсена (для газов), делается вывод, что гидродинамическое описание вполне корректно использовать для типичных микроканалов. В то же время справедливо отмечается, что в жидкостях не существует строгого понятия числа Кнудсена, при одновременной ссылке, что размер молекул жидкости порядка 10^{-10} метра. Однако арифметический подсчет показывает, что по крайней мере для части использовавшихся наночастиц их размер составляет 10^{-7} – 10^{-8} метра. Одновременно, даже при малых концентрациях частиц (твёрдых!) в наножидкости их число может быть сопоставимо с числом молекул базовой жидкости при плотности их вещества большей в несколько раз. Не будет ли эта «сравнимость» с размерами молекул жидкости основанием для более строгого обоснования «сплошности среды» при разработке теоретических выкладок?

7. В чем ещё, по мнению диссертанта, может состоять эффект увеличения извлекаемости нефти из пластов при использовании наножидкостей? Не есть ли это некий физико-химический эффект изменения свойств «нефти» на фронте ее встречи с частицами наножидкости?

8. Диссертация хорошо оформлена, хотя есть затруднения при поиске ссылок на источники.

Заключение. Высказанные замечания (они скорее могут рассматриваться как пожелания) не снижают ценности, научной и практической значимости работы и общей положительной оценки диссертации. Исследования, представленные в диссертации выполнены на высоком научном уровне, и имеют научную и практическую значимость. **Автореферат диссертации** составлен в соответствии со всеми установленными требованиями и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Минакова Андрея Викторовича «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей» является завершённым научным исследованием, совокупность новых научных результатов, представленных в ней можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области многофазных потоков в микроканалах и механике дисперсных сред. Таким образом, представленная диссертационная работа по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор А.В. Минаков заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, главный научный сотрудник ФГБУН Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

16 ноября 2021

Бардаханов Сергей Прокопьевич

Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук. Тел +7(383) 330-42-68, e-mail: bard@itam.nsc.ru.

Подпись Бардаханова С.П. заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Ю.В. Кратова

