

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора

Кузнецова Геня Владимировича

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

Актуальность темы диссертационной работы

Создание новых технологий во многих отраслях промышленности в последние десятилетия сопряжено с использованием однофазных жидкостей и газов, суспензий, эмульсий и аэрозолей, ранее не являвшихся базовыми в связи с отсутствием базы знаний для прогностического моделирования сложных процессов, протекающих при реализации этих технологий, и вычисления основных характеристик этих процессов (экспериментальных данных, моделей, методов решения задач, теоретических следствий). Можно полагать, что для решения многих технологических и технических задач на современном уровне требований к детализации процессов прогностического моделирования достигнутого в конце двадцатого века уровня теоретических обобщений было недостаточно. Но первые десятилетия двадцать первого века убедительно показывают, что по настоящему инновационные (или, как часто говорят, прорывные) технологии являются, в основном следствием фундаментальных исследований (экспериментальных или теоретических). К инновационным до последнего времени относят и «нанотехнологии». При этом, несмотря на подчеркнуто повышенное внимание к проблемам, задачам и технологиям с приставкой «нано» со стороны Правительства РФ и многих государственных структур, в настоящее время можно утверждать о далеко неоднозначном отношении многих исследователей, инженеров-конструкторов и технологов к этому научному направлению и, соответственно, термину «нано».

Причина такой «двойственности» в оценках реальных возможностей «нанотехнологий», скорее всего, обусловлена объективными причинами. Несмотря на то, что даже в «Приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» (утверждены Указом Президента РФ от 07 июля 2011 г.) на втором месте стоит направление «Индустрия наноносителей», пока нет объективных оснований для вывода о том, что к настоящему времени разработаны научные основы (в классической интерпретации этого термина) хотя бы какой-то малой части «нанотехнологий». Последнее является, скорее всего, следствием, в первую очередь того, что с «наносредами» (в большинстве практически значимых случаев, это наножидкости) эксперименты проводить очень не просто. До последнего времени было возможно определение только каких-то интегральных характеристик (теплопроводности, вязкости), но пока нет методик регистрации характеристик переноса массы, импульса и энергии при движении одной или нескольких наноразмерных частиц в условиях течения «наножидкостей». При этом

достаточно часто при исследованиях «наножидкостей» возникают не только противоречия в понимании физики исследуемых разными авторами идентичных процессов (и физической интерпретации результатов экспериментов), но также достаточно типичны как существенные отличия численных значений коэффициентов переноса, так и характера зависимостей этих коэффициентов от основных значимых факторов.

По этим причинам показательным является установленный во многих экспериментах нестационарный характер свойств «наножидкостей». Многие закономерности изменения характеристик «наножидкостей» с ростом времени до сих пор не объяснены в рамках современной теории вязкой жидкости. Еще большая неопределенность типична для дифференциальных характеристик «наножидкостей» (полей температур и скоростей), по которым пока крайне мало достоверных экспериментальных данных. Отсутствие таких данных исключает пока возможность создания общей теории процессов переноса в наножидкостях, которая до настоящего времени не разработана.

По этим причинам тема диссертации А.В. Минакова, одной из целей которой является экспериментальное изучение коэффициентов переноса и теплообмена наножидкостей, безусловно актуальна.

При анализе актуальности темы диссертации А.В. Минакова следует также отметить, что значительная часть его диссертационного исследования посвящена моделированию и изучению течения и теплообмена многофазных потоков в мини- и микроканалах. Это научное направление привлекает в последние годы к себе все больше внимания (несмотря на сложности решения задач течения вязкой жидкости в каналах малых поперечных размеров) в связи с тенденцией снижения материалоемкости во многих отраслях техники и создания технических систем и устройств, в которых основные технологические процессы протекают в мини- и микроканалах. Но теория процессов в таких каналах имеет пока скорее качественный характер (не является пока инструментом детального прогноза характеристики течения вязких жидкостей в таких условиях). Поэтому результаты диссертационного исследования А.В. Минакова в части создания основных элементов теории течения структурно - неоднородных жидкостей в мини- и микроканалах существенно расширяют современные представления об этих сложных процессах, экспериментальное изучение которых во многих случаях не только является очень сложным, но даже невозможно.

При оценке актуальности темы диссертации А.В. Минакова необходимо отметить, что по своему содержанию она полностью соответствует не только приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Индустрия наноносителей», но также и перечню критических технологий Российской Федерации «Нано-, био-, информационные, когнитивные технологии» (утверждено указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Рукопись имеет объем 368 страницы (260 рисунков и 34 таблицы). Список цитируемой литературы включает 556 источников.

Во введении, помимо обоснования актуальности диссертационного исследования, формулировки цели, описания научной новизны, практической значимости полученных результатов и защищаемых положений, выполнен обзор литературы по тематике исследования, который является базой для обоснования целесообразности диссертационного исследования.

В первой главе рукописи приведены результаты выполненного автором диссертации математического моделирования однофазных течений и теплообмена вязких несжимаемых жидкостей в наиболее используемых в настоящее время микромиксерах. Автором разработана методика численного решения наиболее значимых и типичных в этой сфере задач гидромеханики и теплообмена применительно к микроканалам в рамках пространственной модели течения жидкости. Установлено, что применяемое в диссертации гидродинамическое описание процессов корректно для микроканалов с характерными поперечными размерами до 1 микрометра. Авторский подход к анализу исследуемых процессов обеспечивает возможность моделирования неизотермических потоков многокомпонентных смесей в общем случае неньютоновских (реологически сложных) жидкостей. Приведены результаты исследования течений в миксерах достаточно типичных конфигураций. В качестве основной характеристики процесса анализировалась эффективность смешения и выполнены оценки влияния на эту характеристику основных значимых факторов. В качестве обобщенных переменных использовались числа Рейнольдса и Пекле. Показана возможность управления режимами течения в результате изменения плотности, вязкости и температуры смешиваемых жидкостей. Также исследованы процессы смешения в активных микромиксерах. Установлены параметры пульсаций потока на входе в миксер, обеспечивающие достижение максимальной эффективности работы таких миксеров.

Во второй главе приведены результаты численного моделирования двухфазных (а также двухжидкостных) течений в микроканалах. Проведено моделирование течений достаточно представительной группы жидкостей (водный раствор глицерина, парафиновое и касторовое масла, воды, ионной жидкости, нефти). Выявлены несколько режимов течения двух жидкостей в микроканалах (параллельный, капельный, снарядный, хаотичный). Построены карты режимов. Решена задача вытеснения нефти наножидкостью из модельной горной породы. Для замыкания математической модели выполнены эксперименты с целью определения необходимых для решения задачи эмпирические характеристики среды (коэффициента межфазного натяжения и краевого угла смачивания). Установлено, что с ростом концентраций наноразмерных частиц межфазное натяжение на границе раздела «нефть-наножидкость» значительно снижается, а краевой угол смачивания растет существенно. Также установлено, что размер наночастиц оказывает влияние на межфазное натяжение и на краевой угол смачивания поверхности нефтью. Результаты численного анализа показали возможность значительного увеличения коэффициента извлечения нефти при добавлении наночастиц в вытесняющую жидкость вследствие улучшения смачивания горной породы водой после добавления в нее наночастиц.

Третья, четвертая, пятая и шестая главы посвящены описанию результатов исследования наножидкостей. В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов изменения вязкости наножидкостей с изменением численных значений основных значимых факторов (размеров частиц, их конфигурации, температуры, добавок поверхностно-активных веществ и полимеров). Исследована большая группа наножидкостей на основе дистиллированной воды, этиленгликоля и машинного масла с частицами большой группы типичных оксидов в достаточно широких диапазонах изменения характерных размеров частиц и их концентраций. По результатам проведенных экспериментов установлены условия перехода от ньютоновского поведения наножидкостей к неньютоновскому при изменении концентраций и характерных размеров частиц.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей изменения коэффициентов теплопроводности большой группы наножидкостей при изменении основных значимых факторов, характеризующих присутствие в жидкости наноразмерных частиц. Получены экспериментальные данные, необходимые для численного моделирования процессов теплопереноса в наножидкостях.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных с целью установления основных характеристик процессов вынужденной конвекции наножидкостей, необходимых в практических приложениях, - коэффициентов теплоотдачи. Установлено, что разработанная автором диссертации математическая модель при использовании достоверно установленных экспериментально коэффициентов переноса хорошо описывает процессы теплоотдачи при течении наножидкостей в каналах круглого поперечного сечения.

В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований автора диссертации, выполненных с целью установления основных закономерностей кризиса кипения наножидкостей на цилиндрическом нагревателе. Аналогично исследованиям, описанным в третьей – пятой главах, изучено влияние концентраций, размеров и материала наночастиц на величину критической плотности теплового потока. Кроме этих факторов проведен анализ влияния длительности процесса и размера нагревателя на основную характеристику кризиса кипения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования А.В. Минакова.

Общая методология и методика исследования

Методики исследования, применяемые в диссертации А.В. Минакова, включают в себя совокупность теоретических и экспериментальных подходов к изучению процессов течения неоднородных жидкостей в мини- и макроканалах, а также коэффициентов переноса и теплообмена наножидкостей. Автор диссертации модернизировал известные методики экспериментов и разработал новые применительно к решению задач своего диссертационного исследования. При этом была исследована очень большая группа наножидкостей, достаточно

существенно отличающихся по своим физическим свойствам. Последнее привело к необходимости совершенствования как методов проведения экспериментов, так и регистрации основных характеристик исследовавшихся в диссертации процессов. При разработке методик измерения характеристик исследовавшихся наножидкостей автор диссертации использовал современные представления о физике процессов переноса в таких жидкостях. При планировании и проведении экспериментальных исследований, а также при обработке результатов соответствующее внимание было уделено анализу систематических и случайных погрешностей (неопределенностей по новой терминологии) результатов измерений. При проведении теоретических исследований автор провел математическое моделирование исследовавшихся им процессов с использованием современного математического аппарата механики сплошной среды и методов численного решения нелинейных задач гидромеханики и теплопереноса вязких (в том числе неньютоновских) жидкостей. При выборе математических моделей А.В. Минаков использовал современные представления о процессах течения в мини- и микроканалах, а также о свойствах наножидкостей. Все выводы и заключения, сформулированные в диссертации А.В. Минакова соответствуют современным представлениям о физике процессов переноса массы, импульса и энергии в наножидкостях, а также при течении вязких жидкостей в микро- и миниканалах.

Научная новизна полученных результатов.

Критерию новизны в полной мере соответствует большая группа результатов, полученных А.В. Минаковым при выполнении своего диссертационного исследования. Новизна основных результатов и защищаемых положений подтверждается публикациями большого (существенно превышающего среднее число статей при защите докторских диссертаций) числа статей в высокорейтинговых международных научных периодических изданиях и в журналах РАН. По мнению оппонента, наиболее значимыми из них являются следующие.

1. Математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов в наножидкостях, учитывающая влияние наночастиц на режимы течения и коэффициенты переноса.

2. Экспериментальные данные по основным коэффициентам переноса в большой группе разных по свойствам несущей среды наножидкостей.

3. Механизмы повышения коэффициента извлечения нефти при ее вытеснении наножидкостью из микропористой среды.

4. Установлены по результатам экспериментальных исследований зависимости коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном течении большой группы достаточно типичных в настоящее время наножидкостей от концентрации, размеров и материала частиц.

5. Экспериментально определены условия ламинарно-турбулентного перехода при течении наножидкостей в круглой трубе.

6. По результатам экспериментальных исследований установлены закономерности кризиса кипения наножидкостей. Получены зависимости

критического теплового потока от концентрации, размера, материала частиц, размеров нагревателя и длительности процесса, а также добавки поверхностных веществ.

7. По результатам математического моделирования с использованием разработанной автором методики выделены основные режимы течения и факторы, оказывающие значимое влияние на эффективность перемешивания двух жидкостей в микромиксерах.

8. В результате математического моделирования процессов двухфазных и двухжидкостных течений в микроканалах выделены четыре режима течения двух жидкостей на примере «нефть – вода»: параллельный, капельный, снарядный, хаотичный.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных А.В. Минаковым результатов, основных защищаемых положений и выводов обусловлена, в первую очередь, логическими связями проблемы, решаемой в диссертации, цели и задач исследований, разработанными или выбранными автором методиками исследования (экспериментальными и теоретическими) и полученными результатами. Математические модели, разработанные и используемые автором диссертации, являются следствием фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии, и описания с использованием экспериментальных данных свойств наножидкостей. А.В. Минаков использовал хорошо апробированные при решении сложных нелинейных задач гидромеханики и теплофизики численные методы. Все разработанные автором методики численного моделирования прошли верификацию на большой представительной группе экспериментальных данных. Достоверность результатов экспериментальных исследований обоснована использованием для регистрации основных характеристик исследовавшихся процессов современного сертифицированного оборудования, а также анализом систематических и случайных погрешностей (неопределенностей по новой терминологии) результатов измерений.

Практическая значимость

По мнению оппонента, диссертационное исследование А.В. Минакова при всей его фундаментальности имеет и очевидное практическое значение. В настоящее время во многих производственных, конструкторских и проектных организациях и учреждениях предпринимаются попытки использования в различных технологических процессах наножидкостей. При этом необходимыми являются сведения о коэффициентах теплопроводности и вязкости таких суспензий. Но достоверных данных по таким коэффициентам даже для простейших наножидкостей очень мало. Более того, многие такие данные являются если и непротиворечивыми, то, по крайней мере, несогласующимися. Полученные в диссертации А.В. Минакова характеристики нескольких десятков наножидкостей являются очень хорошей базой для проведения опытно-конструкторских работ по созданию технологий, технических систем и устройств, в которых используются наножидкости. Важно, что полученные автором

диссертации данные соответствуют достаточно широким диапазонам изменения размеров частиц, их конфигураций, материалов частиц и свойств несущей среды.

Замечания по диссертации

1. Не обосновано, по мнению оппонента, использование термина «многофазные потоки». Автор рассматривает не смеси жидкостей с включениями их паров и закристаллизованных фрагментов. Наножидкости можно считать гетерогенными средами потому, что частицы и несущая жидкость не являются двумя разными состояниями одного вещества.

2. Одним из основных варьируемых в диссертации параметров при исследованиях процессов течения и смешения жидкостей является число Рейнольдса. При его определении в качестве характерного размера используется гидравлический диаметр канала, который в дальнейшем также используется при определении числа Re неньютоновских жидкостей. Но использование этого параметра обосновано при вычислении числа Re для течений в каналах с неизменяющимися по продольной координате свойствами среды. Во всех же рассматриваемых в диссертации вариантах задач вследствие изменения концентрации компонент по длине канала изменяется и вязкость. Выбор числа Рейнольдса в качестве характерного размера области анализа не обоснован. Большинство приведенных в первых двух главах диссертации иллюстраций показывают, что с ростом продольной координаты изменяются существенно все характеристики течения.

3. При изучении неизотермических течений в микроканалах автор ограничился рассмотрением лишь вынужденной конвекции, между тем при очень малых числах Рейнольдса влияние свободной конвекции могло бы быть существенным.

4. При моделировании течений наножидкости в рамках двухкомпонентного подхода для описания коэффициента диффузии наночастиц использовалось уравнение классической теории Энштейна-Стокса. При этом в третьей и четвертых главах диссертации автором было показано, что вязкость и теплопроводность наножидкостей не описываются классическими теориями.

5. В работе систематически экспериментально изучены коэффициенты переноса наножидкостей в широких диапазонах концентрации и среднего размера наночастиц различного состава. Однако, в тексте диссертации ничего не сказано о форме наночастиц. Возможно, что форма наночастиц является еще одним фактором от которого, зависят свойства наножидкостей.

6. При изучении механизмов нефтewытеснения во второй главе и кризиса кипения в шестой главе экспериментально показано, что наножидкости могут значительно изменять смачиваемость поверхностей. При этом сами наночастицы могут быть как гидрофобные, так и гидрофильные. В тексте диссертации ничего не сказано о смачиваемости самих наночастиц базовыми флюидами.

Сделанные замечания не снижают высокую в целом оценку значимости для науки и практики результатов, защищаемых положений и выводов, приведенных в диссертации А.В. Минакова.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации А.В. Минакова можно сделать обоснованное заключение, что в рецензируемой диссертации представлены новые крупные достижения в развитии двух научных направлений «Наножидкости» и «Течение вязких жидкостей в микроканалах».

Заключение о соответствии диссертации критериям.

Диссертация А.В. Минакова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований, соответствующие критерию новизны.

Диссертация А.В. Минакова соответствует специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи диссертации, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации А.В. Минакова «Изучение многофазных потоков в микроканалах и теплофизических характеристик наножидкостей» можно сделать обоснованное заключение о том, что она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Андрей Викторович Минаков, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)
Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО НИ ТПУ

03.12.2021



Кузнецов Гений Владимирович

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:
Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета



Кулинич Екатерина Александровна

Почтовый адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822)60-62-48

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»