

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Диссертация А.В.Минакова охватывает комплекс научных проблем в области гидродинамики одно- и двухфазных потоков, развивающихся в микроканалах, а также задачи по изучению теплофизических характеристик наножидкостей, включая выход на приложения с микроканальной структурой среды, через которую протекает наножидкость. Основной объем исследований, результаты которых представлены в диссертации, выполнен с применением современных методов численного моделирования трехмерных ламинарных и турбулентных течений и развитых экспериментальных методик по определению реологических свойств наножидкостей и коэффициентов теплопереноса.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Материал диссертации изложен на 368 страницах, включающих 260 рисунков и 34 таблицы. Список цитируемой литературы включает 556 наименований.

Несомненная актуальность выполненного А.В.Минаковым исследования обусловлена многими факторами. Это и фундаментальное значение углубленного понимания многообразных нелинейных гидродинамических процессов, присущих течениям жидкостей в микроканальных устройствах для смешения или диспергирования жидкостей, и двухфазным газожидкостным течениям в микроканалах. Это и необходимость постоянного развития методик все более полного, предсказательного численного моделирования одно- и двухфазных течений в микроканалах, включая и непосредственный выход на совершенствование микроканальных устройств. Это и острая потребность в получении систематических, надежных данных по реологическим и теплофизическим характеристикам наножидкостей, разнообразие которых очень велико, а области применения расширяются. В последние десятилетия наблюдается резкий рост числа публикаций по каждому из отмеченных выше направлений.

Основные результаты, полученные соискателем по теме диссертации, заключаются в следующем.

1. Разработана и апробирована вычислительная методика для предсказательного моделирования гидродинамики одно- и двухфазных потоков в микроканалах. В случае двухфазных потоков осуществлен последовательный учет межфазного натяжения и динамического поведения контактного угла. Развитость примененных автором известных и доработанных математических моделей, в

сочетании с высокой квалификацией автора в области разработки и применения современных методов вычислительной гидродинамики, обусловили хорошую согласованность результатов валидационных расчетов с данными надежных экспериментов, как по локальным, так и по интегральным характеристикам течения и теплопереноса.

2. Посредством численного моделирования получен большой объем новых данных об эффективности смещения и вихревой структуре однофазного потока при различных режимах течения в микромиксерах наиболее распространенных конфигураций, включая существенно пространственные. Путем вариантных расчетов и анализа полученных данных предложены решения по геометрической оптимизации микромиксеров и управлению режимами течения.

3. В результате обстоятельного расчетно-экспериментального исследования взаимодействующих течений воды и нефти в «каноническом» микроканале Y-типа выделено четыре различных режима течения: параллельный, капельный, снарядный и хаотический.

4. Впервые исследованы и установлены механизмы повышения коэффициента извлечения нефти (КИН) при ее вытеснении наножидкостью из микропористой породы и показано, что применение наножидкостей может обеспечить значительно повышение КИН при заводнении пласта. Установлено также, что увеличение нефтеотдачи при закачке наножидкости в насыщенную нефтью микропористую среду в основном обусловлено улучшением смачиваемости.

5. Для нескольких десятков наножидкостей изучено влияние концентрации, размера и материала наночастиц, свойств базовой жидкости, температуры и добавления стабилизирующих веществ на коэффициенты вязкости и теплопроводности, а также на возможное проявление неньютоновских свойств среды. Установлено, что вязкость наножидкостей существенно превышает вязкость крупнодисперсных суспензий и увеличивается с уменьшением размера наночастиц. Показано, что коэффициент теплопроводности наножидкостей, как правило (за исключением случая очень малого размера частиц), превышает значения, предсказываемые теорией Максвелла, и растет с увеличением размера частиц. Впервые экспериментально показано, что значение коэффициента вязкости зависит от материала наночастиц, а коэффициент теплопроводности возрастает пропорционально плотности материала наночастиц.

6. Получен обширный объем новых экспериментальных данных о теплообмене при ламинарном и турбулентном течении наножидкости в обогреваемой круглой трубе, а также о влиянии концентрации и размера наночастиц на положение области ламинарно-турбулентного перехода на оси значений числа Рейнольдса. Показано, что добавление наночастиц в теплоноситель может обеспечить повышение среднего значения коэффициента теплоотдачи на 35–40 %. Впервые обнаружено, что при фиксированном массовом расходе коэффициент теплоотдачи при ламинарном и турбулентном течении наножидкости

возрастает с увеличением размера наночастиц, а при фиксированном значении числа Рейнольдса может иметь место экстремум; это обуславливается зависимостью коэффициентов переноса наножидкости от концентрации, размера и материала наночастиц. Установлено также, что положение области ламинарно-турбулентного перехода в течениях наножидкостей сдвигается в сторону меньших значений числа Рейнольдса, по сравнению со случаем чистой базовой жидкости, и этот сдвиг все более существенен с увеличением концентрации и уменьшением размера наночастиц.

7. Разработана и апробирована математическая модель для описания гидродинамики и теплообмена наножидкостей с учетом специфики их реологии и эффектов термодиффузии. Показано, что при использовании экспериментально определенных коэффициентов переноса относительно простая гомогенная модель может предсказывать закономерности, достаточно хорошо согласующиеся с данными экспериментов по вынужденной конвекции наножидкостей в прямых круглых трубах. Установлено также, что процесс термодиффузии очень слабо влияет на характеристики теплообмена при течении наножидкостей, в отличие от реологии среды.

Степень достоверности полученных в диссертации результатов представляется высокой по следующим обстоятельствам. При проведении измерений использовались апробированные экспериментальные методы определения теплофизических свойств жидкостей. В работе использованы вычислительные методики, которые также достаточно апробированы. Применимость этих методов и лежащих в их основе математических моделей для условий, при которых развиваются изучаемые процессы, проанализирована и обоснована в диссертации, а также в предшествующих публикациях соискателя и его соавторов, включая обстоятельное тестирование разработанных моделей и методик на большом количестве тестовых задач и сопоставление полученных результатов с известными аналитическими решениями (в предельных случаях), с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов.

Полученные соискателем научные результаты имеют и практическую значимость. Достаточно отметить следующие: сформулированные автором рекомендации по управлению эффективностью перемешивания жидкостей в микромиксерах и микрореакторах наиболее распространенных конфигураций; базу данных по коэффициентам вязкости и теплопроводности многих конкретных наножидкостей и построенные корреляции, определяющие зависимость свойств от концентрации частиц среднего размера; результаты исследования процесса вытеснения нефти посредством подачи наножидкости, которые могут быть непосредственно адаптированы к технологиям интенсификации нефтеотдачи при заводнении пласта на месторождениях.

Диссертация хорошо структурирована, с научным стилем изложения материала. Содержание работы отражает не только весьма и весьма значительный объем, но и большую глубину проведенного исследования. Все разделы диссертации логически связаны между собой и в совокупности представляют цельное завершённое научное исследование.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. В диссертации нет ни одного примера на исследование сеточной чувствительности получаемых численных решений (даются лишь ссылки на соответствующие работы соискателя с соавторами). Вместе с тем, включение таких примеров было бы весьма желательным, например, при изложении материала параграфа 1.2 «Тестирование численной методики», в котором освещается «тестовое» сопоставление результатов расчетов однофазного стационарного ламинарного течения в Т-образном микроканале с экспериментальными данными, полученными А.А.Ягодициной и А.В.Бильским. Демонстрация факта сеточной сходимости численного решения в этом случае дала бы основание «перевернуть» восприятие (возможно, и подачу материала), трактуя расчетные данные, полученные по уравнениям Навье-Стокса, как своего рода «эталонные», позволяющие оценить влияние неопределенностей, присущих эксперименту (последний был проведен в условиях, при которых пригодность уравнений Навье-Стокса не вызывает сомнения, что подчеркивается и соискателем).

2. Некоторый дискомфорт вызывает употребление автором термина «безвихревое течение» применительно к первичному ламинарному режиму течения в Т-образном канале, реализующемуся при малых числах Рейнольдса (стр.51). Данное течение является, конечно же, вихревым, поскольку ротор поля скорости отличен от нуля. Из контекста ясно, однако, что здесь речь идет об отсутствии в этом режиме сколь-нибудь значимой продольной составляющей завихренности, величина которой характеризует интенсивность «организованных» вихревых структур, обычно связываемых с поперечным (вторичным) течением.

3. Ставя задачу по исследованию влияния выступов на смещение в Т-образном микроканале (п.1.7.2), автор пишет «На практике наличие шероховатости на стенках каналов, как правило, сказывается на интегральных характеристиках макротечений. Для микротечений наличие шероховатостей может существенно изменить структуру потока». Здесь следует отметить, что в случае «макротечений» также нередко возникают задачи с элементами макрошероховатости, установленными на обтекаемых стенках (например, в целях интенсификации теплообмена) и сильно влияющими не только на интегральные, но и на локальные характеристики течения. В этом случае возникают ситуации, вполне аналогичные с рассматриваемыми в диссертации задачами о влиянии относительно высоких выступов в микроканале, разве что при существенно меньших значениях числа

Рейнольдса. И вообще, противопоставление макро- и микротечений иногда излишне отдает практическими/технологическими применениями.

4. Неясно, в какой постановке (в двумерной или в трехмерной) решалась задача о течении воды и масла в Т-образном микроканале, результаты которой представлены в п.2.3.1 (в названии пункта, судя по всему, имеется опечатка, т.к. в экспериментальном прототипе [44] канал был прямоугольного сечения). Указанный размер сетки позволяет предположить, что использовалась двумерная постановка. Это требует специального пояснения, особенно если иметь в виду относительную малость высоты канала.

5. К сожалению, в описании экспериментальной установки, использованной для исследования теплообмена при вынужденной конвекции наножидкости (параграф 5.1), отсутствуют сведения об организации входа жидкости в рабочий участок. Вместе с тем, такие сведения весьма важны для адекватной трактовки представляемых результатов измерений.

6. Хорошо известно, что смена режима течения вязкой жидкости в круглой трубе по числу Рейнольдса существенно зависит от уровня входных возмущений и условий входа (например, в опытах Рейнольдса переход наблюдался при числе Рейнольдса около 13000). Вместе с тем широко используется понятие «нижнего критического» числа Рейнольдса, которое отвечает смене режима при высоком уровне возмущений, идущих из областей вверх потоку, и составляет около 2000. Судя по-всему, именно этот случай автор имеет в виду, когда исследует влияние добавленных в жидкость наночастиц (разных размеров и с разной концентрацией) на ламинарно-турбулентный переход. Было бы весьма желательно это специально подчеркнуть.

7. Имеется ряд замечаний оформительской направленности:

- отсутствие списка обозначений затрудняет чтение диссертации;
- отдельные понятия вводятся/используются, но четко не определяются, например «суммарная скорость воды и нефти» и др.
- в обоих выражениях, определяющих эффективность смешения M (на стр. 34 и на стр. 50), присутствуют опечатки; в записи уравнения неразрывности на стр.99 также имеется опечатка.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя. Представленная А.В.Минаковым диссертация является цельной научно-исследовательской работой, вносящий крупный вклад в микрофлюидику и в фундаментальные знания о процессах переноса в наножидкостях.

Тема диссертации и характер выполненных исследований соответствует специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы.

Все основные результаты диссертации опубликованы, включая 48 статей в научных журналах, входящих в Перечень ВАК, из них 40 статей – в изданиях,

индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

Считаю, что диссертация Минакова Андрея Викторовича является завершенной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, и другим критериям, установленным в разделе II этого Положения. Автор диссертации Минаков Андрей Викторович заслуживает присуждения ему 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), профессор,
профессор Высшей Школы прикладной математики и вычислительной физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ», главный научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории гидроаэродинамики Физико-механического института СПбПУ,

Смирнов Евгений Михайлович

03.12.2021

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru

