

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию Дьяковой Ольги Алексеевны
«Течения неньютоновской жидкости в каналах различной формы с условиями
скольжение–прилипание на твердой стенке»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертации

Существует много жидких сред, чье поведение не может быть описано уравнениями Навье-Стокса при любых режимах течения. В последнее время наблюдается возросший интерес к исследованию реологически сложных жидкостей. Как правило течение жидкости происходит в областях со сложной геометрией, в каналах со многими ответвлениями. Проскальзывание жидкости на твердой границе наблюдается как для ньютоновских так и для неньютоновских жидкостей. Оно наиболее присуще неньютоновским средам. Условие скольжения существенно усложняет исследование динамики течения. Литература содержит много противоречивых точек зрения как экспериментальных так и теоретических и следовательно имеется много нерешенных вопросов.

Модели сред, в которых напряжения нелинейно зависят от скоростей деформации, находят практическое применение во многих областях промышленности, таких как химическая, нефтегазовая, металлургическая и многие другие. Проскальзывание может влиять на конвективный теплообмен на твердых границах. Скольжение предлагается рассматривать как механизм уменьшения вязкого сопротивления. Кроме того, проскальзывание может спровоцировать турбулентность, неустойчивость и следовательно является источником практических и теоретических трудностей.

Актуальность диссертационной работы О. А. Дьяковой определяется практической значимостью исследований течений реологически сложных жидкостей в каналах различной формы с условиями прилипания /скольжения на твердых

границах и необходимостью создания средств математического моделирования для изучения соответствующих течений.

Общая характеристика работы.

Диссертация О. А. Дьяковой состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Текст рукописи включает 108 страниц, включая 2 таблицы и 52 рисунка). Список литературы включает 119 наименований источников.

Во **введении** автор обосновывает актуальность темы исследования, формулирует цель и задачи, научную новизну, обосновывает практическую значимость выполненных исследований. В этом разделе диссертации также приведены выносимые на защиту положения, представлено обоснование достоверности полученных результатов, сведения об их апробации и публикациях.

В **первой главе** представлен обзор литературы, в которой приведены результаты экспериментальных и численных исследований течений как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей с учетом явления проскальзывания вдоль твердых стенок.

Во **второй главе** рассмотрены методы дискретизации системы уравнений, описывающих рассматриваемые течения (метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных (контрольных) объемов). Подробно описан метод конечных (контрольных) объемов и особенности его реализации на ЭВМ. Достаточно большое внимание уделено реализации граничных условий на участках входа / выхода и на твердых непроницаемых границах. Как правило граничные условия аппроксимируются односторонними разностями с использованием фиктивных сеточных точек (псевдоузлов).

Третья глава посвящена численному моделированию течения ньютоновской и неньютоновской несжимаемой жидкости в L-образном канале при заданном расходе на входной границе. Математическая постановка задачи включает уравнения движения и неразрывности, записанные в безразмерных переменных. Эффективная вязкость определяется степенным законом Оствальда-де Виля. Жидкость подается через входное сечение где задан профиль скорости установившегося течения степенной несжимаемой жидкости в плоском бесконечном канале с заданным

постоянным расходом и соответствующими условиями на твердой стенке. В выходном сечении задаются «мягкие» граничные условия. На твердых стенках выполняются условия прилипания или условия проскальзывания Навье. Представлены результаты проверки сходимости разработанной численной методики, проведено сравнение тестовых расчетов с экспериментальными и численными данными других авторов. При моделировании течения вязкой жидкости с условием прилипания на твердой стенке. установлено, что в канале реализуется течение с образованием циркуляционных зон, количество которых определяется основными параметрами задачи; в окрестностях входной и выходной границ формируется плоскопараллельное течение с параболическим профилем скорости, характерным для установившегося течения ньютоновской жидкости в плоском бесконечном канале. Если на твердой стенке реализуется условие Навье то при увеличении коэффициента проскальзывания существенно изменяются размеры зон рециркуляционного течения. Построены зависимости размера рециркуляционных зон как от числа Рейнольдса, так и от величины коэффициента проскальзывания.

Последний параграф третьей главы посвящен изучению особенностей течения степенной несжимаемой жидкости в L-образном канале с учетом условия прилипания на твердой стенке. Подробно рассмотрено влияния реологических свойств степенной жидкости на картину течения в L – образном канале. Показало, что увеличение показателя нелинейности приводит к изменению размеров циркуляционных зон, образовавшихся в потоке.

Четвертая глава посвящена стационарным течениям ньютоновской и степенной жидкостей в плоском T-образном канале при заданных значениях давления на границах втекания/вытекания с учетом прилипания или проскальзывания жидкости на твердых стенках. Проведено тестирование алгоритма путем сравнения с экспериментальными и расчетными данными имеющимися в литературе. Созданный Дьяковой О. А. программный комплекс использован при проведении большого объема параметрических расчетов. Подробно рассмотрены четыре характерных режима течения для псевдопластичной, ньютоновской и дилатантной жидкостей с учетом условия прилипания/проскальзывания на твердой стенке при различных значениях давления на

границах втекания / вытекания. Проанализированы условия формирования циркуляционных зон и изменение их размеров в каждом режиме течения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Общая методология и методика исследования.

По своему содержанию и основным результатам диссертация О. А. Дьяковой в наибольшей степени соответствует научному направлению «Вычислительная гидродинамика». Автор привел результаты математического моделирования ламинарных течения вязкой несжимаемой жидкости с использованием модели с вязкостью нелинейно зависящей от компонент тензора скоростей деформации и двух типов краевых условий на твердых стенках. Такой выбор модели соответствует тенденциям современного представления о проблемах, касающихся обобщений жидкостей Навье-Стокса, равно как и других нелинейных жидкостей, которые требуют тщательного исследования с применением методов «вычислительной гидродинамики».

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием математической модели, основанной на фундаментальных законах сохранения, тестированием и верификацией расчётного алгоритма на ряде задач путём сравнения полученных результатов с аналитическими решениями, теоретическими и экспериментальными данными из других литературных источников.

Научная новизна полученных результатов.

О. А. Дьякова получила результаты, соответствующих критерию новизны, что подтверждается публикациями статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, трудах международных и внутренних конференций и других изданиях. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, являются следующие:

1. Математические постановки задач о течениях неньютоновской несжимаемой жидкости в L- и T-образных каналах с учетом условий проскальзывания на твердой стенке при заданных перепадах давления между границами втекания вытекания и разработан оригинальный пакет программ .

2. Исследовано влияние условий проскальзывания Навье на характер течения в плоских L- и T- образных каналах неньютоновской жидкости с реологическим законом Оствальда-де Виля.

3. По результатам численных исследований с использованием разработанной автором диссертации модели установлено влияние реологических свойств неньютоновской степенной жидкости на формирование режимов течения в плоском T-образном канале.

4. Выделены зоны появления и размеры возвратных течений степенной жидкости в L- и T-образных каналах. Показана зависимость размеров этих зон обусловленная параметрами определяющими степень неньютоновости и параметрами определяющими проскальзывание жидкости на твердой стенке.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертации заключается в создании средств математического моделирования течений неньютоновских жидкостей в каналах различной формы с условиями скольжение–прилипание на твердых границах. С помощью созданных средств математического моделирования были получены новые знания о движении степенной жидкости в L- и T-образных каналах с учетом двух моделей взаимодействия жидкости с твердой стенкой при различных условиях на границах втекания/вытекания.

Результаты проведенных исследований и разработанный программный комплекс могут быть использованы для прогнозирования режимов течения реологически сложных сред в каналах, что имеет практическую значимость при проектировании и конструировании оборудования в технологиях различного назначения.

Полученные автором диссертации при обобщении результатов выполненных им численных исследований для зависимостей структуры течения от перепада давления в каналах и от параметров, определяющих среду, могут быть использованы при разработке новых реометров и повышении эффективности использующихся микромиксеров и микрореакторов для химической и фармацевтической промышленности.

Замечания по диссертационной работе.

1. В работе не приведены данные о величине коэффициента проскальзывания в различных ситуациях, которые могут встречаться в приложениях. Граничное условие проскальзывания определяется величиной напряжения на стенке. Ольга Алексеевна определяет напряжение на стенке с использованием фиктивных точек. Как известно, порядок аппроксимации такого подхода первый. Если коэффициент в условии Навье слишком маленький, то как скажется первый порядок аппроксимации граничного условия на картину течения. Подобный вопрос возникает и при расчете эффективной вязкости в угловых точках – везде используется линейная интерполяция.

2. В таблице 3.1 приведена зависимость относительной ошибки от шага сетки для тестового расчета. Вычисленное распределение касательной компоненты вектора скорости в выходном сечении L-образного канала сравнивалось с аналитическим решением задачи о полностью развитом течении ньютоновской жидкости в плоском бесконечном канале с заданным постоянным расходом (видимо автор имела в виду нормальную к выходному сечению компоненту). Чем можно объяснить, что при одних и тех же размерах сетки относительная ошибка в расчетах с условием прилипания в 10 раз больше аналогичной ошибки при расчетах с условием проскальзывания Навье?

3. Из текста диссертации не совсем понятно, как решается проблема зависимости поля давления от произвольной константы в случае задания граничных условий для вектора скорости. При вычислении функции тока возникает аналогичная проблема в случае течения в T-образном канале с заданными перепадами давления. Произвольно можно задавать функцию тока только на одной границе. Две другие константы должны быть связаны с условием однозначности восстановления давления.

4. Казалось бы, для полноты исследования течения в L-образном канале, надо было бы привести расчеты степенной жидкости с условием проскальзывания. Автор исследует влияние условий проскальзывания только для случая ньютоновской жидкости.

5. Имеется несколько неточностей: так на стр. 20 в уравнении (2.15) имеется неопределенная величина “В”; на стр. 80 написано «... объемный расход

определяется поверхностным интегралом от касательной компоненты вектора скорости»; на стр. 89 вместо ссылки на рис. 8 должна быть ссылка на рис. 4.12.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация О. А. Дьяковой «Течения неньютоновской жидкости в каналах различной формы с условиями скольжение–прилипание на твердой стенке», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности, имеет теоретический характер и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые результаты теории течений неньютоновской жидкости через каналы сложной геометрии с граничными условиями проскальзывания/прилипания и заданными перепадами давления между границами втекания и вытекания.

В работе приведены результаты теоретического и численного исследования течений неньютоновских жидкостей подчиняющихся степенному реологическому закону широко применяемых в разнообразных технологических процессах, при этом для описания таких течений построены и проанализированы численные алгоритмы определяющих уравнений. Используемые программы зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ. К достоинствам работы следует отнести получение характеристик определяющих характер течения, размеры рециркуляционных зон. Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в печатных работах, три из которых входят в перечень ВАК. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости диссертационная работа Дьяковой Ольги Алексеевны «Течения неньютоновской жидкости в каналах различной формы с условиями скольжение–прилипание на твердой стенке», удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук согласно п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в

текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник лаборатории фильтрации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), старший научный сотрудник (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



/ Мошкин Николай Павлович /

«05» сентября 2019 г.

Телефон: +7(383) 333-33-12,

e-mail: nikolay.moshkin@gmail.com

Подпись Н.П. Мошкина удостоверяю:

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15

Телефон: +7(383) 333-21-66;

e-mail: info@hydro.nsc.ru

www-страница: <http://www.hydro.nsc.ru>



И. В. Любашевская