

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», доктор физико-математических наук, профессор



М.Ю. Альес

«23»

2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 диссертационной работы.** В современном мире существует широкое разнообразие областей науки и техники, тесно связанных с течением различных сред: полимеры (производство и применение), геофизика, физиология (течение крови), производство пищевых продуктов, строительные материалы (бетон, раствор) – основная часть которых характеризуется сложной зависимостью вязкости от параметров течения, что относит их к классу неньютоновских. Так, например, изучение реологических особенностей при производстве полимеров, заливке строительных смесей позволяет повысить качество конечной продукции, увеличить эффективность технологических процессов; исследования в области гематологии позволяют изучать различные болезни и разрабатывать методики их лечения (течения в зоне формирования тромбов, перенос лекарственных средств). Рассматриваемые задачи характеризуются течением неньютоновских сред при взаимодействии с твердыми поверхностями, в результате чего формируются особые области (циркуляционные зоны, локальные перепады давления), учет которых необходим при разработке технологических процессов и создании различных технических устройств. Для теоретического изучения данных особенностей необходимо разрабатывать модели, позволяющие адекватно оценивать как вязкость вещества при различных условиях течения, так и разнообразные поверхностные эффекты. Так, теоретические исследования гидродинамических особенностей течений обеспечивают возможность как выявлять проблемные области при течении сред в технологических узлах, так и находить полезное применение различным эффектам, что, в конечном итоге, позволяет разрабатывать эффективные устройства различного назначения. Таким образом, диссертационная работа Дьяковой О.А. «Течения неньютоновской жидкости в каналах различной формы с условиями

скольжение–прилипание на твердой стенке», посвященная теоретическому исследованию особенностей течений, формирующихся в конструкционных элементах, является актуальной.

**Характеристика содержания диссертационной работы.** Цель диссертационной работы заключается в исследовании особенностей течений неньютоновских жидкостей, формирующихся при взаимодействии потока с поверхностями, в предположении проскальзывания текучей среды вблизи твердых границ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, изложенных на 108 страницах машинописного текста, включая 52 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 119 наименований.

**Во введении** показана актуальность, поставлены цель и задачи исследования, приведены методы исследований, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта новизна исследуемой тематики, отмечена теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации работы и публикациях автора.

**В первой главе** представлен обзор подходов к описанию особенностей течения вязкой среды вблизи твердой поверхности. Рассмотрены процессы в различных технических системах, определяющее воздействие на режимы работы которых оказывают поверхностные эффекты. Так, на примере процесса экструдирования полиэтилена показано влияние величины касательного напряжения в материале вблизи твердой поверхности экструдера на качество получаемого изделия, что свидетельствует о необходимости проведения оценок скорости экструзии при разработке технологических процессов. Приведены различные модели для описания взаимодействия среды с твердой поверхностью. Представлен обзор реологических моделей, на основании которого для дальнейшего исследования выбран закон Оствальда-де Виля.

**Вторая глава** диссертации посвящена описанию используемой математической модели и методики расчета. Модель основана на уравнениях количества движения и неразрывности. Модель неньютоновской среды представлена законом Оствальда-де Виля. Приведены используемые в работе граничные условия.

Представлен обзор методов решения, рассмотрены численные методы – метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод конечных объемов. Представленная математическая модель решается численно, исходные дифференциальные уравнения интегрируются в соответствии с подходом метода конечных объемов, при этом связь скорости и давления обеспечивается использованием алгоритма SIMPLE. Показана методика дискретизации исходных дифференциальных уравнений. Значения искомой функции на границах конечных объемов аппроксимируются экспоненциальной схемой. Расчетная сетка смещенная. Приведена методика интегрирования уравнений вдоль границ. Описаны процедуры дискретизации источниковых слагаемых, определения эффективной вязкости как в ядре потока, так и на твердых стенках. Описана методика построения функций тока для визуализации полученных результатов расчетов.

**Третья глава** посвящена описанию исследования течения неньютоновской жидкости в L-образном канале. Приведены примеры технических устройств, элементом которых является

канал L-образной формы. Проведен обзор работ, ориентированных на изучение течений в рассматриваемых конструкционных элементах, и обозначены основные особенности течения вязкой жидкости, характерные для данной конфигурации. Сформулирована постановка задачи, приведены уравнения математической модели, используемые граничные условия. Проведено обезразмеривание исходных уравнений. На основании аналитического решения уравнений, описывающих течение вязкой жидкости в прямом канале, получены распределения скорости по ширине канала. Проведена оценка сеточной сходимости. Верификация разработанной численной методики проводится на основании сравнения расчетного распределения продольной компоненты скорости потока вдоль поперечного сечения канала с аналитическим, а также по сравнению расчетных результатов с данными, полученными в программном пакете OpenFOAM.

Проведено параметрическое исследование течения вязкой жидкости в канале L-образной формы. Рассматривались ньютоновская и неньютоновская (как псевдопластическая, так и дилатантная) жидкости, условие прилипания и проскальзывания на твердой стенке; варьировались число Рейнольдса и отношение поперечных размеров входного и выходного участков канала. По расчетным данным построены линии тока, распределения гидродинамических параметров (перепад давления, компоненты скорости, вязкость) в канале. В результате проведенного исследования получены параметрические зависимости свойств течения в области искривления канала (количество, размеры и форма циркуляционных зон) в зависимости от числа Рейнольдса, типа граничного условия на твердой стенке, реологии жидкости, геометрических особенностей канала. Следует отметить наблюдаемые существенные отличия в структуре течения, выявленные в результате проведенных расчетов при различных коэффициентах проскальзывания в модели граничного условия и показателя нелинейности в модели вязкости, что свидетельствует о необходимости учета данных особенностей при теоретическом описании параметров течения в различных каналах.

**Четвертая глава** диссертации посвящена изучению течения неньютоновской жидкости в T-образном канале. Проведен подробный обзор исследований течений в каналах T-образной формы. Представлена сформулированная математическая модель, проведено ее обезразмеривание. Выполнена оценка сеточной сходимости, верификация расчетной методики проведена на основании сравнения расчетного профиля скорости по поперечному сечению канала с аналитическим решением, а также по сравнению результатов расчета с известными экспериментальными и численными данными. В ходе проведенного исследования варьировались давления на трех свободных границах узла, рассматривались различные граничные условия и реология среды. В результате выделены четыре режима течения в зависимости от соотношения давлений на границах. Построены линии тока, поля компонентов скорости, вязкости, перепада давления в области канала для всех режимов. Проведен параметрический анализ особенностей течения в зависимости от коэффициента проскальзывания в модели граничного условия и показателя нелинейности в модели вязкости.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Среди полученных в диссертационной работе **новых** результатов следует выделить следующие:

- Сформулирована математическая модель течения неньютоновской несжимаемой жидкости в каналах L и T-образной формы с условиями прилипания и проскальзывания на твердых поверхностях для расчета гидродинамических параметров течения в узлах различных конструкций.
- На основе математической модели разработаны вычислительный алгоритм и его программная реализация в среде программирования Fortran.
- Проведены параметрические расчеты течения ньютоновской и неньютоновской (как псевдопластической, так и дилатантной) жидкостей в канале L-образной формы. Получены параметрические зависимости свойств течения в области изгиба канала (количество, размеры и форма циркуляционных зон) в зависимости от числа Рейнольдса, типа граничного условия на твердой стенке, реологии жидкости, геометрических особенностей канала. Выявлены отличительные особенности структуры течения в зависимости от коэффициента проскальзывания в модели граничного условия и показателя нелинейности в модели вязкости, что свидетельствует о необходимости учета данных особенностей при теоретическом описании параметров течения в различных каналах.
- Проведены параметрические расчеты течения неньютоновской (как псевдопластической, так и дилатантной) жидкостей в канале T-образной формы. Выявлено четыре режима течения в зависимости от соотношения значений давления на свободных границах канала. Получены зависимости гидродинамических параметров течения в рассматриваемом узле от коэффициента проскальзывания в модели граничного условия и показателя нелинейности в модели вязкости. Показано, что для псевдопластической жидкости число Рейнольдса для всех четырех режимов течения обладает сильной зависимостью от реологии течения (показателя нелинейности в модели вязкости), в то время как для дилатантной жидкости зависимость слабая. Определено, что увеличение коэффициента проскальзывания приводит к возрастанию расхода в канале.

**Достоверность** и обоснованность полученных автором в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием при построении моделей фундаментальных законов сохранения, применением апробированных методик решения, согласованностью результатов модельных расчетов с известными решениями.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований.** Разработанная автором математическая модель, методика расчетов и реализованные в виде программного комплекса алгоритмы могут найти дальнейшее применение в исследованиях, направленных на развитие теории механики жидкости и газа в областях, связанных с изучением особенностей течений неньютоновских жидкостей в условиях, при которых предположение о прилипании на твердой поверхности не позволяет адекватно описать протекающие гидродинамические процессы, а также в различных научных и учебных заведениях:

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН (г. Ижевск) и в других организациях.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут быть использованы как при оптимизации существующих, так и при разработке новых конструктивных элементов, в составе которых имеются каналы с изогнутой геометрией, предназначенные для течения различных вязких сред.

**Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации, в нем последовательно раскрыты поставленные цели и задачи исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Результаты и выводы в автореферате соответствуют поставленным цели и задачам исследования.

Основные научные результаты диссертации **опубликованы** в 23 работах, в числе которых 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 4 работы в научных изданиях, индексируемых в Web of Science и/или Scopus, 14 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научно-практических конференций, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Результаты работы докладывались на 9 конференциях.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. Для нахождения значений гидродинамических параметров на грани конечного объема применена методика, описанная на стр. 19-20 диссертации, в рамках которой рассматривается решение одномерной задачи об установившемся течении. Следует отметить, что в данном случае автор использует уравнение неразрывности ((2.14) в тексте диссертации), решением которого является постоянное значение скорости. В рамках данного предположения получено значение функции на интервале между двумя узлами (выражение (2.17) диссертации). Однако, объектом исследования в диссертационной работе выступает пространственное (двумерное) течение, и предположение о постоянной скорости на интервале между двумя узлами неправомерно.
2. В начале второй главы (стр. 14 диссертации) рассматривается установившееся течение неньютоновской несжимаемой жидкости, и приводятся уравнения математической модели (2.1), (2.2), при этом плотность принимается постоянной величиной и выносится за знак дифференциала. Однако, в дальнейшем при описании методики получения дискретных аналогов дифференциальных уравнений рассматривается общий случай с переменной плотностью (параграф 2.2.1).
3. Алгоритм SIMPLE предполагает решение уравнения Пуассона для давления, при этом его дискретный аналог при использовании на всех границах условия Неймана имеет вырожденную матрицу коэффициентов и бесконечное множество решений.

Для задач с течением в L-образном канале, судя по полям давления (рис. 3.15(а), 3.20(а), 3.26(а) диссертации, рис. 7(а) автореферата), по-видимому, в работе используется подход, в рамках которого поправка давления фиксируется (в ноль) в точке E (рис. 3.2 диссертации, рис. 1 автореферата). В тексте диссертации обсуждение данного вопроса не приведено.

4. На рис. 4.8(б) диссертации, рис. 12 автореферата представлено распределение вязкости неньютоновской жидкости при течении в канале T-образной формы. В рассматриваемом случае реализуется режим течения, при котором жидкость втекает через сечение FE и вытекает через сечение BC, при этом в ответвление AM поток не поступает (что подтверждается данными по расходу, представленными на рис. 4.7(г) диссертации, рис. 11(г) автореферата), позволяя сделать предположение о том, что свойства потоков в каналах FE и BC идентичны. Однако, при детальном рассмотрении, наблюдается отличие в величине вязкости вблизи стенок: в выходном канале (BC) уровень вязкости находится ниже значения 0.5 (фиолетовый цвет), в то время как во входном сечении (FE) уровень вязкости выше 0.5 (синий цвет).
5. В диссертации имеются разделы, которые следовало бы описать более подробно. Например, не описано, каким образом решались уравнения для компонент скорости (2.32), (2.34). Не показано, какие начальные условия (начальное приближение) использовались для решения задач в главе 3 и 4. В главе 3 отсутствует описание входного граничного условия (граница AF). В главе 4 при формулировке граничных условий (4.9) не приведено описание для касательных компонент скорости. Также, при описании раздела с верификацией разработанной расчетной методики (стр. 51 диссертации) при сравнении результатов расчетов с данными, полученными в программном пакете OpenFOAM, не указаны параметры расчета (а именно – использованные в OpenFOAM аппроксимационные схемы). В тексте диссертации (стр. 15) отмечается, что в математической постановке в явном виде не учитывается сила тяжести. Однако, в дальнейшем не представлено детальное описание методики учета гравитационных сил.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация Дьяковой О.А. соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы по областям исследования «Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях», «Ламинарные и турбулентные течения» (п. 1, 3 паспорта специальности).

Диссертационная работа Дьяковой О.А. «Течения неньютоновской жидкости в каналах различной формы с условиями скольжение–прилипание на твердой стенке» является завершенным научным исследованием. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской

Федерации от 24.09.2013 г., № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Дьякова Ольга Алексеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании лаборатории физико-химической механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, протокол № 8 от 21 августа 2019 г.

Главный научный сотрудник  
лаборатории физико-химической механики,  
доктор физико-математических наук  
(05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

Карпов Александр Иванович

Старший научный сотрудник  
лаборатории физико-химической механики,  
кандидат физико-математических наук  
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника)

Шаклеин Артем Андреевич

21.08.2019 г.

Подписи А.И. Карпова и А.А. Шаклеина удостоверяю  
Специалист по кадрам УдмФИЦ УрО РАН



Н.Н. Черных

### Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»

Адрес: 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34.

Тел. (3412) 50-82-00.

Email: [udnc@udman.ru](mailto:udnc@udman.ru).

Сайт: <http://www.udman.ru>.