

ОТЗЫВ

официального оппонента

д.ф.-м.н. Зарипова Динара Ильясовича

на диссертационную работу Галеевой Дилары Рустэмовны

«Моделирование одно- и двухфазных неизотермических течений термовязких жидкостей в каналах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

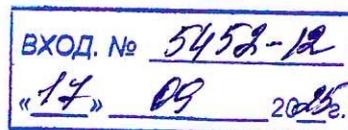
Актуальность работы

Актуальность диссертационной работы Д.Р. Галеевой обусловлена потребностью современных технологий в точном прогнозировании гидродинамики жидкостей с комплексной зависимостью свойств текучих сред от температуры. Такие течения широко распространены в нефтегазовой отрасли (транспорт высоковязких нефтей), химической технологии (полимеризация в микрореакторах) и биомедицине (термочувствительные системы доставки лекарств).

Особую значимость представляет моделирование аномальных термовязких сред, вязкость которых немонотонно зависит от температуры, что ранее оставалось слабо изученным. Разработанные автором математические модели и консервативные численные схемы для одно- и двухфазных течений в плоских каналах и диффузорах позволяют анализировать критические эффекты, такие как образование вязких барьеров, и управлять ими. Это открывает пути к оптимизации энергозатрат и повышению эффективности различных промышленных аппаратов и технологических процессов.

Научная новизна

Научная новизна диссертации заключается в комплексном численном моделировании течений жидкостей с аномальной немонотонной зависимостью вязкости от температуры в конических диффузорах, позволившем выявить и исследовать эффект формирования локализованных вязких барьеров и их влияние на гидродинамическое сопротивление. Разработана оригинальная консервативная численная схема на основе метода контрольного объема для решения уравнения Кана-Хилларда,



обеспечивающая сохранение массы и энергии при моделировании двухфазных систем. Впервые построена и реализована математическая модель совместного течения и теплообмена для системы «капля-термовязкая жидкость» с учётом взаимного температурного влияния фаз и аномальной зависимости вязкости. Установлен новый физический эффект вязкого ускорения капли после прохождения зоны высоковязкого барьера, а также обнаружено явление формирования дополнительного вязкого барьера вокруг холодной капли в горячей жидкости с аномальной вязкостью. Получены новые количественные зависимости гидродинамических характеристик от геометрических и термодинамических параметров течения.

Научная и практическая значимость основных результатов

Научная значимость работы заключается в развитии методов математического моделирования нестационарных течений жидкости с учётом сложных зависимостей теплофизических свойств среды от температуры. Разработанные автором подходы позволяют адекватно описывать поведение термовязких жидкостей с аномальной зависимостью вязкости, что расширяет фундаментальные представления о гидродинамике таких систем. Полученные результаты вносят вклад в теорию тепло- и массопереноса в многокомпонентных средах со взаимным влиянием гидродинамических и тепловых процессов.

Практическая ценность исследования определяется возможностью применения разработанных моделей и алгоритмов для оптимизации технологических процессов в нефтегазовой, химической и пищевой промышленности, где используются жидкости с выраженной зависимостью свойств текучих сред от температуры. Результаты работы могут быть использованы при проектировании теплообменной аппаратуры, систем транспортировки вязких сред и устройств для управления реологическими свойствами жидкостей. Математические модели и вычислительные алгоритмы, представленные в диссертации, позволяют проводить

компьютерный инжиниринг технологических процессов с существенной экономией материальных и временных затрат.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов соответствует общепринятым в рамках научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается применением фундаментальных законов механики сплошных сред и современных численных методов. Верификация проведена сравнением с аналитическими решениями (течение Пуазейля) и экспериментальными данными по деформации капель. Тесты на сходимость при сгущении сеток подтвердили устойчивость решений. Количественное соответствие известным теоретическим и экспериментальным работам, а также внутренняя согласованность результатов свидетельствуют о достоверности выводов.

Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 125 страниц, список литературы состоит из 135 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования. Приведены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность и обоснованность результатов, представлена краткая структура работы.

В первой главе выполнен литературный обзор теоретических, численных и экспериментальных работ по исследованию жидкостей с температурной зависимостью вязкости и методов моделировании многофазных систем. Выполненный обзор формирует представление о текущем состоянии исследований в рассматриваемой области. Выявлены недостаточно изученные аспекты, связанные с влиянием аномальной вязкости на гидродинамику.

Во второй главе исследуется течение термовязкой жидкости в коническом диффузоре. Построена математическая модель осесимметричного

течения с учётом трёх видов зависимостей вязкости от температуры: постоянной, монотонной и аномальной. Численная реализация на основе метода контрольных объёмов с использованием модифицированного алгоритма SIMLE позволила учесть переменность коэффициента вязкости. Проведено детальное исследование влияния геометрии диффузора (угол раскрытия $6-10^\circ$) и интенсивности теплообмена (число Нуссельта 2.84-284) на гидродинамику. Обнаружено образование локализованных вязких барьеров при аномальной зависимости, существенно влияющих на поле скоростей. Установлено, что при определённых условиях течение жидкости с аномальной вязкостью может иметь больший расход, чем изотермическое течение с минимальной вязкостью. Получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от параметров течения.

В третьей главе проводится моделирование динамики двухфазных систем методом фазового поля. Разработана консервативная явно-неявная схема для уравнения Кана-Хилларда на основе метода контрольных объёмов с линеаризацией нелинейных членов. Схема обладает вторым порядком точности по пространству и первым – по времени. Проведена верификация на точном стационарном решении и тестах на сходимость. Исследовано влияние числа Кана ($Cn = 2 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$) на кинетику фазового разделения и эволюцию свободной энергии. Проанализированы различные начальные условия, включая эффект созревания Оствальда при несимметричном распределении фаз. Изучено влияние граничных условий Дирихле и Неймана на процесс сепарации фаз и формирование граничных слоёв.

В четвертой главе исследуется деформация капли методом фазового поля. Построена полная математическая модель, объединяющая уравнения Навье-Стокса, Кана-Хилларда и энергии. Реализована гибридная численная схема, сочетающая метод контрольных объёмов для гидродинамики и явную конечно-разностную схему для уравнения фазового поля. Проведена валидация путём сравнения с экспериментальными данными по деформации капель в плоском канале. Исследовано влияние капиллярного числа ($Ca = 0.01$

– 10) и соотношения вязкостей ($\lambda = 0.1-10$) на форму и скорость капли. Обнаружено превышение скорости капли над максимальной скоростью фонового потока при определённых условиях. Изучено влияние температурного поля на динамику капли, включая эффекты формирования дополнительных вязких барьеров и «вязкого ускорения» после прохождения зоны высокой вязкости.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Замечания по диссертационной работе

1. Автором предложена консервативная численная схема на основе метода контрольного объема для решения уравнения Кана–Хилларда, что является несомненным достоинством работы. Проведена валидация схемы на точных решениях и тестах на сходимость. Однако отсутствует сравнение с альтернативными современными методами, что могло бы усилить позиционирование работы.

2. Получены интересные результаты по влиянию угла раскрытия диффузора и числа Нуссельта на гидравлическое сопротивление и расход. В частности, предложен оригинальный способ управления потоком путем температурного воздействия на стенки канала (стр. 51 диссертации). Однако выводы носят качественный характер; не хватает аналитических аппроксимаций или эмпирических формул, которые могли бы быть полезны для инженерных расчётов.

3. В п. 4.2.1 (стр. 92-93) диссертации утверждается, что скорость капли возрастает с увеличением капиллярного числа Ca из-за деформации и удаления границ капли от стенок. Однако в п. 4.2.2 (стр. 96-98) при описании прохождения капли через вязкий барьер (который существенно увеличивает локальную вязкость, что аналогично резкому локальному увеличению эффективного числа Ca) ускорение наблюдается лишь при выходе капли из вязкого барьера, в то время как в самом барьере ускорения не происходит.

Возникает вопрос: почему глобальное увеличение Ca (меньшее влияние стенок) ускоряет каплю, а локальное увеличение эффективного Ca (вязкий барьер) ее не ускоряет? Это противоречие требует более глубокого физического объяснения, связывающего не только геометрию капли, но и баланс напряжений в области высоковязкого барьера. Необходимо дать более подробный анализ сил, действующих на каплю внутри вязкого барьера, и объяснить, почему эффект «сужения канала» барьером (который должен увеличивать скорость) в данном случае уступает эффекту резкого роста вязких напряжений (который должен тормозить каплю).

4. На стр. 93 и 100 диссертации констатируется, что скорость капли может превышать максимальную скорость фоновых потоков Пуазейля V_{max} , особенно при малых λ ($\lambda < 1$) и больших Ca (например, $Ca = 10$). Однако дана лишь ссылка на литературу [131, 132] без глубокого анализа этого контринтуитивного эффекта. При этом, обсуждение зарегистрированного диссертантом эффекта ускорения капли при наличии вязкого барьера вовсе опускается, ограничиваясь лишь констатацией факта ускорения. В работе присутствуют все данные для такого анализа (поля давления и скорости), но он не проводится. Неясно, связано ли это с изменением поля давления из-за присутствия капли, с формированием смазочного слоя или с другими факторами. Рекомендуется включить в анализ детальное рассмотрение поля давления и поля скоростей несущей жидкости вокруг капли в моменты, когда ее скорость превышает V_{max} , чтобы дать физическое объяснение этому явлению.

5. В постановке задачи для двухфазного течения (Глава 4) вводится уравнение энергии (4.4), но нигде не приведены условия сопряжения для температуры на межфазной границе. В методе фазового поля это обычно учитывается через непрерывность температуры и потока тепла. В работе же это не описано. Это важное упущение, так как именно от этих условий критически зависит, как холодная капля (раздел 4.2.2) охлаждает окружающую жидкость и формирует дополнительный вязкий барьер.

Рекомендуется четко прописать граничные условия для температуры на межфазной границе в рамках модели фазового поля.

6. В п. 4.2.2 (стр. 97-98 диссертации) ускорение капли после выхода из вязкого барьера объясняется, в том числе, инерцией. Однако при моделируемых числах Рейнольдса ($Re \approx 1.5$) инерционные силы пренебрежимо малы по сравнению с вязкими. В таких условиях, ускорение, скорее всего, обусловлено исключительно резким падением вязких напряжений при выходе из зоны высокой вязкости и действием постоянного перепада давления. Рекомендуется пересмотреть формулировку, убрав упоминание инерции, и дать объяснение, основанное на балансе вязких сил, сил давления и, если требуется, сил инерции.

7. В системе безразмерных уравнений (4.27)-(4.33) вводятся два числа Пекле: Pe (для теплопереноса) и Pe_ϕ (для переноса параметра порядка). Утверждается (стр. 80-81 диссертации), что Pe_ϕ характеризует соотношение конвективного и диффузионного переноса фазы. Однако численное значение $Pe_\phi = 10^{15}$ фактически означает полное пренебрежение диффузионным членом в уравнении Кана-Хилларда (4.31), что превращает его в гиперболическое уравнение переноса, для решения которого использованные автором схемы могут быть неприменимы при выбранном значении критерия устойчивости численной схемы. Это в свою очередь может привести к численной неустойчивости и нефизическим результатам, таким как бесконечное растяжение капли без разрыва (Рис. 4.8 диссертации). Необходимо обосновать физический смысл и выбор значения Pe_ϕ . Если целью было смоделировать случай, близкий к несмешивающимся жидкостям, возможно, следовало было использовать специализированные численные методы для малых коэффициентов диффузии (например, адаптивные сетки), но не произвольно задавать запредельное значение параметра.

Заключение

Диссертационная работа Галеевой Дилары Рустэмовны «Моделирование одно- и двухфазных неизотермических течений термовязких жидкостей в

каналах» выполнена на высоком научном уровне и является законченным научно-квалификационным исследованием, имеющим научную новизну, практическую значимость и выполненным на актуальную тему.

Основные научные результаты исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК Минобрнауки РФ и в базу данных RSCI. Получены два свидетельства о регистрации программ. Автореферат верно отображает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Галеева Дилара Рустэмовна**, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы**.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы), ведущий научный сотрудник Лаборатории гидродинамики и теплообмена Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН ФИЦ «Казанский научный центр РАН»



Зарипов Динар Ильясович

Институт энергетики и перспективных технологий – структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Адрес: 420111, г. Казань, ул. Лобачевского, 2/31, а/я 261

Тел. +7 (843) 231-90-00

e-mail: zaripov.d.i@mail.ru

Подпись Зарипова Д.И. заверяю

должность

Подпись	<u>Зарипова Д.И.</u>
ЗАВЕРЯЮ	
НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА ПРОТОКОЛА И ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	<u>Галеева Ф.И.</u>
« 03 »	2015 г.

