

ОТЗЫВ

официального оппонента Кривилева Михаила Дмитриевича на диссертацию Загвозкина Тимофея Николаевича «Неустойчивости и нелинейные режимы течения в гетерогенных средах при наличии внешнего потока», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – Механика жидкости, газа и плазмы.

Гидродинамика многофазных сред относится к сложным и одновременно практически значимым разделам механики сплошных сред. Наличие фазовых границ значительно изменяет структуру и динамику многофазных течений. Протекающие при этом процессы смешивания сред могут вносить в общую картину процесса значительные изменения.

В диссертационной работе Т.Н. Загвозкина решено несколько актуальных задач механики жидкости и газа, которые относятся либо к гидродинамике многофазных сред, либо к течениям в осложненных условиях в пористой среде. В качестве основных методов исследования использованы математическое моделирование многофазной среды и анализ устойчивости поверхности раздела аналитическими методами. При этом важно отметить, что различные вычислительные модели гидродинамики многофазных сред основаны на нескольких подходах. Условно их можно разделить на модели с резкой границей и модели с диффузной границей. Первый подход достаточно хорошо развит в современной науке и основан на учете баланса сил (напряжений) на фазовых поверхностях, при этом компьютерная реализация вычислительно затратная. Метод диффузной границы (метод фазового поля) позволяет эффективно моделировать системы, в которых на межфазной поверхности присутствуют капиллярные, термокапиллярные эффекты, наблюдается смешивание двух контактирующих жидких сред.

В диссертационной работе Т.Н. Загвозкина предложено развитие методологии фазового поля для решения новых задач, ранее не изучавшихся в опубликованной литературе. Следует отметить ряд новых выводов о

феноменологии исследуемых систем, которые получены в рамках диссертационного исследования. К ним относится, например, анализ различий в динамике неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и неустойчивости Холмбое с развитием бегущих волн и формированием вихрей, движущихся вдоль слоя. В развитие этих результатов в работе получены карты устойчивости в координатах «волновое число – число Грасгофа». Крайне интересным является исследование карт устойчивости при изменении характеристик границы раздела и усилении поверхностных эффектов.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы, который содержит 138 наименований. Объем работы – 102 страницы. **Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, продемонстрированы научная новизна и достоверность результатов, описана их практическая и теоретическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена исследованию поведения границ раздела в двухфазных системах смешивающихся жидкостей методом фазового поля. В разделе 1.1 приводится литературный обзор, в котором описывается история развития теории фазового поля, дается детальное описание данной теории, обосновываются ее преимущества по сравнению с другими подходами. В разделе 1.2 методом фазового поля путем решения полных нелинейных уравнений гидродинамики двухфазной бинарной смеси исследуются возникновение и нелинейное развитие неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Холмбое с учетом влияния межфазных напряжений и нефиковских диффузионных эффектов. Раздел 1.3 посвящен прямому численному моделированию процесса всплытия капель, смешивающихся с окружающей жидкостью, при различных значениях сил поверхностного натяжения.

Глава 2 посвящена исследованию конвекции в слое пористой среды, насыщенной вязкой несжимаемой жидкостью. В разделе 2.1 приводится литературный обзор, в котором описывается состояние исследований конвекции в пористых средах. Приводится обоснование постановки и актуальность задач, рассматриваемых в главе 2 диссертации. В разделе 2.2 описываются результаты линейного анализа устойчивости основного состояния, соответствующего режиму

однородного прокачивания, на основе уравнений в длинноволновом приближении. В разделе 2.3 приводятся результаты прямого численного моделирования на основе полных нелинейных уравнений, описывающих поведение системы.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей разработки темы.

Основные результаты диссертации **опубликованы** в 4 печатных работах в изданиях из перечня ВАК, которые также индексируются в международных базах цитирования. Научный уровень изданий высокий. Результаты докладывались и обсуждались на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня.

Диссертация оформлена аккуратно, присутствует небольшое количество пунктуационных и стилистических неточностей в тексте диссертации. После ознакомления с диссертацией возникли **следующие замечания**.

1. При формулировке п. 2 научной новизны описана динамика всплывания капли в другой жидкости, смешивающейся с первой. Сделаны выводы о влиянии поверхностного натяжения и межфазной диффузии. При этом моделирование проведено для смеси жидкостей с близкими вязкостями, что существенно сужает класс физических систем, для которых справедливы полученные результаты. Требуется детализировать этот аспект, исключив бинарные смеси с различными вязкостями.
2. При рассмотрении антологии развития метода фазового поля пропущен цикл пионерских работ Кармы и Раппеля, которые показали, что модель диффузной границы в асимптотическом пределе сводится к модели резкой границы, что позволяет в вычислительных моделях использовать искусственно завышенную ширину границы, сохраняя при этом физическую адекватность модели.
3. При переходе от размерной к безразмерной системе уравнений в разделе 1.1 крайне важно указывать единицы измерения величин. Это особенно важно для удельных физических характеристик и термодинамических величин. Результатом использования различных единиц измерения является появление коэффициентов в выражениях для безразмерных комплексов. В тексте диссертации зачастую такая информация отсутствует, что затрудняет проверку формул и практическое использование результатов.

4. В разделе 1.2.2 выполнена постановка задачи для устойчивости границы раздела по отношению к одномодовому гармоническому возмущению. В диссертации нет обсуждения, насколько предложенный подход применим для двух или многомодового возмущения, обосновано ли в этом случае использование периодических граничных условий.
5. В разделе 1.2.3 при исследовании сходимости по сетке используется интегральная величина – кинетическая энергия системы. Для анализа сходимости настоятельно рекомендуется использование первичных физических характеристик системы – профилей скоростей, полей сдвиговых напряжений и других – для методически корректного анализа.
6. На рисунке 1.11 приведены карты устойчивости для зон неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и Холмбое. Исследование устойчивости проведено в двумерном случае. Насколько сильно изменятся карты устойчивости при решении задачи в полной трехмерной постановке?
7. При постановке задачи подъема капли жидкости используется приближение цилиндрической симметрии. Как известно из классических работ по гидродинамике многофазных систем, траектория поднятия капли в определенном диапазоне параметров является нестабильной. Следует четко определить область применимости полученных решений.
8. В выводах по разделу 1.3 отмечено, что поверхностное натяжение является более существенным фактором, чем межфазная диффузия. Рекомендуется определить не только диапазон параметра M , ответственного за поверхностное натяжение, но также и влияние числа Sc Шмидта.
9. В главе 2 исследуется оригинальная задача вымывания локализованных конвективных структур в пористой среде. Получены новые интересные результаты. Недостаточно обоснован переход от уравнения (44) для длинноволновой конвекции к одномерному уравнению. Исходная задача существенно двумерна. Как влияет снижение размерности постановки задачи на результаты?

Отмеченные недочеты не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. В целом, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной под руководством доктора физико-математических наук, заведующей

лабораторией вычислительной гидродинамики Т.П. Любимовой. В диссертации приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение актуальной научной задачи в области математического моделирования гидродинамических процессов в многокомпонентных средах. Текст автореферата и диссертации, а также выполненные публикации полностью отражают суть работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация отвечает требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 г., а ее автор Загвозкин Тимофей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта mk@udsu.ru

03.11.2022

Кривилев Михаил Дмитриевич

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Загвозкина Тимофея Николаевича, и их дальнейшую обработку.

М.Д. Кривилев

Подпись официального оппонента заверяю.

03.11.2022

дата

подпись

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «УдГУ»



Л.А. Пушина