

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Демёхина Евгения Афанасьевича

на диссертационную работу Прокопьева Сергея Анатольевича

**«Моделирование одно- и двухфазных течений бинарных и
трехкомпонентных жидких сред»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Прокопьева Сергея Анатольевича посвящена численному моделированию гомогенных и гетерогенных жидких сред. Исследование затрагивает широкий класс нерешенных задач, в которых рассматриваются однофазные и двухфазные течения, между которыми существует заметное отличие в виде межфазной границы и учета сил поверхностного натяжения. Большое количество природных и технологических процессов имеет дело либо с одним классом сред, либо с другим, либо с некоторой промежуточной ситуацией, когда жидкости смешиваются частично. Актуальность работы обусловлена необходимостью улучшения понимания различий между данными видами неоднородных по составу жидких сред, а также усовершенствования методик расчета.

Помимо новых физических результатов по исследованию влияния неравновесного поверхностного натяжения на динамику системы и конвекции однофазных многокомпонентных жидкостей, в диссертации особое внимание уделяется разработке современных численных методик расчета течений на графических процессорах. Использование численной программы, реализованной Прокопьевым С.А. при написании диссертации, имеет перспективы дальнейшего применения при решении различных задач гидродинамики. Достоверность результатов моделирования обеспечивается

согласованием в частных случаях с известными аналитическими формулами и данными физических экспериментов.

Диссертация Прокопьева С.А. представляет собой логически построенное и завершенное исследование. Она состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 210 страниц, включая 79 рисунков и список литературы из 195 наименований.

Во введении представлены актуальность работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов и о структуре диссертации. Обосновывается достоверность полученных результатов и личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена исследованию динамики гетерогенных систем методом фазового поля. Глава состоит из трех подразделов. В первом разделе приводится детальное описание теории фазового поля, обосновывается ее использование и преимущества над другими методами, используемыми при моделировании гетерогенных сред с границей раздела. Приводится обзор литературы и степень разработанности темы по данным проблемам. В разделе 1.2 исследуется динамика вытеснения в капиллярах для несмешивающихся и смешивающихся систем, изучается динамика вытеснения при различных параметрах, отвечающих за эффекты вязкости, диффузии, поверхностного натяжения и др. Показано, что могут реализовываться два качественно отличающихся сценария вытеснения: 1) при слабых капиллярных силах наблюдается параболическое течение, при котором фронт вытеснения сильно вытягивается; 2) при больших капиллярных силах реализуется замедленное течение, при котором профиль течения становится тем более плоским, чем сильнее капиллярные силы. В разделе 1.3 исследуется неустойчивость Релея-Тейлора, отличительной особенностью изучения данного вида неустойчивости в диссертации Прокопьева С.А. является то

обстоятельство, что жидкости бинарной двухслойной системы считаются смешивающимися, при этом в начальный момент времени компоненты системы не находятся в состоянии термодинамического равновесия. Показано, что развитие неустойчивости приводит к интенсификации процесса диффузии, а процесс диффузии, в свою очередь, оказывает влияние на толщину границы раздела, что влияет на поверхностное натяжение, препятствующее развитию неустойчивости.

Во второй главе исследуется конвекция трехкомпонентных смесей с эффектом Соре. В разделе 2.1 приводится обзор литературы по исследованию конвективных и диффузионных процессов. В разделе 2.2 приводятся результаты исследования задачи конвекции трехкомпонентных жидких смесей с эффектом Соре. Особенностью задачи является рассмотрение теплового потока на верхней и нижней границах, что соответствует ситуации, при которой теплопроводность исследуемой жидкости больше, чем теплопроводность окружающих ее твердых границ. Исследованы пороги возникновения конвекции и нелинейные надкритические режимы. Найдено, что во всех случаях наиболее опасной является длинноволновая неустойчивость. В разделе 2.3 приводятся результаты исследования смеси Тoluол (61%)-Метанол (32%)-Циклогексан (7%) в замкнутой ячейке при подогреве сверху. Задача решалась в рамках анализа и интерпретации результатов экспериментов DCMIX-2 на Международной космической станции. Отличительной чертой исследуемой смеси является то, что суммарное отношение разделения, параметр, отвечающих за термодиффузию, оказывается близким к нулю, а также существенный вклад перекрестной диффузии в поток вещества. Показано, что данные особенности могут приводить к сильной конкуренции компонентов смеси, когда, в частности, наиболее тяжелая компонента смеси, толуол, на начальных временах идет вверх, что противоречит аналитическим выражениям для стационарного состояния.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе, и рекомендации к дальнейшей разработке темы.

В приложении приводится описание параллельного алгоритма, адаптированного для использования на графических процессорах, с использованием технологии CUDA. Приводятся основы программной реализации.

Замечания по содержанию работы:

1. В тексте диссертации в небольшом количестве случаев присутствуют редко используемые математические символы. Например, в уравнении 1.8, по-видимому, присутствует тензорное произведение векторов. Было бы полезно явно об этом упомянуть в тексте. Некоторые рисунки в диссертации выглядят неоправданно большими.
2. Не совсем понятны роль и место задачи моделирования неустойчивости Релея-Тейлора методом фазового поля в рассматриваемой диссертации. Непонятно, почему для решения данной задачи были выбраны другие система обезразмеривания, функция свободной энергии и численный алгоритм.
3. При объяснении результатов моделирования смеси толуол-метанол-циклогексан говорится о существенной роли кросс-диффузии толуола на эволюцию смеси. При этом не приводятся сравнительных данных о параметрах других смесей, в большинстве которых, как молчаливо подразумевается в диссертации, коэффициенты кросс-диффузии малы.
4. Было бы полезно более подробно описать методику получения показателя преломления и возникающие при этом сложности. При сравнении полей показателя преломления теоретических и экспериментальных данных было бы более наглядно выбрать одинаковую шкалу единиц.
5. В работе присутствует незначительное количество орфографических и пунктуационных ошибок. Математические формулы в ряде случаев

написаны небрежно, например, во второй главе ряд выражений для потоков обозначены полужирным шрифтом, тогда как в других случаях шрифт обычный.

Приведенные замечания не снижают ценности результатов исследований, представленных в диссертационной работе Прокопьева С. А. Диссертация написана хорошим научным языком и качественно оформлена. Материалы диссертации опубликованы в 8 статьях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, 5 из которых опубликованы в журналах первого и второго квартилей (Q1 и Q2), что говорит о высоком уровне полученных результатов.

Заключение. Диссертационная работа Прокопьева Сергея Анатольевича на тему «Моделирование одно- и двухфазных течений бинарных и трехкомпонентных жидких сред» выполнена на хорошем научном уровне и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Прокопьев Сергей Анатольевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики и информатики Краснодарского филиала ФГОБУ ВО «Финансовый университет при правительстве Российской Федерации»,
350051 г. Краснодар, ул. Шоссе Нефтяников, д. 32,
e-mail: edemekhi@gmail.com, тел: +7 (861) 268-76-21

03.02.2022

Демёхин Евгений Афанасьевич

Лугинский Евгений Александрович
Секретарь комиссии



Лугинский Евгений Александрович