

## Отзыв официального оппонента

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

Диссертационная работа Прокопьева С.А. посвящено численному исследованию многофазных гидродинамических сред. Рассматриваются несколько задач: вытеснение одной жидкости другой в одиночном капилляре и в матрице капилляров; возникновение и развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора на границе смешивающихся жидкостей; конвекция трехкомпонентных смесей с эффектом Соре в плоском горизонтальном слое.

Решение задач о вытеснении жидкостей в капиллярах проводилось методом фазового поля. Рассматривались случаи несмешивающихся и смешивающихся жидкостей. Метод фазового поля продемонстрировал свою эффективность при решении указанных задач: результаты численного моделирования динамики межфазной границы жидкостей хорошо согласуются с известными результатами других авторов. Изучение неустойчивости Рэлея – Тейлора на границе смешивающихся жидкостей при различных числах Пекле также проводилось методом фазового поля. Эволюция двухфазной системы рассмотрена с учетом изменяющегося коэффициента поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение изменяется со временем по двум причинам: растяжение межфазной границы приводит к ее утончению и, как следствие, увеличению поверхностного натяжения, а диффузия компонентов, напротив, увеличивает толщину слоя смешения и уменьшает поверхностное натяжение. В начальной фазе развития неустойчивости утончение слоя смешения и увеличение коэффициента поверхностного натяжения приводит к замедлению роста возмущений. Изучение режимов конвекции трехкомпонентных смесей с эффектом Соре в плоском горизонтальном слое с заданным тепловым потоком в линейном приближении и с учетом нелинейности показало, что наиболее опасными являются длинноволновые возмущения. Индуцированная эффектом Соре конвекция изучена для трехфазной системы, состоящей из толуола, метанола и циклогексана для двух отличающихся знаком значений суммарного отношения разделения. Полученные в двумерной постановке задачи численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами об устойчивости трехкомпонентной смеси, полученными в рамках реализации проекта DCMIX-2.

**Актуальность.** Изучение неоднородных гидродинамических сред безусловно является актуальной для современной гидромеханики. При взаимодействии смешивающихся или несмешивающихся жидкостей возникают условия для развития неустойчивостей различной природы (Рэлея – Тейлора, Кельвина – Гельмгольца и др.), которые существенным образом обогащают спектр наблюдаемых в естественных условиях и технике гидродинамических эффектов. На развитие неустойчивостей влияет изменение физических условий на межфазной границе, в том числе, динамика капиллярного давления, поверхностного натяжения и толщины слоя смешения (для смешивающихся сред) и др., которые изучаются в настоящей работе.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 2 глав, заключения, списка литературы (195 наименований) и приложения. Объем диссертации составляет 210 страниц, включая 79 рисунков.

Во введении дается обоснование научной и практической значимости исследования, а также формулируются цели и задачи работы. Изложены защищаемые научные положения.

Первая глава посвящена исследованию динамики гетерогенных двухфазных систем методом фазового поля на примере решения следующих задач: 1) вытеснение несмешивающихся жидкостей в одиночном капилляре; 2) вытеснение смешивающихся жидкостей в одиночном капилляре с учетом изменяющегося капиллярного давления; 3) вытеснение жидкостей в сети капилляров; 4) неустойчивость Рэлея – Тейлора двух смешивающихся жидкостей. В начале первой главы также приведено описание теории фазового поля с обоснованием ее преимуществ по сравнению с другими подходами описания многофазных систем. При решении первой задачи показано, что профиль межфазной границы имеет пальцеобразную или почти плоскую форму (поршневое вытеснение) в зависимости от величины капиллярных сил (числа Маха). Основным результатом решения второй задачи является нахождение временной зависимости неравновесного капиллярного давления и обнаружение его ненулевой величины в течение всего процесса вытеснения. Моделирование вытеснения жидкостей в сети капилляров (задача №3) показало, что этот процесс качественно повторяет особенности вытеснения в одиночном капилляре. Изучение эволюции системы смешивающихся жидкостей, когда тяжелая жидкость находится сверху, показало, что диффузия влияет на свойства границы раздела и на развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора (задача №4).

Вторая глава посвящена исследованию конвекции трехкомпонентных смесей с эффектом Соре. В начале главы приводится обзор литературы по указанной теме, приводится описание математической модели и методов решения. Во второй главе приведено описание решения двух задач. Первая из них посвящена изучению устойчивости и надкритических режимов конвекции трехкомпонентных смесей с эффектом Соре в горизонтальном слое с заданным тепловым потоком на верхней и нижней границах. Важным результатом является обнаружение длинноволновой моды неустойчивости только вблизи порога возникновения конвекции. Вторая из решенных задач посвящена интерпретации экспериментальных результатов исследования конвекции смеси толуол-метанол-циклогексан, выполненных в рамках проекта DCMIX-2. Полученные в диссертации данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

В приложении к диссертации описаны параллельный алгоритм расчета на графических процессорах и его программная реализация на CUDA.

**Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации.** Изложенные автором научные положения и выводы достаточно ясно сформулированы и полностью обоснованы. Достоверность полученных результатов подтверждается успешным сравнением результатов численных расчетов как с аналитическими данными в предельных случаях, так и с экспериментальными данными других авторов.

**Новизна исследований и полученных результатов.** С помощью использованного автором метода фазового поля показано, что при вытеснении жидкостей в капиллярах неравновесное капиллярное давление является значимым в течение всего процесса

вытеснения, а не только в начальной фазе. Впервые проведено исследование неустойчивости Рэлея – Тейлора для смешивающихся жидкостей с учетом капиллярных эффектов при условии, что система изначально не находится в состоянии термодинамического равновесия. Исследована устойчивость механического равновесия трехкомпонентной смеси жидкостей для случаев, когда суммарное отношение разделения принимает значения чуть больше или чуть меньше нуля. Результаты численных расчетов подтвердили данные экспериментов, проведенных в рамках проекта DCMIX-2.

**Практическая и теоретическая значимость полученных результатов.** Полученные в первой главе данные о влиянии неравновесного капиллярного давления на динамику вытеснения жидкостей могут иметь значение в задачах об извлечении углеводородов из недр с помощью вытеснения их водой. Проведенные во второй главе численные расчеты уже продемонстрировали свою практическую значимость при интерпретации экспериментов, проведенных в рамках проекта DCMIX-2.

**Автореферат** в достаточной степени отражает содержание диссертации.

**Апробация результатов.** Результаты исследований докладывались на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях и семинарах.

**Публикации.** Материалы диссертации изложены в 22 работах, включая 8 работ в журналах из списка ВАК, которые также индексируются в международных базах данных Scopus и Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации.** Диссертация Прокопьева С.А. представляет собой хорошо структурированный завершённый научный труд, имеющий ценность для научного сообщества и перспективу применения в технологичных приложениях. Тем не менее, к тексту работы имеются замечания:

1. На стр. 29 вводятся управляющие безразмерные параметры для задачи о вытеснении жидкостей из капилляра. Среди параметров присутствует число Кана, в состав которого входит параметр  $\epsilon$ , физический смысл которого в диссертации не объяснен.

2. Какое можно предложить объяснение возникновения вихрей вблизи межфазной границы в случае медленного вытеснения жидкостей из капилляра (рис. 1.8)? Известны ли автору экспериментальные свидетельства образования таких вихрей?

3. В задаче о перемешивании жидкостей в результате неустойчивости Рэлея – Тейлора зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкостей от времени имеет немонотонный характер (рис. 1.15). Как можно объяснить данный результат?

4. Какой физический смысл имеют синие линии на рис. 1.26? В подписи к рисунку описание этих линий отсутствует.

5. Чем объясняется такое сложное начальное распределение концентрации смешивающихся жидкостей в задаче об изучении неустойчивости Рэлея – Тейлора (формула 1.52).

6. Текст диссертации содержит неточности и опечатки, характерные для подобного рода работ. В частности, в первой главе в выражениях вида «см. рис.» между словами часто написана ненужная запятая. Другой пример – в тексте диссертации встречаются различные написания фамилии Рэлея – через «е» и «э».

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

**Общее заключение.** Диссертация «Моделирование одно- и двухфазных течений бинарных и трехкомпонентных жидких сред», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Прокопьев Сергей Анатольевич, заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,  
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»

Полежаев Денис Александрович  
10.02.2022

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, 24  
e-mail: [polezhaev@pspu.ru](mailto:polezhaev@pspu.ru), +7 919 7 100 101



Подпись Полежаева Д.А. заверяю  
Ученой секретарь Юлия Е. Я. Гранкина  
10.02.2022г.