

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук

Файзрахмановой Ирины Сергеевны

на диссертационную работу Самойловой Анны Евгеньевны

**«Конвективная устойчивость горизонтальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**

Диссертационная работа А.Е. Самойловой посвящена изучению механизмов конвективной неустойчивости в неизотермических горизонтальных слоях жидкости с деформируемыми поверхностями раздела. А также способы воздействия на эти механизмы. Внимание уделяется колебательным режимам конвекции, существенно связанным с деформируемостью поверхности раздела.

Рассматриваемые в диссертации задачи являются **актуальными**, поскольку конвекция, связанная с неоднородностью нагрева является одним из самых распространенных видов течений газа и жидкости в природе. Горизонтальный слой жидкости, помещенный на твердую подложку и ограниченный сверху свободной поверхностью с газовой фазой над ней, является классической системой для изучения конвекции Рэля-Бенара-Марангони. В то же время рассматриваемая система является актуальной с практической точки зрения в связи с многочисленными приложениями теории конвективной устойчивости в метеорологии, астрофизике, геофизике и т.д. Математические аналитические и численные методы представляют в настоящее время важный и актуальный способ проведения исследования конвективных течений в самом широком диапазоне управляющих параметров.

Полученные результаты имеют **фундаментальное значение** и широкий диапазон возможных **практических приложений**. Результаты

исследования неустойчивости Рэлея-Бенара-Марангони, возникающей в слое со свободной деформируемой поверхностью, а также анализ новой колебательной моды неустойчивости, связанной с тепловым расширением жидкости, могут быть использованы в технологических процессах и при постановке экспериментов на космической станции в условиях микрогравитации. Результаты вычисления порога возникновения структуры термокапиллярной неустойчивости тонкой пленки могут быть применены в технологических процессах легирования поверхностного слоя металла.

**Научная новизна работы состоит в том, что в ней**

- впервые изучено влияние изменения числа Прандтля на колебательную неустойчивость Рэлея-Бенара-Марангони в рамках небуссинесковской модели корректного учета плавучести для слоя со свободной поверхностью;
- обнаружена новая мода колебательной неустойчивости слоя жидкости со свободной поверхностью, основным механизмом которой является раскачка капиллярных волн за счет теплового расширения жидкости;
- обнаружена новая колебательная мода конвекции Марангони в тонкой пленке жидкости за рамками длинноволнового приближения;
- выведены амплитудные уравнения термокапиллярной конвекции, описывающие эволюцию толщины тонкой пленки жидкости и осредненной по высоте температуры жидкости в рамках двухслойного подхода;
- проведен линейный и слабонелинейный анализ возникновения трехмерных структур на квадратной решетке в результате возбуждения термокапиллярной неустойчивости тонкой пленки жидкости.

**Высокая степень обоснованности научных положений, выводов и достоверности результатов** диссертационной работы подтверждается тестированием используемых программ расчетов; совпадением данных, полученных разными методами и в рамках разных подходов; соответствием численных и аналитических результатов в предельных случаях; а также тем, что результаты исследований были широко представлены в докладах на российских и зарубежных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, включающего обзор литературы, двух глав, заключения и списка литературы, содержащего 119 наименований. Диссертация содержит 22 рисунка. Общий объем диссертации составляет 120 страниц.

**В первой главе** диссертации рассматривается колебательная устойчивость плоского слоя жидкости, расположенного на твердой подложке, которая поддерживается при постоянной температуре. Слой ограничен сверху свободной поверхностью, которая может деформироваться. Описаны альтернативная модель тепловой конвекции, позволяющая корректно учесть влияние плавучести на деформационные моды конвекции Марангони. Получена безразмерная краевая задача для амплитуд плоских нормальных возмущений. Результаты расчетов представлены для двух случаев: аномального и нормального теплового расширения. Для нормального теплового расширения впервые обнаружено возникновение колебательной неустойчивости в отсутствие термокапиллярного и архимедовых сил. Проведен слабонелинейный анализ конвекции Рэлея-Бенара-Марангони, получены амплитудные уравнения. Построены карты устойчивости вторичных режимов в широком диапазоне управляющих параметров. Тщательно изучена новая колебательная мода. Проведен анализ влияния различных характеристик жидкости и внешних сил на данную неустойчивость. В рамках коротковолновой асимптотики решена модельная задача об устойчивости

слоя невязкой жидкости со свободной деформируемой границей. Показано, что природа новой моды связана с тепловым расширением жидкости.

**Вторая глава** посвящена изучению конвекции Марангони в подогреваемой снизу тонкой пленке жидкости со свободной деформируемой поверхностью. Рассматривается линейная задача устойчивости тонкого слоя в области параметров, где ранее в рамках длинноволнового приближения предсказывалось существование колебательной моды Марангони для случая подогрева снизу. Численное решение краевой задачи устойчивости подтверждает возникновение колебательной моды конвекции Марангони при подогреве снизу. Проводится сопоставление с результатами, полученными в длинноволновом приближении. Указанная задача решается и в рамках двухслойной модели: решается сопряженная задача о конвекции в тонком слое жидкости и о теплопереносе в газе. В длинноволновом подходе выводятся амплитудные уравнения для эволюции температуры и толщины пленки. Линейный анализ этих уравнений обнаруживает результаты, которые не могли быть найдены в рамках однослойной модели. Проведен слабонелинейный анализ возникновения и устойчивости вторичных трехмерных структур на квадратной решетке, построена карта режимов.

Помимо прочего, к **достоинствам диссертации** следует отнести, приведенный автором обзор литературы. Необходимо отметить проведенный диссертантом всесторонний анализ полученных результатов и тщательность в исследовании и построении нейтральных кривых и карт устойчивости.

**По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания и вопросы:**

1. При постановке задачи на стр. 23 диссертации сказано, что жидкость полагается изотермически несжимаемой, т.е. плотность зависит только от температуры. Однако в уравнении (1.1) сохранено слагаемое пропорциональное  $\nabla \cdot \mathbf{v}$ , хотя из уравнения (1.3), если

учесть, что плотность зависит только от температуры, это слагаемое должно быть равно нулю.

2. Можете ли вы привести пример реальной жидкости, обладающей аномальным параметром Буссинеска?

3. В разделе 1.4.1. «Положительный параметр Буссинеска», где варьируется число Прандтля, число Галилея зафиксировано  $Ga = 7 \cdot 10^4$ , и обратное капиллярное число зафиксировано  $Cr = 2 \cdot 10^{-6}$ , не мог бы диссертант указать, какой жидкости и какой примерно ситуации это соответствует?

Диссертация Самойловой А. Е. написана хорошим научным языком. Автореферат отражает содержание диссертации. Приведенные замечания, а также присутствующие в работе в незначительном количестве пунктуационные ошибки не снижают **общего положительного впечатления** от работы, выполненной соискателем на высоком научном уровне. Материалы исследований достаточно полно опубликованы в печати, результаты представлены на международных и Всероссийских конференциях. Здесь также стоит отметить, что работа **Samoilova A.E. and Lobov N.I. On the oscillatory Marangoni instability in a thin film heated from below Phys. Fluids, 2014, Vol. 26. P. 064101** была включена в список в Research Highlights от журнала Physics of Fluids в июне 2014 года, этот факт также свидетельствует об уровне на котором выполнена работа, её новизне и актуальности.

Считаю, что диссертационная работа Самойловой А. Е. «Конвективная устойчивость горизонтальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела» **представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям** «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертационным работам, а ее автор Самойлова Анна Евгеньевна, несомненно, заслуживает присуждения

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Файзрахманова Ирина Сергеевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Кандидат физ.-мат. наук,  
Старший преподаватель кафедры Общей физики  
факультета Прикладной математики и механики  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
профессионального образования  
«ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ».

614990, Пермский край,

г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29

**e-mail: faizr2@gmail.com**

+7 (342) 2-198-025

Подпись

Ирина Сергеевна Файзрахманова

12.02.2016 г.

Подпись Файзрахмановой И.С. заверяю

Специалист  
по кадрам У  
М.Н. Ведерникова

