

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию 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 Самойловой Анны Евгеньевны посвящена исследованию механизмов конвективной неустойчивости в неизотермических горизонтальных слоях жидкости с деформируемыми границами раздела и колебательных режимов конвекции, существенно зависящих от деформируемости поверхности раздела.

Актуальность исследований. Моделирование конвективных течений, вызванных неоднородностью поля температур в горизонтальных слоях жидкостей, является актуальной задачей в силу широкого применения жидкостных систем во многих технологических процессах. Возникающие сложности связаны с проблемами поиска, построения и обоснования адекватных математических моделей и корректных постановок краевых задач, получения точных решений и исследования устойчивости различных конфигураций жидкости. Определение критических характеристик устойчивости и кризисных механизмов становится одной из главных задач при разработке и совершенствовании различных жидкостных технологий, а также при изучении разнообразных естественных природных процессов.

Научная новизна диссертационной работы связана с изучением различных типов и механизмов неустойчивости жидкостей, заполняющих горизонтальные слои со свободной границей. При выполнении исследования получены следующие результаты:

- 1) В рамках небуссинесковской математической модели конвекции изучено влияние тепловых и вязких свойств среды на характеристики колебательной неустойчивости Рэлея-Бенара-Марангони и обнаружена новая колебательная мода.

- 2) Обнаружена новая колебательная мода конвекции Марангони в тонкой пленке жидкости.
- 3) На основе двухслойного подхода получены эволюционные уравнения для амплитуды толщины жидкой пленки и осредненной по высоте температуры.
- 4) В рамках линейной и слабонелинейной теории проведен анализ трехмерных структур, возникающих при термокапиллярной потере устойчивости в тонкой жидкой пленке.

Степень обоснованности и достоверности результатов диссертационной работы обусловлена проведением тестовых расчетов, подтверждается точностью применяемых методов, сравнением результатов с данными других авторов.

Научное и практическое значение. Разработанные в диссертации подходы к изучению различных типов неустойчивостей в слоях жидкости, используемые математические модели и численные алгоритмы, продемонстрированный автором анализ полученных результатов имеют как научное, так и практическое значение. Результаты исследования могут быть использованы при разработке некоторых физических экспериментов и методик, связанных с технологиями легирования поверхностных слоев металлов и металлических конструкций.

Оценка диссертации. Диссертация изложена на 120-ти страницах, состоит из введения, двух глав, заключения, содержит список литературы из 119-ти наименований.

Во введении дается обзор литературы и общая характеристика работы. Обосновывается актуальность тематики. При обзоре работ по новым моделям конвекции, которые можно отнести к неклассическим или небуссинесковским, следовало бы сделать ссылку на монографию [Андреев В.К, Гапоненко Ю., Гончарова О.Н., Пухначев В.В. Современные математические модели конвекции. Москва, Физматлит, 2008, 368 с.], где приведен системный безразмерный анализ уравнений гидродинамики, иерархия моделей конвекции, изложены вопросы корректности постановки начально-краевых задач для классических и новых моделей конвекции (для модели конвекции изотермически несжимаемой жидкости и модели конвекции слабо сжимаемой жидкости), построены точные решения новых и классической моделей, а также изложены результаты исследования устойчивости

плоских слоев, полученные при использовании альтернативных моделей. Вопросы построения новых (альтернативных классической) математических моделей конвекции изложены также в монографиях [Мосеенков В.Б. Качественные методы исследования задач конвекции вязкой слабо сжимаемой жидкости. Киев, Институт математики НАН Украины, 1998, 280 с.; Юдович В.И. Конвекция изотермически несжимаемой жидкости. Деп. в ВИНТИ 28.05.99, № 1699-В99, 41 с.]. В [Андреев и др., 2008] объяснен выбор уравнения состояния (зависимость плотности от температуры) в виде, который автором диссертационной работы назван «газовым». Ввиду малости числа Буссинеска (произведение коэффициента температурного расширения на характерную температуру) различия в аппроксимации уравнения состояния линейной функцией, как в модели Обербека-Буссинеска, и предложенной в [Андреев и др., 2008], несущественны. Данные зависимости совпадают с точностью до членов второго порядка относительно числа Буссинеска, и обе хорошо описывают изменение плотности с температурой для большинства капельных жидкостей.

В первой главе «Колебательная устойчивость плоского слоя со свободной деформируемой поверхностью» представлена постановка задачи (параграфы 1.1 и 1.2), методы численного решения (параграф 1.3), основные результаты линейного анализа (параграф 1.4), слабонелинейный анализ конвективных структур (параграф 1.5), исследована колебательная неустойчивость в отсутствии гравитации и термокапиллярного эффекта (параграф 1.6). В параграфе 1.4 автор излагает результаты линейного анализа устойчивости горизонтального слоя жидкости со свободной границей в случае отрицательных и положительных значений числа Марангони. Результаты представлены для положительных (пункт 1.4.1) и отрицательных (пункт 1.4.2) значений параметра Буссинеска, которые могут быть достаточно большими по модулю (порядка 10^{-1}). При этом рассматривается довольно широкий диапазон чисел Прандтля, условия нормальной гравитации и теоретической невесомости. В параграфе 1.5, посвященном нелинейному анализу конвективных структур, осуществляется поиск вторичного течения в виде разложения по степеням малого параметра δ . Получены условия возникновения вторичных течений в виде бегущих и стоячих валов. Новая колебательная мода неустойчивости плоского слоя жидкости, возникающая при отсутствии термокапиллярных сил и сил плавучести, исследована в параграфе 1.6.

Во второй главе изучается конвекция Марангони в тонкой пленке жидкости, подогреваемой снизу. Течения жидкости моделируются на основе уравнений Навье-Стокса и переноса тепла. На свободной деформируемой границе выполняются кинематическое и динамические условия, условие теплообмена с внешней средой третьего рода. В параграфе 2.1 линейная задача об устойчивости тонкого слоя решается в полной постановке. Проводится сравнение результатов с исследованием данной задачи в рамках длинноволнового приближения ([Shklyaev et al., 2010, 2012]), показано хорошее согласование результатов. Построены нейтральные кривые, карты устойчивости, дисперсионные соотношения. В параграфе 2.2 задача об устойчивости тонкого слоя жидкости решается уже в рамках двухслойной модели. При этом в газовом слое решается уравнение теплопроводности, а на свободной поверхности предполагаются выполнеными условия непрерывности температуры и тепловых потоков. В дальнейшем выводится уравнение для толщины пленки и осредненной по вертикальной координате функции температуры. Проведен линейный анализ амплитудных уравнений, который подтвердил существование аналога новой колебательной моды для случая двухслойной системы. Проведены расчеты для системы «жидкость - газ» типа «силиконовое масло - воздух».

В заключении автор формулирует основные результаты проведенных исследований.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Автору следует дать перечень всех тех гипотез и предположений, которые привели к системе уравнений (1.1)-(1.3). Данная система замыкается уравнением состояния: зависимостью плотности от температуры. Но уравнение энергии, приведшее к уравнению переноса тепла (см. (1.2)), претерпело изменение раньше, до того, как попало в указанную систему!
2. Как определяется коэффициент температуропроводности χ (см. уравнение (1.2))?
3. Функцию K (см. (1.6)) следует назвать удвоенной средней кривизной свободной поверхности и принять соглашение о выборе знака в формуле для K . Здесь же отметим опечатки, связанные с тем, что автор опускает обозначения для поверхностного градиента, поверхностной дивергенции при написании граничных условий на поверхности (см. формулу для вычисления K , условие (1.16), (1.24), (1.75) и т.п.).

4. При определении параметра Буссинеска ε (стр. 25) в качестве Θ выбрана разность значений температуры на твердой нижней границе T_1 и на свободной поверхности T_2 (см. Рис.1). Хотелось бы получить пояснения о выборе T_2 , о знаке характерного перепада температуры, который совместно со знаком коэффициента β может привести к положительным и отрицательным значениям параметра Буссинеска.
5. Задание числа Марангони (параграф 1.2) определит необходимое значение распределения температуры на свободной поверхности. Хотелось бы получить пояснение, как данный факт согласуется с выбором для температуры условия третьего рода при формулировке задачи (1.1)-(1.8) (также (1.11)-(1.18)) или, фактически, с условием теплоизоляции на поверхности, для которого представлены основные результаты (параграф 1.4, стр. 32).
6. Скорее всего, автор анализировал и типы реальных жидкостей, поведение которых описывается посредством проведенного моделирования в параграфе 1.4 (хотелось бы узнать каких). Что означает фраза о выборе слоя воды в качестве отправной точки для расчетов (пункты 1.4.1, 1.4.2)?
7. Хотелось бы получить пояснения о параметре δ , введенном в параграфе 1.5.
8. При осуществлении полной постановки задачи (2.1)-(2.8) (также и в задаче (1.1)-(1.8)) требуется говорить о проекции вектора вязких напряжений на оба касательных вектора к свободной поверхности (см. (2.7) и введение обозначений на стр. 73; см. также (1.5)). Формула для вычисления удвоенной средней кривизны поверхности (стр. 73) в случае, когда последняя однозначно проектируется на одну из координатных плоскостей, представлена неверно (следствие формулы для K на стр. 24).
9. Представляется не очень удачным выбор в главе 2 обозначений Θ и ε для осредненной температуры и отношения характерной толщины слоя жидкости к характерному горизонтальному масштабу (параграф 2.2) и обозначения β для произведения числа Био и параметра капиллярности (параграф 2.1).

10. Хотелось бы уточнить, для каких реальных сред и условий экспериментов можно использовать полученные в диссертации результаты для предсказания динамики процессов и отбора структур.

11. Кроме изложенных выше, есть замечания, которые относятся к стилистическим рекомендациям, – избегать сленга и терминов, которые могут иметь другое значение (1.3: «асимметричные» граничные условия, «двуухточечно разделенные»; 2.2.2: «перешкаливаются»).

12. Следует отметить опечатки в ссылках на свои работы во введении (стр. 21, следует указать [86-108] и [100, 105] для основных журналов).

Сделанные замечания не снижают ценности проведенных автором исследований и общей положительной оценки диссертации. За каждым результатом и выводом автора прослеживается большая работа, проведенная на достаточно высоком научном уровне.

Заключение по диссертации. Диссертационная работа Самойловой А.Е. является законченной научно-исследовательской работой, в которой аналитическими и численными методами детально изучены типы неустойчивости слоев жидкости с учетом действия термокапиллярных сил на свободной поверхности. При этом в первом случае на основе неклассической (небуссинесковской) модели конвекции изучается колебательная мода неустойчивости при наличии эффекта плавучести. Во втором случае изучается колебательная мода термокапиллярной неустойчивости в тонком слое жидкости, подогреваемом снизу. Основные результаты диссертации опубликованы в 23-х работах, из которых 10 – это статьи в журналах и сборниках научных трудов, 9 публикаций выполнены без соавторов; 2 статьи опубликованы в изданиях, индексируемых в ведущих системах цитирования. Результаты проведенных исследований обсуждались на семинарах, докладывались на международных и всероссийских конференциях. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа «Конвективная устойчивость горизонтальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела» имеет важное научное и прикладное значение, удовлетворяет всем требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», а ее автор – Самойлова Анна Евгеньевна –

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

Официальный оппонент,

профессор
кафедры дифференциальных уравнений
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»,
доктор физико-математических наук, доцент

Ольга Николаевна Гончарова

20.02.2016

Адрес: 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

Тел.: (3852)367067

e-mail: gon@math.asu.ru

Я, О.Н. Гончарова, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

О.Н. Гончарова

Подпись Гончаровой О.Н. удостоверяю

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ: начальник
ДОКУМЕНТАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШКОЛЫ

