

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего про-  
фессионального образования  
«Пермский государственный гуманитарно-  
педагогический университет»  
(ПГГПУ)

Сибирская ул., д. 24, Пермь, 614990, ГСП-372

Телефон (342) 212-72-53,

Факс (342) 212-70-19

E-mail: postmaster@pspu.ru

<http://www.pspu.ru>

19.02.2016 № 387/16

## УТВЕРЖДАЮ

Ректор Пермского  
государственного гуманитарно-  
педагогического университета,  
профессор Колесников Андрей  
Константинович



«19» февраля 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации Пермский государственный  
гуманитарно-педагогический университет на диссертационную работу  
**Самойловой Анны Евгеньевны** «Конвективная устойчивость горизон-  
тальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела», представ-  
ленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Кандидатская диссертация А.Е. Самойловой посвящена теоретиче-  
скому исследованию тепловой конвекции в слоях жидкости при наличии  
свободной поверхности или границы раздела сред. Отличительной осо-  
бенностью рассматриваемых систем являются присутствие термокапил-  
лярного эффекта, если система поддерживается в неизотермических усло-  
виях, и способность свободной границы деформироваться. Рассматривае-  
мая автором конвективная система — подогреваемый снизу (сверху) гори-  
зонтальный слой жидкости, помещенный на твердую подложку и огра-  
ниченный сверху свободной поверхностью — является исходной классиче-  
ской системой для изучения конвекции Рэлея–Бенара–Марангони.

Как известно, на физические процессы, протекающие в жидкости со  
свободной поверхностью, существенное влияние оказывает движение  
жидкости, связанное с термо- и концентрационно-капиллярными эффекта-  
ми. Особенно сильный эффект наблюдается в условиях невесомости. Как  
правило, эти явления сопровождаются деформациями поверхности. Про-  
блема конвективной устойчивости продолжает привлекать пристальное  
внимание исследователей в связи с теоретической важностью изучения  
внутренних механизмов, приводящих к неустойчивости жидкость. Именно

поэтому исследования, выявляющие новые моды неустойчивости, их пороги возникновения и структуру движения являются **актуальными**.

Таким образом, **целью работы** является теоретическое исследование различных типов неустойчивости слоев жидкости с деформируемой свободной поверхностью (границей раздела сред) при наличии термокапиллярного эффекта.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы, включающего 119 наименований.

**Во введении** представлен обзор литературы по теме диссертации и дана общая характеристика работы: показана актуальность и новизна исследования, сформулирована цель диссертации, представлено краткое содержание работы; перечислены полученные новые результаты, описано их практическая значение.

**В первой главе** рассматривается колебательная устойчивость плоского горизонтального слоя жидкости со свободной деформируемой поверхностью при наличии вертикального градиента температуры. Автор использует альтернативную модель тепловой конвекции, позволяющую корректно учесть влияние плавучести на деформационные моды конвекции Марангони. Линейный анализ устойчивости для данной системы проводится с использованием методов стрельбы и ортогонализации. Приведены графики нейтральных кривых и карт устойчивости, полученных в широком диапазоне управляемых параметров задачи. Это позволило обнаружить новую моду колебательной неустойчивости, наблюдающуюся в отсутствие термокапиллярного и подъемно-опускного механизмов.

Проведен всесторонний анализ новой моды. Численно в ходе линейного анализа устойчивости исследуется влияние различных характеристик жидкости на новую моду конвекции. Проведен слабонелинейный анализ в широком диапазоне параметров, определена форма возбуждения конвекции вблизи порога. Аналитически решена 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. Численно решается линейная задача об устойчивости тонкого слоя в области параметров, где ранее другими авторами в рамках длинноволнового приближения предсказывалось существование колебательной моды конвекции Марангони для случая подогрева снизу. Подтверждается возникновение колебательной моды конвекции Марангони при подогреве снизу. При этом по сравнению с результатами длинноволнового анализа размер области параметров, где наблюдается колебательная мода конвекции, существенно увеличивается.

Аналитически исследуется конвекция Марангони в тонкой пленке жидкости в рамках двухслойного подхода: решается сопряженная задача о конвекции в тонком слое жидкости и о теплопереносе в газе. В длинноволновом приближении выводятся амплитудные уравнения для эволюции температуры и толщины пленки. Линейный анализ этих уравнений показывает, что колебательная мода возникает только при сильном ограничении на толщину слоя газа. Проведен слабонелинейный анализ устойчивости вторичных трехмерных структур, построена карта режимов.

В **заключении** приведены основные результаты работы, а также сформулированы перспективы дальнейших исследований.

**Основные научные результаты**, полученные автором, можно уложить в два весомых пункта:

1. За рамками приближения Буссинеска-Обербека обнаружена новая мода колебательной неустойчивости слоя жидкости, ограниченного снизу подогреваемой твердой подложкой, а сверху – свободной деформируемой поверхностью. Установлено, что мода неустойчивости может реализоваться в условиях невесомости и отсутствия термокапиллярного эффекта. Выявлен механизм неустойчивости, который заключается в раскачке капиллярных волн за счет теплового расширения жидкости.

2. В рамках приближения Буссинеска-Обербека обнаружена новая колебательная мода конвекции Марангони в тонкой пленке жидкости, подогреваемой снизу. Важным моментом является то, что указанная мода обнаружена за рамками длинноволнового приближения, что позволило усилить результаты других авторов, полученные для этой моды в длинноволновом приближении.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** заключается, прежде всего, в том, что обнаруженные моды неустойчивости являются новыми. Изучены условия их возникновения, построены нейтральные кривые на плоскости различных безразмерных параметров, изучена эволюция слабонелинейных решений вблизи порога устойчивости.

**Практическая ценность** диссертационной работы определяется тем, что слои и пленки жидкостей встречаются во многих технологических процессах, которые требуют знания условий, в которых возникает и развивается неустойчивость.

Хорошее впечатление производит разнообразие теоретических методов исследований, продемонстрированных диссидентантом, а также мастерское владение теорией возмущений, что доказывает высокую квалификацию автора, полученную во время выполнения работы.

В целом, проделанную диссидентантом работу можно оценить положительно. Однако, по содержанию диссидентационной работы можно сде-

лать несколько замечаний, которые изложим далее в порядке уменьшения степени их серьезности:

1. В главе 1 автором утверждается, что в задаче о конвекции в тонком слое жидкости, расположенным на твердой подогреваемой подложке, обнаружена **новая колебательная мода**. Характерной чертой новой неустойчивости является то, что она проявляет себя также в отсутствие силы тяжести ( $Ga=0$ ) и термокапиллярного эффекта ( $M=0$ ). При этом появляется мода только в рамках небуссинесковского описания, когда вариации плотности достаточно велики, чтобы раскачать деформируемую поверхность. Но действительно ли этот результат является новым? Нам известен цикл работ по *спинодальной декомпозиции* тонких пленок жидкости, который как раз проявляет себя в отсутствие тяжести и термокапиллярного эффекта. В качестве одной из базовых ссылок, можно указать следующие работы: A. Vrij, Possible Mechanism for the Spontaneous Rupture of Thin Free Liquid Films. Discuss. Faraday Soc. 42, 23 (1966). Автор этой работы, ставшей классической в своей области, в рамках линейной модели неустойчивости капиллярных волн показывает, что деформационные флуктуации толщины слоя могут возникать за счет теплового эффекта. Примечательно, что у докторанта нет ни одной ссылки на литературу по данному вопросу, которая насчитывает уже не одну сотню наименований. Разумеется, теоретики, работающие со спинодальной декомпозицией пленок с самого начала работают вне приближений Буссинеска-Обербека, потому что теория тепловой конвекции их не очень интересует. Не может ли быть так, что автор диссертации, выйдя за пределы приближения Буссинеска-Обербека, вошел в «чужую» область ответственности и зафиксировал давно известный физический эффект? Здесь требует пространный и обстоятельный ответ докторанта, так как требуется защитить новизну полученных результатов.
2. На стр. 33 приведены два графика (Рис.2, фрагменты *a* и *б*), где используются нефизические значения параметров. Важный фрагмент (*б*), который иллюстрирует расхождение результатов, полученных в рамках модели Буссинеска-Обербека и альтернативной ей модели, соответствует параметру Буссинеска  $\varepsilon = 0.1$ . Для воды, у которой коэффициент теплового расширения  $10^{-4}$  1/К, перепад температур должен быть более 1000 К! Практически все вычисления Главы 1 сделаны для этих нереалистичных значений параметров. Кстати, соседний фрагмент (*а*) для  $\varepsilon = 0.0001$  отвечает более чем реалистичному нагреву в 1 К. Но как раз для этих реалистичных значений физических параметров никакого отклонения результатов, полученных в рамках

разных моделей, автор не зафиксировал. Получается Рис.2 свидетельствует против основного содержания Главы 1?

3. На стр.83 автор обсуждает возможности экспериментального обнаружения колебательной моды неустойчивости в длинноволновом приближении задачи Марангони - Бенара. Кажется и самому автору, судя по пессимистическому стилю изложения, ясно, что реализовать физический эксперимент в этой ситуации практически невозможно. И тут возникает вопрос, который требует вдумчивого ответа от докторанта. Вообще говоря, на заре конвективной теории естественным образом сформировался следующий подход: производились экспериментальные наблюдения, писались модельные уравнения, находилась конвективная мода, эксперимент получал свое объяснение. Какое-то время назад сформировался подход, в котором все действия выполняются в обратном порядке. Понятно, что *теоретическая гидродинамика*, как вещь в себе и для себя, имеет право на существование (точно также, кстати, как имеет право на существование группа искателей точных решений уравнений гидродинамики среди математиков). В рамках этого подхода попытка изучать конвективную моду, которая возникает исключительно при экстремальных и физически нереализуемых значениях параметра, наверно, можно. Но хотелось бы услышать от автора достаточно продуманную аргументацию – а зачем это нужно, и какую пользу для развития теории гидродинамической устойчивости это может принести?

К этому можно добавить следующие замечания менее принципиального порядка:

4. На стр.6 приводится явно неточное цитирование из монографии Г.З.Гершуни и Е.М. Жуховицкого. Если у докторанта написано: «*В очень толстых слоях термокапиллярной неустойчивостью можно пренебречь*», то в монографии написано более осторожно: «*В толстом слое определяющую роль в возникновении конвекции играет подъемная сила*». И в самом деле, можно привести достаточно примеров, когда и в глубокой кювете развивается энергичное термокапиллярное течение (например, при подогреве сбоку). Кроме того, в монографии акцент делается на моменте возникновения конвекции, т.е. рассмотрение ведется вблизи порога первой бифуркации. При более высоких значениях управляющего параметра капиллярные эффекты могут вызывать интересные перекрестные эффекты, например, для вторичных течений.
5. На стр. 18 автор пишет: «*Результаты вычисления порога возникновения и структуры термокапиллярной неустойчивости тонкой*

*пленки могут быть применены в технологических процессах легирования поверхностного слоя металла».* Здесь требуются пояснения автора, так как легирование – это процесс внесения добавок в расплавленный металл для улучшения его свойств. Какое отношение термокапиллярный эффект имеет к внесению добавок и их диффузии в металле – не очень понятно.

6. На стр. 25 излагается идея предельного перехода, когда параметр Буссинеска стремится к нулю, а число Галилея – к бесконечности. Их произведение (число Рэлея) остается конечным, и только такие конечные параметры должны оставаться в финальных модельных уравнениях, если мы хотим получить корректную модель. Написано правильно, но кажется обидным, что докторант не называет автора этого предельного перехода – Антона Обербека, чья работа была опубликована еще в 1879 году, за 24 года до работы Буссинеска. В более полном виде завершение работы Обербека было выполнено Михаляном ( Mihaljan, J. A rigorous exposition of the Boussinesq approximations applicable to a thin layer of fluid. *Astrophys. J.* 136: 1126-1133 (1962)). Если суть докторантской работы касается отклонения от приближения Буссинеска - Обербека, то такой литературный обзор предыдущих работ должен быть обязательно. Ни той, ни другой ссылки на работы этих классиков в докторантуре не приведено.
7. На стр. 37 приведена дисперсионная кривая на Рис.4д. Кривые на графике обрываются на полпути, что считается в научных публикациях плохим тоном. У читателя естественным образом возникает вопрос – а куда идут эти обрывающиеся кривые? Если они утыкаются в ось ординат, то тогда требуются пояснения автора о происхождении второй длинноволновой моды неустойчивости (колебательной?), видимой на графике. Какие-либо пояснения в тексте о её происхождении отсутствуют.
8. В работе имеется ряд опечаток, ошибок транскрипции, путаницы со ссылками. Общее их количество невелико, но они встречаются в важных местах. Например, на стр. 21 обсуждается личный вклад автора и даются ссылки на публикации из списка ВАК [102,105], одна из которых ведет к неправильной ссылке.

Необходимо отметить, что отмеченные недостатки и возникшие в ходе обсуждения вопросы не влияют на общую положительную оценку работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Докторантша представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, которая содержит новые результаты теории

конвективной устойчивости систем со свободной деформируемой границей раздела сред.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных А.Е. Самойловой, подтверждаются их хорошим соответствием с известными теоретическими результатами других авторов, а также использованием хорошо зарекомендовавших себя теоретических методов исследования.

Текст диссертации и автореферата написан ясным научным языком. Стиль изложения доказательный. Автореферат отражает содержание диссертации. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня. Основные результаты опубликованы в 23 работах, в том числе 2 – в журналах из списка ВАК.

Диссертация полностью соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа **«Конвективная устойчивость горизонтальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела»** удовлетворяет критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а её автор **Самойлова Анна Евгеньевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**.

Диссертационная работа обсуждалась на научно-образовательном семинаре физического факультета Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, протокол заседания № 31 от 07 июля 2015 г. Отзыв заслушан, рассмотрен и утвержден на заседании №42 от 04 февраля 2016 г.

Руководитель семинара,  
профессор кафедры теоретической физики и компьютерного моделирования Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, д.ф.-м.н., телефон: +7 (342) 239-12-83, e-mail: bratsun@pspu.ru

Браун Дмитрий Анатольевич

Секретарь семинара,  
декан физического факультета Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, к.ф.-м.н., телефон: +7 (342) 212-98-84,  
e-mail: polezhaev@pspu.ru

Полежаев Денис Александрович

