

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Бурмистровой Оксаны Александровны “Устойчивость свободных плёнок жидкости и вращающихся жидких слоёв”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность исследований. Развитие технологий, в которых используются неизотермические течения жидкостей со свободными границами, существенно расширило круг задач, изучение которых представляет как фундаментальный, так и практический интерес. К таким задачам можно отнести повышение эффективности и интенсификации процессов теплообмена в различных аппаратах и устройствах: абсорберах, испарителях, конденсаторах, кристаллизаторах, парогенераторах, ректификационных колоннах, электролизёрах. Высокая скорость тепло- и массообмена может быть обеспечена использованием тонких жидких плёнок, именно этим обусловлено их широкое применение. Плёночные течения жидкостей реализуются в тепловых трактах АЭС, системах термического контроля с капиллярной прокачкой теплоносителя, теплообменниках для сжижения природного газа, промышленных установках нефтегазовой, пищевой и химической промышленности. Жидкие плёнки применяют для защиты стенок камер сгорания и сверхзвуковых сопел жидкостных ракетных двигателей, а также в технологиях термического нанесения или осушения покрытий.

Другой класс движений, рассмотренный в диссертационной работе, связан с вращением. Следует заметить, что так или иначе вращение оказывает влияние на все гидродинамические явления на земле. Так, вращение является необходимым фактором для крупномасштабной циркуляции в атмосфере и океане. Использование поля центробежных сил в промышленных установках – ещё один способ повысить эффективность гидродинамических и тепломассообменных процессов. Течение жидкости по вращающимся поверхностям находит применение в центробежных гидродинамических аппаратах, таких как диспергаторы, смесители и центрифуги. В частности, плёночные теплообменники с вращающимися поверхностями используются в технологиях опреснения воды. Другая область применения подобных течений – производство пластиковых труб.

Рассматриваемые автором диссертации геометрические конфигурации являются классическими в теории термокапиллярной конвекции. Тонкие слои жидкости со свободными поверхностями чувствительны к совокупному действию тепловых, гравитационных и механических воздействий, вызывающих неустойчивости различной природы. Учитывая богатство форм неустойчивости, проявляющихся в тонких жидких плёнках, и их недостаточную изученность, несмотря на весьма значительное количество исследований по данной тематике, выбор объекта исследования вполне понятен и объясняет актуальность рассмотренных в диссертации задач.

Актуальность и востребованность работы подтверждается и тем, что она связана с исследованиями, проводимыми ИГиЛ СО РАН в рамках Программ фундаментальных научных исследований Академии наук и проектов, поддерживаемых на конкурсной основе.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность тематики исследования, даётся краткий обзор известных результатов в данной области исследований, формулируются цели и задачи, отмечается новизна результатов и описано их практическое значение, трёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 108 наименований. Объём составляет 86 страниц.

В первой главе изучается устойчивость точного решения задачи конвекции в свободной плёнке жидкости, находящейся под действием термокапиллярных сил в поле силы тяжести. Диссертантом построено точное решение уравнений Навье – Стокса и переноса тепла, описывающее слоистое течение, аналитически определены длинноволновые асимптотики собственного значения соответствующей спектральной задачи и численно определены критические значения волнового числа, характеризующего длину волны возмущения, приводящего к потере устойчивости слоистого течения.

Во второй главе рассматривается задача о плёночном течении в системе со свободными поверхностями, ограниченной по вертикали твёрдыми непроницаемыми стенками. Исходная задача решается в приближении тонкого слоя, а система определяющих уравнений редуцируется к эквивалентной системе трёх уравнений, связывающих массовый расход жидкости через поперечное сечение плёнки, её толщину и осреднённую температуру. Численно получено решение стационарной задачи при краевом угле, близком к $\pi/2$, которое исследовано на устойчивость при различных температурных граничных режимах и значениях ускорения силы тяжести.

Третья глава посвящена исследованию линейной устойчивости неизотермического слоя жидкости на внутренней поверхности вращающегося с постоянной угловой скорости бесконечно протяжённого цилиндра. Рассматриваются монотонные осесимметричные возмущения точного решения определяющей системы уравнений. Аналитически построены длинноволновые и коротковолновые асимптотики нейтральных кривых. В общем случае приводится результат численного решения задачи об устойчивости для различных значений чисел Био и Рейнольдса и радиуса цилиндрической полости. Найдены критические значения числа Марангони и волнового числа. Проведено сравнение с решением задачи Пирсона в предельном случае (при отсутствии вращения и большом безразмерном радиусе полости).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна. К настоящему моменту хорошо известны фундаментальные результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований, полу-

ченные П. Л. Капицей, В. Я. Шкадовым, С. В. Алексеенко, О. А. Кабовым, С. П. Актёршевым, S. Kalliadasis, M. G. Velarde, и др. для плёнок свободно стекающих по твёрдой поверхности или движущихся по горизонтальной пластине. При этом большинство теоретических результатов получены в рамках приближения тонкого слоя. Менее изучены течения жидких плёнок с двумя свободными поверхностями, поэтому многие вопросы, связанные с процессами тепло- и массопереноса в свободных плёнках, остаются открытыми. В настоящее время не вполне понятны механизмы управления тонкими жидкими слоями со свободными поверхностями при совместном влиянии механических, структурных, тепловых и гравитационных факторов, отсутствуют строгие критерии, определяющие условия разрыва плёнок. До сих нет строгой и полной классификации типов неустойчивостей, возникающих в свободных плёнках при различных условиях. Одним из эффективных и полезных инструментов изучения указанных проблем являются точные решения уравнений конвекции, позволяющие исследовать влияние как отдельных факторов, так и их взаимных комбинаций на характеристики возникающих режимов течений.

В диссертационной работе О.А. Бурмистровой получены новые результаты, вносящие вклад в теорию конвективной устойчивости. Научная новизна представленных результатов состоит в следующем:

1. Построено точное решение уравнений конвекции, описывающее плоское стационарное слоистое неизотермическое течение свободной жидкой плёнки. Проведён линейный анализ устойчивости полученного решения, определены критические волновые числа возмущений. Доказана устойчивость изучаемого течения относительно длинноволновых тепловых и гидродинамических возмущений.

2. Для свободной плёнки, находящейся в продольном поле тяжести и ограниченной по вертикали твёрдыми стенками, исходная задача в полной постановке сведена в приближении тонкого слоя к эквивалентной задаче, имеющей в качестве основных уравнений соотношения, связывающие расход, толщину и осреднённую температуру жидкости. Получено условие существования решения, описывающего течение в плёнке с постоянной толщиной, которое связывает характерный перепад температур в системе, длину плёнки, величину ускорения силы тяжести и физические свойства жидкости (формула (2.21)). При различных значениях ускорения силы тяжести доказана «слабая» неустойчивость решения, соответствующего конфигурации с постоянной толщиной плёнки.

3. В рамках линейной теории исследована устойчивость точного решения уравнений Навье – Стокса и переноса тепла, описывающего неизотермическое течение жидкости на внутренней поверхности бесконечно протяжённого цилиндра, вращающегося с постоянной угловой скоростью. Показано стабилизирующее влияние теплообмена на свободной границе и скорости вращения цилиндра. Построены нейтральные кривые в пространстве параметров задачи.

Следует отметить, что все рассмотренные в диссертации задачи являются неизотермическими.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обусловлена выбором корректных, физически обоснованных математических моделей, использованием строгих математических методов теории устойчивости, применением апробированных численных методов и сравнением результатов работы с известными данными, полученными другими авторами для предельных случаев.

Научное и практическое значение работы заключается в выявлении условий возникновения неустойчивостей в рассматриваемых жидкостных системах, которые активно используются во многих технологических процессах. При этом для реализации таких технологий знание критических параметров устойчивости и внутренних механизмов, приводящих к потере устойчивости основного состояния, является чрезвычайно важным. Результаты диссертации могут быть полезны при постановке новых физических экспериментов с целью подбора эффективных параметров для интенсификации тепломассопереноса.

Оценка диссертации. По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. На стр. 16 определён параметр β – коэффициент межфазного теплообмена, присутствующий в правой части граничного условия (1.7), задающего теплообмен с окружающей средой. Обычно коэффициент межфазного теплообмена имеет размерность $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Далее на стр. 24 вводится безразмерный параметр число Био как $Bi = \beta \cdot a$, где a – характерный масштаб длины. Однако с учётом размерности коэффициента β число Био, введённое указанным образом, не является безразмерным. По виду условия (1.7), где в левой части отсутствует множитель коэффициент теплопроводности, приходится только догадываться, что под коэффициентом межфазного теплообмена автор понимает некоторую приведённую величину, связывающую реальный коэффициент теплоотдачи и коэффициент теплопроводности, что, на мой взгляд, не вполне корректно. Поскольку сам коэффициент межфазного теплообмена – это эмпирический параметр, который в общем случае является функцией гидродинамических и тепловых параметров контактирующих сред, геометрии системы.

2. На рис. 1.2, 1.3 приводятся профили скорости жидкости для различных значений расхода жидкости через поперечное сечение. Следовало бы пояснить в тексте диссертации физический смысл выбора отрицательных значений расхода q , который, согласно выбору автора, является заданной величиной. Очевидно, это связано с введённой системой координат? Кроме того, автором рассмотрен случай, когда расход q равен нулю (см. формулу (1.11)). В этом случае в плёнке должны существовать зоны противотока. Интересен был бы анализ механизмов, заставляющих плёнку двигаться вверх, т.е. в направлении противоположном направлению силы тяжести.

3. Для решения возникающих спектральных задач автор использует метод пошагового интегрирования с ортогонализацией в точках останова, предполагающий на заключительном этапе решение нелинейного уравнения для определения комплексных декрементов. На стр. 31 автор указывает, что для решения данного нелинейного уравнения используется метод секущих. Как известно, этот метод требует два начальных приближения для реализации итерационного процесса. В тексте диссертации не указывается способ выбора этих начальных приближений. В качестве одного начального приближения, по-видимому, используется представление для λ_0 , полученное в п. 1.3. Как выбирается второе приближение?

4. В третьей главе диссертант приводит формулы (3.8), определяющие вид решения краевой задачи (3.1) – (3.7). Имеет ли это решение групповую природу? Данное решение построено диссертантом или используется уже известная форма решения?

5. На стр. 59 автор пишет, что для реальных течений число Sr является малым. Каковы значения этого параметра для рассматриваемой в диссертации жидкости?

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки результатов диссертационной работы, их научной и практической значимости.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация О. А. Бурмистровой «Устойчивость свободных плёнок жидкости и вращающихся жидких слоёв», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», соответствует паспорту специальности, имеет теоретический характер и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые результаты теории конвективной устойчивости неизотермических жидкостей со свободными границами.

В работе приведены результаты теоретического и численного исследования устойчивости плёночных течений жидкостей широко применяемых в разнообразных технологических процессах, при этом для описания таких течений построены и проанализированы точные решения определяющих уравнений. К несомненным достоинствам работы следует отнести получение некоторых критических характеристик устойчивости изучаемых течений. Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в 11 печатных работах, из них 3 – в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

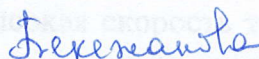
По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Оксаны Александровны Бурмистровой «Устойчивость свободных плёнок жидкости и вращающихся жидких слоёв» удовлетворяет требованиям ВАК

России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно Положению о присуждении учёных степеней в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Бекежанова Виктория Бахытовна



22.08.2019

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: vbek@icm.krasn.ru

Подпись Виктории Бахытовны Бекежановой удостоверяю:

Ученый секретарь ИВМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Вяткин Александр Владимирович



Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН),

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: sek@icm.krasn.ru