

О Т З Ы В

официального оппонента доктора физико-математических наук Демина Виталия Анатольевича на диссертацию Резановой Екатерины Валерьевны **«Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**

Долгие годы теоретическое описание фазовых переходов проводилось без учета такой важной особенности, типичной для всех распределенных систем, как пространственная локализация этих процессов. Это касается фазовых превращений как первого, так и второго рода. Однако в последние годы ученые, работающие в разных областях физики, постепенно начинают преодолевать этот барьер. В качестве успехов при описании фазовых переходов первого рода можно указать многочисленные примеры моделирования процессов по выращиванию кристаллов со сложной динамикой фронта кристаллизации. Определенные достижения можно отметить в области описания фазовых переходов второго рода и смешанного типа в ходе решения задач по пространственному локальному упорядочиванию в жидких кристаллах и магнетиках. К этой же серии работ относится оппонируемая диссертация Резановой Екатерины Валерьевны **«Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела»**, которая посвящена описанию влияния парообразования на динамику многофазных систем различной геометрии с учетом разнообразных осложняющих факторов.

Эта диссертационная работа принадлежит к фундаментальным исследованиям в области механики жидкости и газа, в которой теоретически изучается вклад парообразования в гидродинамические свойства и локальные характеристики систем с межфазной границей раздела. Решенные диссертантом задачи в очередной раз показывают направление, в котором необходимо двигаться, чтобы распространить уже известные физические закономерности, относящиеся к фазовым переходам, на теорию кооперативных явлений в распределенных макроскопических системах и науку о самоорганизации в природе.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст диссертации дополняется списком литературы, содержащим 133 наименования, и пятью приложениями с таблицами параметров, прогоночными коэффициентами и разностными формулами. Общий объем составляет 158 стр., что полностью удовлетворяет нормам, применяемым к кандидатским диссертациям в области физико-математических наук.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, проводится литературный обзор работ в области межфазной гидродинамики, дается краткое описание структуры диссертационной работы, перечисляются основные результаты, которые были получены лично автором.

В первой главе аналитически решается задача о конвективном течении в устойчиво стратифицированной двухслойной системе, состоящей из слоя жидкости постоянной толщины и спутного газа с учетом его прокачки, а также процесса испарения жидкости на

межфазной границе. Осуществляется построение аналогов точных стационарных решений типа Остроумова – Бириха. В верхнем слое рассматриваемой системы гидродинамическое описание движения газа опирается на дополнительное концентрационное уравнение, позволяющее отслеживать перераспределение пара как молекулярной примеси с учетом осложняющих факторов. Иными словами, помимо классических механизмов переноса, таких как конвекция, диффузия и теплопроводность в ходе расчетов учитывались вторичные эффекты, а именно, термодиффузия и диффузионная теплопроводность. В зависимости от степени доминирования того или иного механизма выделено три класса течений: «термокапиллярное», «смешанное» и «пузырейлевское» с характерными профилями скорости и температуры.

Вторая глава посвящена динамике тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости, стекающего по наклонной неоднородно нагретой подложке при наличии испарения со свободной поверхности. В рамках используемой модели предполагалось, что на стекание тонкой пленки оказывает влияние продольное движение газа, которое наряду с термокапиллярным эффектом дает вклад в касательные напряжения. Неустойчивость границы раздела порождает деформацию свободной границы в виде сложного нелинейного эволюционирующего рельефа, описание которого во времени является предметом численного моделирования.

В третьей главе изучена динамика неоднородно нагретого слоя вязкой несжимаемой жидкости со свободными движущимися границами при учете термокапиллярных сил на них. Изменение положения границ слоя со временем рассматривается в контексте описания явления растекания жидких пленок. Задача решается применительно к условиям невесомости. Физической причиной растекания является действие однородного давления, действующего в плоскости слоя со стороны окружающей среды.

В последней четвертой главе рассматривается эволюционная задача о поведении сферической оболочки вязкой несжимаемой жидкости окружающей газовый пузырек. Предполагается также, что этот же газ частично растворен в жидкости и испаряется внутрь сферического слоя, что сопровождается увеличением площади его внешней поверхности и соответственно объема пузырька за счет понижения внешнего давления. Несмотря на существенные ограничения, наложенные на структуру решения в виде только радиального расширения, задача не является простой вследствие учета эффекта испарения газа внутрь концентрического пузырька. Наличие нетривиальных граничных условий приводит к тому, что задача решается численно.

В заключении сформулированы выводы по всем главам, обобщающие результаты диссертационного исследования.

В отношении каждой из глав у рецензента сформировались следующие замечания:

1.1. По введению рецензент считает нужным высказать лишь некоторое сожаление, что все необходимые для диссертации пункты, а именно, актуальность, литературный обзор, перечисление основных результатов, краткое описание структуры диссертации, все это оказалось нагроможденным в одном, довольно большом разделе – во введении без

какого-то деления на подпункты. По мнению оппонента, введение нужно было бы разделить хотя бы на две разные по смыслу части: 1) характеристика диссертации, 2) литературный обзор сторонних работ.

1.2. При описании новизны результатов диссертации на стр. 13 используется утверждение «распространение температуры», что с точки зрения рецензента является лингвистической ошибкой. Температура, как локальное свойство среды, никуда «распространяться» не может.

2.1. По первой главе возникло несколько замечаний. В частности, что автор понимает под пассивной добавкой (стр. 26, глава 1, параграф «Постановка задачи»)? Этот термин встречается в тексте диссертации много раз и нигде в его отношении не дается никакого пояснения. Для нейтрального человека этот термин может означать инертность в химическом отношении. Но в данном контексте это вроде бы очевидно и так, потому что исходно никакие химические превращения в постановке задач не фигурируют. Иногда пассивной называют примесь, которая переносится только конвективно в бездиффузионном приближении. Но конвективные слагаемые и диффузия вроде бы всегда на равных правах присутствуют в используемых уравнениях. Для газов диффузия всегда является существенным фактором переноса. В общем, смысл словосочетания «пассивная примесь» для рецензента остался не очень понятным.

2.2. Еще одно замечание по первой главе касается описания преобразований, связанных с одним из уравнений тепловой конвекции. Утверждается, что «путем дифференцирования уравнения (1.9) по y и дальнейшей подстановки результата в (1.8) можно получить уравнение»:

$$\nu_1 u_{1yyy} = g\beta_1 T_1.$$

Но это не так. Здесь, по-видимому, закралась опечатка. Упомянутое уравнение (1.9) надо дифференцировать не по y , а по x , чтобы затем путем перекрестного дифференцирования исключить давление.

2.3. Каковы рамки применимости результатов, которые были получены в первой главе? Ведь решение типа «Остроумова – Бириха», в общем виде описывающее массовую концентрацию пара в верхнем слое, содержит линейное по продольной координате слагаемое. С другой стороны, концентрация пара не может неограниченно нарастать, как это в принципе разрешено для температуры.

3.1. По второй главе вызывает вопрос наложение условия периодичности при нахождении решения численным методом. Представляется, что именно непериодические решения должны играть ключевую роль в формировании движения пленки вниз по наклонной плоскости.

3.2. К большому сожалению, в диссертации крайне слабо обозначено место решенной задачи в общей картине исследований по стекающим пленкам. В частности, никак не упоминаются работы В.Я. Шкадова, О.Ю. Цвелодуба и многих других авторов по данной тематике.

4.1. В третьей главе не очень понятны выводы, которые можно было бы сделать после просмотра рис. 3.4. В дополнение этот рисунок никак не описан в тексте диссертации. Обсуждение физической картины по сечениям температурных полей, представленных на рис. 3.5 – 3.12, практически отсутствует. А это все-таки основные графические результаты по данной главе, и они требуют расширенных комментариев.

5.1. По четвертой главе не очень понятно, на каком основании начальное распределение газа аппроксимируется именно параболическим профилем (стр. 123, $C_0(r) = \alpha r^2 + \beta r + \gamma$). Вроде бы более естественным для такой модельной задачи было бы взять в качестве начальной концентрации просто константу. Какое-то обсуждение физического смысла этого довольно важного исходного пункта отсутствует. Анализ знака и величины каждой из этих констант α , β и γ не проводится. На рис. 4.3 не обозначена откладываемая по вертикальной оси величина.

Несмотря на наличие недочетов по отдельным рисункам (рис. 3.4 и 4.3) оппонент хотел бы отметить, что в целом диссертация красиво оформлена, и это свидетельствует о тщательной работе автора над текстом. Графический материал выполнен качественно, согласуется с логикой изложения и оптимально структурирован. Из замечаний по оформлению можно упомянуть лишь несколько курьезных опечаток, которые были выявлены оппонентом по ходу прочтения работы:

- 1) Опечатка на стр. 121 « ... квазизотермическую модель ... »
- 2) В автореферате опечатка на стр. 15 (первый абзац) «В силу уравнения неразрывности, ...».

Необходимо отметить, что материалы диссертационной работы широко опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях. Всего Резановой Е.В. опубликовано 14 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, из них 10 – в журналах, включенных в международные базы данных Web of Science и Scopus. Впечатляет список научных мероприятий, на которых в разные годы докладывались результаты, изложенные в диссертации. Все перечисленные в автореферате конференции являются профильными и географически охватывают крупнейшие научные центры РФ по тематике исследований соискателя.

Автореферат соответствует тексту диссертации и в полной мере отражает ее содержание. Единственное замечание по автореферату опять касается используемой терминологии. На стр. 12 при описании результатов третьей главы можно встретить следующее предложение:

«Третья глава посвящена исследованию динамики слоя вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости со свободными границами и *распределения тепла в нем* в трехмерном случае».

Но тепло (количество теплоты) по определению – это количество энергии, передаваемое от одного тела другому при тепловом контакте. Поэтому с точки зрения оппонента словосочетание «распределение тепла» применительно к физике сплошных сред является некорректным. С другой стороны, словосочетание «распределение

температуры» уже представляется осмысленным, т.к. температура это локальное свойство среды. А теплота не является локальной характеристикой среды, поэтому говорить о ее «распределении» в пространстве не верно.

Тем не менее, высказанные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы. Каждая глава диссертации Резановой Е.В. является оригинальной по содержанию и независима от других по излагаемому материалу. В то же время, непересекающиеся по содержанию части диссертации образуют целостную картину по описанию влияния различных факторов на гидродинамические системы с межфазной границей раздела.

Научная новизна полученных результатов в равной степени представлена в каждой главе диссертации, и она заключается в том, что Резановой Е.В. удалось решить ряд новых задач межфазной гидродинамики, органично сочетая аналитические и численные методы исследования. Таким образом, по мнению оппонента работа Резановой Е.В. выполнена весьма квалифицированно и по совокупности изложенного материала представляет собой законченное научное исследование.

Среди достижений соискателя рецензент выделил бы одну важную находку, в отношении которой можно с уверенностью утверждать, что она повлияет в перспективе на дальнейшие изыскания в области межфазной гидродинамики. Представляется, что аналог решения Остроумова – Бириха, полученный для двухслойной парожидкофазной системы, оказывается достаточно богатым на разные режимы стационарного течения. Выделение трех классов решений в виде «термокапиллярного», «смешанного» и «пузелейевского» со специфическими профилями скорости и температуры в зависимости от соотношения параметров порождает целый «Клондайк» задач для теоретика, т.к. каждый вариант течения – это отдельная задача устойчивости с последующим выходом на свою последовательность надкритических режимов конвекции.

Также в качестве еще одного личного достижения автора оппонент указал бы на результаты, полученные в третьей главе, а именно, нахождение решения в 3D постановке в совокупности с реализацией крайне трудоемкой численной процедуры пересчета сетки на каждом временном шаге, что требует от исполнителя чрезвычайно высокой квалификации в области прикладной математики.

Представляется, что результаты диссертационного исследования Резановой Е.В. могут быть востребованы в самых разных областях технической физики от энергетики до микроэлектроники, т.е. там, где приходится иметь дело с теплофизическими задачами по прокачке парожидкофазных систем с искривленными границами и тепломассопереносом через поверхности раздела.

Диссертационная работа Резановой Екатерины Валерьевны по своей актуальности, новизне, объему выполненного исследования, научной и практической значимости полученных результатов вносит значительный вклад в развитие теоретических представлений о поведении гидродинамических систем с межфазной границей,

динамика которых определяется такими сложными для описания эффектами как деформация поверхности раздела, а также тепло- и массообмен между фазами.

Считаю, что диссертационная работа Резановой Екатерины Валерьевны «**Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела**» отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям (в том числе соответствует второй части пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней»), а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы**.

заведующий кафедрой теоретической физики
Пермского государственного национального
исследовательского университета, д.ф.-м.н.
"по специальности 01.02.05 - Механика жидкости,
газа и плазмы", доцент



Демин Виталий Анатольевич
06.05.2019

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, РФ, г. Пермь, ул. Букирева, 15, кафедра теоретической физики.
Рабочий тел. 8 (342) 2396227, e-mail: demin@psu.ru

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Резановой Екатерины Валерьевны «**Моделирование конвективных течений с учетом тепломассопереноса на границах раздела**», и их дальнейшую обработку.



Подпись *В.А. Демин* заверяю
секретарь совета
Е.Б. Андреева