

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Демина Виталия Анатольевича на диссертацию **Шефера Ильи Александровича «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Шефера Ильи Александровича посвящена теоретическому исследованию устойчивости неоднородных по температуре течений в длинном горизонтальном канале применительно к двухслойной системе жидкость-газ при наличии испарения в газовую фазу и с учетом других факторов, отвечающих за взаимное тепловое и гидродинамическое влияние этих сред. Работа выполнена в рамках классической модельной постановки задачи, при решении которой за основу взяты методы теории гидродинамической устойчивости. Таким образом, результаты диссертационного исследования в первую очередь имеют фундаментальное значение в плане накопления, обобщения и систематизации знаний в области гидродинамики и теоретической теплофизики.

Работа состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Диссертация имеет 146 страниц, включая 45 рисунков и 17 таблиц. Список литературы включает 150 источников.

Во **введении** выполнен обзор литературы по теме диссертационного исследования. В соответствии с требованиями к структуре диссертаций обозначены цель и задачи исследования, описаны новизна и научная значимость работы.

В первой главе выполнена постановка задачи о конвективном движении с учетом эффекта испарения в двухслойной системе жидкость-газ в бесконечном горизонтальном слое с плоскими твердыми внешними границами при наличии продольных распределений температуры на них. В качестве определяющих используются известные уравнения Обербека – Буссинеска, дополненные уравнением диффузии, которое описывает перенос пара в несущем газе, и слагаемыми, отвечающими эффектам термодиффузии и диффузионной теплопроводности. Найдено точное стационарное решение поставленной задачи применительно к нескольким наборам граничных условий. Далее ставится задача об устойчивости изучаемого точного решения относительно малых нормальных возмущений. Производится обезразмеривание полученных уравнений для возмущений, описываются возникающие в краевой задаче критерии подобия. Приводится результат линеаризации определяющих уравнений и граничных условий вблизи стационарного решения в виде системы уравнений для пространственных возмущений.

Во второй главе производится описание двухслойных течений с испарением, полученных с помощью точного решения в виде постановки, в которой в качестве граничного соотношения для функции концентрации пара на верхней стенке используется условие Соре, которое с математической точки зрения представляет собой краевое условие второго рода. В качестве изучаемой системы выбрана пара сред «HFE7100 – азот».

Рассмотрено влияние воздействия силы тяжести и геометрии системы на величину массовой скорости испарения, приведены основные типы течений и описаны механизмы, определяющие динамическую и тепловую картину конвективных режимов, возникающих при однородном вдоль канала испарении. Показано, что найденное ранее точное решение позволяет описать формирование чисто термокапиллярных, смешанных и пуазейлевских типов течений, структура которых определяется балансом действующих в системе сил.

Показано, что, управляя сдвигом распределений температур на внешней и нижней границах, можно даже в достаточно узком диапазоне порядка 1-3 градусов добиться существенной перестройки теплового поля, обеспечивая формирование режимов с потенциально устойчивой или неустойчивой температурной стратификацией. При этом, в силу вида точного решения, наличие ненулевого поперечного перепада температур не приводит к перестройке поля скорости. Обсуждается влияние скорости газового потока на параметры режимов течений в двухслойной системе. Показано, что, изменяя величину расхода газа, можно добиться смены типа течения: его увеличение всегда приводит к переходу от чисто термокапиллярного режима к смешанному или от смешанного к пуазейлевскому за счет растущего влияния сдвиговых напряжений на границе раздела.

Производится апробация граничных условий для функций температуры и паросодержания на основе сравнения расчетных и экспериментальных значений относительных изменений массовой скорости испарения для системы сред «этанол – воздух». Установлено, что наилучшее качественное и количественное совпадение обеспечивается при использовании упрощенного условия Неймана для функции концентрации пара на верхней стенке канала и условий Дирихле для функций температуры, задающих линейный нагрев на обеих внешних границах.

В третьей главе численно исследуется устойчивость совместного течения при наличии однородного испарения в системе сред «HFE7100 – азот» относительно плоских возмущений. Результаты решения соответствующей задачи устойчивости получены в виде нейтральных кривых, определяющих пороговые характеристики. Анализируется структура нейтральных кривых и типы неустойчивости при изменении толщин слоев рабочих сред и интенсивности гравитационного воздействия в условиях равной тепловой нагрузки, приложенной на внешних стенках канала.

Решение задачи нахождения наиболее опасных мод подтверждает наблюдаемый экспериментально колебательный характер неустойчивости в двухфазных системах с испарением.

Исследуется влияние поперечного перепада температуры на критические характеристики неустойчивости и типы наиболее опасных возмущений. Показано, что при нагреве снизу даже незначительный перепад в 1 градус дестабилизирует течение, существенно расширяя область неустойчивости. Нагрев сверху достаточно ожидаемо оказывает стабилизирующее воздействие на систему.

Четвертая глава посвящена численному исследованию устойчивости стационарного решения относительно общего вида пространственных возмущений. Результаты решения соответствующей задачи об устойчивости получены в виде нейтральных поверхностей на плоскости волновых чисел. Показано, что для большинства рассмотренных конфигураций пространственные возмущения являются более опасными, чем плоские. Пространственная неустойчивость в двухфазной системе проявляется в форме валиковой конвекции, для которой характерно возникновение упорядоченных продольных и поперечных структур различной топологии.

В первую очередь изучено влияние геометрии системы, интенсивности гравитационного воздействия и дополнительного нагрева снизу на пороговые характеристики пространственной неустойчивости в случае недеформируемой межфазной границы. Описаны характерные формы возникающих возмущений, которые зависят от типа основного течения.

Влияние деформируемости границы раздела под действием возмущений на характеристики устойчивости анализируется в последнем содержательном разделе диссертации. Показано, что для рассматриваемых конфигураций и условий (определяются толщинами слоев и величиной ускорения силы тяжести) при малых температурных градиентах всегда возможно существование устойчивых режимов стационарных течений. Изменение баланса сил приводит к смене типа наиболее опасных возмущений. В системе с тонким жидким слоем наиболее опасными являются плоские возмущения, т.е. неустойчивость проявляется в форме поперечных валов, дрейфующих вдоль потока. Также обнаружена возможность образования поперечных двумерных волн на поверхности испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком, с последующим развалом в трехмерные структуры, что подтверждено экспериментально. С увеличением толщины слоя жидкости до 5 мм сначала будут возникать термокапиллярные продольные структуры, отвечающие «спиральным» возмущениям. При пониженной гравитации термокапиллярный эффект имеет дестабилизирующее влияние: в тонких слоях неустойчивость проявляется при меньших значениях градиента в форме «спиральных» возмущений.

В приложениях к диссертации приведены алгоритмические детали компьютерных расчетов и описаны физико-химические параметры рабочих сред.

В заключении представлены основные результаты и определены перспективы дальнейшей деятельности.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием апробированных теоретических методов, которые прошли многолетнюю успешную верификацию в международном сообществе, занимающемся решением задач гидродинамической устойчивости. Надежность использованных методов, непротиворечивость полученных результатов и сравнение с данными других авторов гарантируют техническую корректность полученных результатов.

Соискателем получены следующие **новые результаты**:

1. Построено точное решение уравнений термоконцентрационной конвекции, описывающее течения в двухслойной системе жидкость-газ с продольным градиентом температуры, которое позволяет модельно учесть вклад неоднородного режима испарения на межфазной границе. На основе сравнения теоретических данных, полученных с помощью нового точного решения, и результатов экспериментов выполнен анализ различных постановок краевых задач испарительной конвекции, выделены содержательные постановки, обеспечивающие качественное согласование теоретических и экспериментальных данных. На основе точных решений проведено систематическое изучение характеристик конвективных режимов в двухфазных системах жидкость-газ, возникающих в условиях диффузионного испарения, во всем пространстве параметров соответствующих задач; предложено расширение классификации Наполитано режимов двухслойных течений с термокапиллярной границей раздела.
2. Проведено исследование линейной устойчивости стратифицированных двухфазных течений с однородным испарением в миниканалах, описываемых точным решением исходных уравнений, относительно плоских и пространственных возмущений, определены критические характеристики устойчивости, проведена селекция мод, построены карты режимов неустойчивости. Установлен преимущественно колебательный характер режимов неустойчивости, определены частоты осцилляций наиболее опасных возмущений, возникающих в форме упорядоченных конвективных (ячеистых) или термокапиллярных (продольных) структур в жидкости.
3. Показано стабилизирующее влияние деформируемости межфазной границы на характеристики устойчивости течений испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком.

Диссертация прошла все необходимые **этапы апробации**. Результаты исследований были представлены на многочисленных профильных конференциях всероссийского и международного уровней, а также подробно обсуждены на научных семинарах у авторитетных ученых по соответствующей научной специальности. Полученные результаты были опубликованы в 8 полновесных статьях в рецензируемых

научных журналах, которые индексируются в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также отечественной системе цитирования РИНЦ.

По результатам анализа диссертационного исследования у рецензента возникли следующие замечания и вопросы:

1. В предлагаемой физико-математической модели никак не учитывается неизбежный переход несущего газа в насыщенное состояние. Понижение температуры вниз по потоку в любом случае должно привести к тому, что в какой-то момент достигается точка конденсации, и это должно кардинально изменить поведение физической системы. Иными словами, неограниченное повышение или понижение температуры вдоль продольной координаты в рассматриваемой постановке приводит к непреодолимым противоречиям. Таким образом, требуется более строгое установление рамок применимости предлагаемой физико-математической модели.

2. В третьей главе делается вывод (см., в том числе, автореферат):

В условиях пониженной гравитации реализуется термокапиллярная неустойчивость; в ряде случаев может наблюдаться сосуществование термокапиллярного и конвективного механизмов неустойчивости, которому отвечают разные формы наиболее опасных характеристических возмущений.

Однако представляется, что в реальных условиях пониженной гравитации делать такой вывод, не учитывая при этом возможность деформирования межфазной границы, не корректно. Зачем надо было выходить за рамки применимости модели, если в последующей четвертой главе учет деформируемости межфазной границы все же был выполнен?

3. Очень “модельными” и необоснованными представляются предположения о либо постоянном, либо линейном законах, описывающих скорость испарения. Теория Герца-Кнудсена требует однозначной связи процесса испарения с температурой поверхности, а не с координатой.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. В нем представлены все необходимые разделы, а именно, показана актуальность диссертационного исследования, четко сформулированы цели и задачи работы, продемонстрирована новизна и указана значимость защищаемых результатов, подтверждена апробация материалов диссертации, очерчено их место в той области знаний, по которой осуществляется защита.

В отношении автореферата у рецензента сложилось лишь одно небольшое замечание. А именно, при постановке задачи на первом рисунке вообще никак не представлена информация о распределении температуры в рассматриваемой гидродинамической системе. Читателю, который видит тут же в тексте уравнение переноса тепла, упоминание о конвекции, термокапиллярных силах и об эффекте

Соре остается только гадать, какие пространственные неоднородности температуры все это вызывают.

Тем не менее, несмотря на сделанные замечания можно констатировать, что по совокупности полученных результатов, научной значимости рассмотренных вопросов, грамотности и педантичности при использовании математических (численных) методов и подходов диссертация Шефера Ильи Александровича «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении» является законченным научным исследованием в области теории гидродинамической устойчивости. В то же время, она представляет несомненный интерес с точки зрения приложения обнаруженных и описанных конвективных эффектов в теплофизике и гидродинамике многофазных сред, подразумевающих наличие границ раздела, которые зачастую оказывают определяющее влияние на общее поведение этих систем.

В качестве заключения следует отметить, что работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней", а ее автор, **Шефер Илья Александрович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

заведующий кафедрой теоретической физики
Пермского государственного национального
исследовательского университета, доктор
физико-математических наук, профессор

 **Демин Виталий Анатольевич**

11 мая 2023 г.

demin@psu.ru , рабочий тел.: 8 (342) 2396227, 8 (342) 2396208
адрес места работы: 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,
Пермский государственный национальный исследовательский
университет, кафедра теоретической физики

Я, Демин Виталий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации **Шефера Ильи Александровича «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении»**, и их дальнейшую обработку.



Подпись *В.А. Демина* заверяю
Ученый секретарь совета
Е.А. Антонова