

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 16.07.2020 № 56

О присуждении Петухову Максиму Ивановичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Тепловая конвекция в узких каналах и полостях с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 23.03.2020, протокол № 52, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Петухов Максим Иванович 1989 г. рождения, в 2016 г. окончил ФГБОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет по направлению подготовки «Физика». В 2020 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в ФГБОУ ВО Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ) по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертация выполнена на кафедре теоретической физики ПГНИУ. В настоящее время работает ассистентом кафедры общей физики ПГНИУ.

Научный руководитель – д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой теоретической физики ПГНИУ Демин Виталий Анатольевич.

Официальные оппоненты:

1. Марчук Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, декан механико-математического факультета ФГАОУ ВО Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, (г. Новосибирск);
2. Перминов Анатолий Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, (г. Пермь);

дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский государственный университет", г. Томск, в своем положительном заключении, составленным Шереметом Михаилом Александровичем, д.ф.-м.н., доцентом, заведующим кафедрой теоретической механики ФГАОУ ВО НИТГУ и Мирошниченко Игорем Валерьевичем, к.ф.-м.н., доцентом кафедры теоретической механики ФГАОУ ВО НИТГУ и утвержденном проректором по научной и инновационной деятельности

ФГАОУ ВО НИТГУ А.Б. Ворожцовым, указала, что разработанные вычислительные модели, описывающие тепломассоперенос жидкостей в узких каналах с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости, а также численные алгоритмы для их реализации позволили получить новые физические результаты в области механики жидкости и газа. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается использованием проверенных методов математического моделирования, а также сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными. Представленная диссертационная работа «Тепловая конвекция в узких каналах и полостях с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Петухов Максим Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискателем опубликовано 8 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. Демин В.А., **Петухов М.И.** О влиянии зависимости вязкости от температуры на стационарные конвективные течения в ячейке Хеле – Шоу // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». 2017. Том 9, № 2. С. 47-54.

В работе продемонстрировано влияние температурной неоднородности вязкости на формирование течений в ячейке Хеле – Шоу с равномерным подогревом снизу. Определены сценарии интенсификации конвекции с ростом надкритичности. Выполнен линейный анализ устойчивости.

2. Демин В.А., **Петухов М.И.** Крупномасштабный перенос компонентов металлических расплавов в тонких капиллярах // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 48. С. 57–69.

В работе проанализировано влияние температурной и концентрационной неоднородностей поверхностного натяжения на формирование в капилляре с несмачиваемыми стенками неоднородностей концентрации двухкомпонентной смеси металлов.

3. Shmyrov A., Mizev A., Demin V., **Petukhov M.**, Bratsun D. On the extent of surface stagnation produced jointly by insoluble surfactant and thermocapillary flow // Adv. Colloid Interface Sci. 2018. Vol. 255. P. 10-17.

Статья посвящена анализу граничных условий, необходимых для описания поведения пленки нерастворимого сурфактанта на свободной поверхности жидкости. Учтена возможность его перехода из газового состояния в жидко-расширенное. Также показана нелинейность распределения температуры вдоль поверхности при возникновении точки стагнации.

4. Demin V.A., Mizev A.I., **Petukhov M.I.** On Thermocapillary Mechanism of Spatial Separation of Metal Melts // Microgravity Sci. Technol. 2018. Vol. 30. P. 69-76.

В статье приводится сравнение профилей скорости, объемной и поверхностной концентрации для разных значений управляющих параметров в процессе разделения двухкомпонентной смеси металлов в тонком капилляре с несмачиваемыми стенками.

5. Демин В.А., Мизев А.И., **Петухов М.И.** Сепарация бинарных сплавов в тонких капиллярах // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Том 11, № 1. С. 125-136. *В работе рассматривается разделение двухкомпонентных смесей металлов в цилиндрическом капилляре с несмачиваемой стенкой. Проанализировано влияние коэффициентов адсорбции-десорбции на результат разделения изначально однородной смеси. Установлено большее влияние стенок на процесс возникновения неоднородностей по сравнению с плоским капилляром.*

6. Демин В.А., Мизев А.И., **Петухов М.И.**, Шмыров А.В. Разделение легкоплавких металлических расплавов в тонком наклонном капилляре // Известия РАН. МЖГ. 2019. № 1. С. 3-16.

Статья посвящена изучению влияния наклона капилляра с несмачиваемыми границами на возникновение в нем неоднородностей концентрации двухкомпонентной смеси металлов за счет внешнего перепада температур. Проведено сравнение с результатами экспериментов.

7. Demin V.A., Mizev A.I., **Petukhov M.I.**, Shmyrov A.V. Localization of melt components in a crucible as a result of inserting anisothermic rod with non-wettable boundaries // Microgravity Sci. Technol. 2020. Vol. 32. P. 89-97.

В работе проводится анализ разделения двухкомпонентной смеси металлов, помещенных в тигель с твердыми стенками, в который погружен алундовый стержень с несмачиваемыми границами и заданным распределением температуры.

8. Shmyrov A.V., Mizev A.I., Demin V.A., **Petukhov M.I.**, Bratsun D.A. Phase transitions on partially contaminated surface under the influence of thermocapillary flow // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 877. P. 495-533.

Статья посвящена изучению динамики нерастворимого сурфактанта на свободной неоднородно нагретой поверхности жидкости. Рассмотрена роль перехода сурфактанта из газового состояния в жидко-расширенное при образовании на межфазной поверхности точки стангнации.

Публикации содержат в сумме 111 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Марчука И.В. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность избранной темы; обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций; научная новизна. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о конкретном технологическом применении полученных в диссертации результатов;
- пожелание обоснования использования линейного приближения зависимости вязкости от температуры;
- вопрос о точности численного решения;
- замечания по поводу опечаток.

2. Положительный отзыв официального оппонента Перминова А.В. В отзыве отмечено, что фундаментальные результаты, полученные в диссертации, имеют несомненную теоретическую и практическую значимость, могут быть полезны при проектировании технологических систем. Оппонент отмечает следующие замечания:

- пожелание прямого сравнения некоторых результатов, полученных в диссертации, с ранее проведенными экспериментами;
- вопрос о справедливости выбора значений управляющих параметров;
- вопрос о необходимости разделения расчетной области на несколько сегментов;
- вопрос о математической постановке задачи: процедуре получения конечных уравнений, приближении плоских траекторий, выборе граничных условий;
- замечание об отсутствии единообразия в оформлении рисунков.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что полученные по итогам численных экспериментов результаты могут быть востребованы специалистами в области материаловедения, ядерной энергетики, биофизики и др., так как используемые исходные и конечные продукты в данных отраслях промышленности часто производятся из субстратов, находящихся в жидком состоянии. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Институте теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермском государственном национальном исследовательском университете, Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Институте теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук, а также в других организациях. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- вопрос о необходимости использования линейного приближения зависимости вязкости от температуры вместо более реалистичных законов;
- вопрос о сравнении подхода использования производства энтропии, применявшегося в диссертации с подходом Адриана Бежана;
- вопрос о методе вычисления вихря в угловых точках;
- вопрос о необходимости использования суперкомпьютера;
- замечание по поводу опечатки.

На автореферат поступило 6 отзывов:

1. Положительный отзыв от Ингеля Л.Х., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Института экспериментальной метеорологии, ФГБУ НПО "Тайфун" (Росгидромет), г. Обнинск (1 замечание);
2. Положительный отзыв от Полежаева Д.А., к.ф.-м.н., доцента, декана физического факультета ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет", г. Пермь (4 замечания);
3. Положительный отзыв от Цибулина В.Г., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону (1 замечание);

4. Положительный отзыв от Рыжкова И.Г., д.ф.-м.н., ведущего научного сотрудника отдела дифференциальных уравнений механики ФГБУН "Институт вычислительного моделирования Красноярского научного центра СО РАН", г. Красноярск (без замечаний);
5. Положительный отзыв от Демехина Е.А., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией электро- и гидродинамики микро- и наномасштабов ФГБОУ ВО "Финансовый университет при Правительстве РФ (филиал)", г. Краснодар (2 замечания);
6. Положительный отзыв от Пономарева Р.С., к.ф.-м.н., доцента кафедры нанотехнологий и микросистемной техники ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (без замечаний).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- вопрос о критических числах Рэлея для рис. 1;
- замечания о неполноте математической формулировки задач;
- отсутствует описание вычислительных средств для проведения численных экспериментов;
- замечание к подписи рис. 2 и рис. 7;
- во 2-й главе не понятно, о какой жидкой среде идет речь;
- в 3-й главе не пояснено, как задается неоднородность температуры вдоль капилляра;
- вопрос о сравнении результатов главы 4 с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов;
- вопрос о смысле фразы «...в зависимости от полноты экспериментального материала, результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, полностью согласуются с опытом»;
- вопрос о смысле фразы «...регулярная сила»;
- вопрос о значении коэффициентов поверхностной диффузии, адсорбции и десорбции.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области физической гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований различных гидродинамических систем; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, является одним из ведущих научных центров в области физической гидродинамики, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по широкому спектру проблем физики и механики высокоэнергетических процессов, механики жидкостей и газов, механики деформируемого твердого тела. Университет является учредителем более 30 научных

изданий, среди которых: "Russian Physics Journal", "Вестник Томского государственного университета. Математика и механика", включенные в международные базы WoS и Scopus. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры теоретической механики в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана математическая модель, описывающая гидродинамические процессы в неоднородно нагретых узких каналах и полостях при наличии сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости.

предложено объяснение эффекта разделения двухкомпонентных металлических расплавов в тонких капиллярах с плохо смачиваемыми твердыми границами. Получено количественное описание этих процессов.

доказаны возможности разделения двухкомпонентной смеси металлов за счет возникновения неоднородностей поверхностного натяжения вблизи несмачиваемых стенок полости и управления термокапиллярным течением в объеме фазовым переходом нерастворимого сурфактанта из газового состояния в жидкорасширенное; наличие вариационного принципа, определяющего перестройку стационарных конвективных режимов в ячейке Хеле-Шоу;

введены безразмерные критерии, позволяющие предсказывать перераспределение компонентов металлических смесей вдоль неоднородно нагретых плохо смачиваемых твердых границ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что учет в теоретической модели зависимости теплофизических параметров от локальных характеристик среды позволяет объяснить и количественно описать эффект разделения двухкомпонентной смеси металлов в тонких капиллярах с несмачиваемыми границами, управлять термокапиллярным течением в объеме и фазовым переходом нерастворимого сурфактанта из газового состояния в жидкорасширенное, объяснить перестройку стационарных конвективных режимов в ячейке Хеле-Шоу. Все это представляется крайне востребованным при проведении экспериментов с сильными пространственными неоднородностями среды и реализации сложных технологических процессов в промышленном производстве.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы разложения решений дифференциальных уравнений в ряды и методы линейной теории устойчивости, реализованы различные модификации методов конечных разностей;

изложена теория разделения смесей жидких металлов в тонких капиллярах с плохо смачиваемыми границами; представлены способы управления этими процессами путем

введения в расплав рабочего стержня с несмачиваемой поверхностью, на котором поддерживается заданное распределение температуры;

раскрыты недостатки предшествующих подходов к решению задачи о разделении смесей жидких металлов в тонких капиллярах; объяснено несоответствие результатов экспериментов и предшествующей теории в отношении положения точки стагнации для неоднородно нагретой пленки нерастворимого сурфактанта в ячейке Хеле-Шоу;

изучены гидродинамические переходы от одного стационарного режима к другому в ячейке Хеле-Шоу при учете температурной зависимости вязкости рабочей жидкости; **изучены** факторы, влияющие на степень разделения смесей жидких металлов в тонких капиллярах; динамика пленки нерастворимого сурфактанта на поверхности жидкости в ячейке Хеле-Шоу;

проведена модернизация граничных условий на межфазной поверхности для жидкости, частично покрытой пленкой нерастворимого сурфактанта.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены методики разделения смесей жидких металлов в полостях с плохо смачиваемыми стенками;

определены пределы применимости построенной математической модели, описывающей разделение смесей;

создана компьютерная программа, позволяющая моделировать совместное поведение пленок сурфактанта и объемного течения для различных тепловых условий;

представлены рекомендации для эффективного управления процессом разделения металлических расплавов на компоненты вблизи несмачиваемых твердых границ полости.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на проверенных данных и в предельных случаях согласуется со всеми известными работами других авторов;

идея базируется на анализе и обобщении известных экспериментальных данных, опубликованных в российских и зарубежных изданиях;

использованы результаты экспериментов И.А. Бабушкина по стационарным конвективным течениям неоднородно вязких жидкостей в ячейке Хеле-Шоу, И.В. Гаврилина по разделению жидких металлов в тонких капиллярах, А.И. Мизева и А.В. Шмырова по динамике нерастворимого сурфактанта в прямоугольном контейнере;

установлено качественное и в ряде задач количественное согласие результатов численного моделирования и известных экспериментальных данных;

для расчетов **использованы** эффективные вычислительные методы и современное оборудование в виде суперкомпьютера научно-образовательного центра ПГНИУ "Параллельные и распределенные вычисления".

Личный вклад соискателя состоит в

– непосредственном получении всех защищаемых результатов диссертационного исследования;

– анализе результатов исследования и их сравнении с данными экспериментов совместно с научным руководителем и остальными соавторами;

– самостоятельном представлении полученных результатов на научных семинарах, международных и всероссийских конференциях.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием логически непротиворечивого плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи математического моделирования течений жидкостей с ярко выраженными локальными неоднородностями вязкости и поверхностного натяжения в узких каналах и полостях.

На заседании 16 июля 2020 г. диссертационный совет принял решение присудить Петухову М.И. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного совета Д 004.036.01
д.т.н., профессор, академик РАН
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович

 Зуев А.Л.

17 июля 2020 г.

