

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и инновационной
деятельности Национального
исследовательского Томского
государственного университета
доктор физико-математических наук,
профессор



А. Б. Ворожцов

« 30 » марта 2020 г.

О Т З Ы В

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на диссертацию Максима Ивановича Петухова «Тепловая конвекция в узких каналах и полостях с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертационной работы.

Задачи гидродинамики и теплопереноса в условиях переменности вязкости рабочей среды, а также температурной неоднородности поверхностного натяжения имеют важное практическое значение для многих инженерных приложений в энергетике, металлургии, химической промышленности. Изучение сложных технологических процессов в отмеченных отраслях промышленности осложняется не только широким спектром механизмов теплопереноса, но и большим количеством определяющих параметров, оказывающих влияние на развитие процесса. Поэтому решение таких задач должно проводиться как на основе экспериментальной проработки отдельных физических эффектов, так и с помощью современных подходов механики жидкости и газа.

В этой связи, диссертационная работа Максима Ивановича Петухова «Тепловая конвекция в узких каналах и полостях с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости», посвященная численному и

аналитическому изучению течений жидкостей с ярко выраженными локальными неоднородностями вязкости и поверхностного натяжения, является актуальной. Более того, для теоретического исследования представленных особенностей соискателем разработаны модели, которые позволяют адекватно оценить, в том числе, и разнообразные поверхностные эффекты.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 52 иллюстрации и 5 таблиц. Она состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 148 наименований.

Во введении дается краткая характеристика работы, описывается ее структура, формулируются цели исследования, отмечается теоретическая и практическая значимость, а также достоверность полученных результатов.

В первой главе представлен краткий обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований, посвященных влиянию неоднородности локальных характеристик на развитие термогидродинамических структур в жидкостях. Проанализированы работы как зарубежных, так и отечественных ученых. Приведенный литературный обзор отражает современный этап развития исследований, которые напрямую связаны с тематикой диссертации.

Вторая глава посвящена изучению процессов теплопереноса в ячейке Хеле – Шоу при равномерном подогреве снизу в условиях температурной неоднородности вязкости рабочей среды. Узкие горизонтальные грани полости были идеально теплопроводными, в то время как широкие вертикальные грани обладали конечной теплопроводностью. Автором детально изложены используемые методы решения рассматриваемой задачи, а также перечислены принятые в диссертационной работе допущения. Система уравнений в приближении Буссинеска с учетом температурной неоднородности вязкости формулируется в безразмерных переменных «функция тока – завихренность». Сформулированы граничные и начальные условия. Численные расчеты проводились на суперкомпьютере Научно-образовательного центра «Параллельные и распределенные вычисления» Пермского государственного национального исследовательского университета «ПГУ – Тесла». Проведено детальное сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными других авторов. Сравнение показало, что учет температурной неоднородности вязкости необходим для реализации экспериментального сценария развития течения.

Третья глава посвящена решению задачи разделения двухкомпонентных эвтектических смесей жидких металлов, заключенных в тонком кварцевом или алундовом канале. Для описания конвективных течений бинарной молекулярной смеси сформулированы уравнения для несжимаемой жидкости, представляющие собой систему гидродинамических уравнений в приближении Буссинеска, а также уравнение для поверхностной концентрации с учетом адсорбционно-десорбционных процессов. Сформулированы также граничные и начальные условия. Система дифференциальных уравнений совместно с краевыми условиями решена методом конечных разностей. Данная модель была реализована для случаев как вертикально ориентированного, так и наклонного тонкого капилляра. Задача конвективного переноса в двумерном тонком канале с несмачиваемыми границами решена также аналитически. Стоит отметить, что предложенная в данной главе теоретическая модель позволяет объяснить аномальное разделение двухкомпонентной смеси Al-Si с инверсионным продольным распределением компонентов. Продемонстрировано хорошее согласие полученных результатов с данными эксперимента, по таким параметрам как, время разделения смеси, конечная форма профилей концентрации в поперечном и продольном сечении капилляра, величина разделения смеси и влияние на нее угла наклона капилляра.

В четвертой главе исследована термоконцентрационная и термокапиллярная конвекция в прямоугольном контейнере при наличии сурфактанта на свободной поверхности. Рассмотрены случаи, когда поверхностно-активное вещество было как нерастворимым, так и растворимым за счет добавления в модель механизмов адсорбции-десорбции. Для случая нерастворимого сурфактанта определены характерные условия, при которых на поверхности возникает точка стагнации, отделяющая свободный участок поверхности от области, покрытой пленкой сурфактанта. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для случая растворимого сурфактанта исследована ситуация, при которой в центре полости формируется “концентрационный язык” нейтральной плавучести. Его появление связано с охлаждением поверхностно-активного вещества после проникновения в объем и дальнейшим движением вдоль холодной стенки в нижнюю часть ячейки. Показано, что сама поверхность, в отличие от случая с нерастворимым сурфактантом, не очищается термокапиллярным течением полностью.

В заключении описаны основные выводы, полученные в рамках выполнения диссертационной работы.

Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты исследований:

1. Получено теоретическое обоснование проблемы формирования стационарных конвективных течений в ячейке Хеле – Шоу при равномерном подогреве снизу. Для данной гидродинамической системы выявлен вариационный принцип, согласно которому происходит выбор наиболее предпочтительного течения при конкуренции нескольких стационарных режимов.

2. Разработана математическая модель, позволяющая объяснить перераспределение компонентов эвтектических расплавов металлов при их взаимодействии с неоднородно нагретыми поверхностями стенок капилляров из кварцевого стекла или алунда. Проведено численное моделирование процесса разделения в задачах с различными рабочими смесями и геометрическими постановками.

3. Установлено влияние фазового перехода в пленке нерастворимого поверхностно-активного вещества на образование и динамику точки стагнации на поверхности жидкости при неоднородном нагреве сверху. Для случая растворимого сурфактанта определены условия возникновения области нейтральной плавучести струйного движения, несущего примесь.

Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается использованием проверенных методов математического моделирования, обязательной верификацией применяемых для моделирования алгоритмов, а также сопоставлением полученных результатов с экспериментальными данными. Точность расчетных схем и густота сеток всегда контролировалась, чтобы добиться приемлемых значений погрешностей.

Теоретическая и практическая значимость работы. 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. 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.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы М.И. Петухова 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.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. По материалам диссертации опубликовано 30 работ; 8 статей в периодических изданиях из перечня ВАК, из них 7 индексируются в международных базах данных Scopus и Web of Science. Все опубликованные работы соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают содержание, выводы и заключение диссертации.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. При численном исследовании тепломассопереноса в жидкости, заполняющей ячейку Хеле – Шоу, в условиях равномерного подогрева снизу предполагается, что вязкость уменьшается с ростом температуры по линейному закону $\nu = \nu_0(1 - \varepsilon T)$. Чем обусловлен выбор линейного закона и не проводился ли отдельный анализ для случая нелинейной зависимости вязкости от температуры (например, с использованием широко распространенной экспоненциальной зависимости)?

2. Для вычисления производства энтропии в диссертационной работе использовалась классическая формула, предложенная Л.Д. Ландау. Не предпринимались ли попытки использовать подход Адриана Бежана из университета Дьюка (США) по оптимизации технических систем на основе метода минимизации производства энтропии?

3. При численном решении задачи о стекании тяжелого поверхностно-активного компонента по затравочному стержню в тигле не указано, каким образом определялись значения завихренности в угловых точках. При этом известно, что в задачах конвективного теплопереноса граничные условия для завихренности скорости могут являться причиной развития вычислительной неустойчивости.

4. Непонятно, чем обусловлена необходимость использования суперкомпьютера при проведении численного исследования в главах 2 и 3.

5. На рисунке 3.4 (стр. 67 диссертации) представлено сравнение полей функции тока, температуры и концентрации для аналитического и численного решений. В подписи к рисунку присутствует опечатка.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение.

По своим целям и задачам, содержанию и методам исследования диссертация М.И. Петухова соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки) по областям исследования «Тепломассоперенос в газах и жидкостях» (п. 15 паспорта специальности), «Аналитические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные методы)» (п. 18 паспорта специальности).

Учитывая актуальность тематики, новизну и практическое значение полученных результатов, считаю, что диссертация «Тепловая конвекция в узких каналах и полостях с учетом сорбционных процессов и температурной зависимости вязкости» удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор Петухов Максим Иванович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составили заведующий кафедрой теоретической механики Томского государственного университета, заведующий научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса Томского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент Шеремет Михаил Александрович и доцент

кафедры теоретической механики Томского государственного университета, кандидат физико-математических наук Мирошниченко Игорь Валерьевич.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены на объединенном научном семинаре кафедры теоретической механики и научно-исследовательской лаборатории моделирования процессов конвективного теплопереноса 30 марта 2020 года, протокол № 22.

Заведующий кафедрой теоретической механики
Томского государственного университета,
заведующий научно-исследовательской лабораторией
моделирования процессов конвективного теплопереноса,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
доцент

Шеремет Михаил Александрович

Доцент кафедры теоретической механики
Томского государственного университета,
кандидат физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Мирошниченко Игорь Валерьевич

30.03.2020

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52; www.tsu.ru, rector@tsu.ru)

