

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Перминова Анатолия Викторовича

на диссертационную работу Петухова Максима Ивановича

### «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

Диссертация Петухова М.И. посвящена изучению закономерностей конвективных течений сложных жидкостей и созданию математических моделей таких жидкостей, в которых учитываются температурная неоднородность вязкости, температурная и концентрационная неоднородность поверхностного натяжения, адсорбционные и десорбционные процессы, проявляющиеся на межфазных поверхностях. Диссертантом четко сформулирована **цель работы**, которая заключается в «аналитическом и численном исследовании течений жидкостей с ярко выраженными локальными неоднородностями вязкости и поверхностного натяжения».

В работе **впервые** установлена роль температурной неоднородности вязкости жидкости при смене одного стационарного течения другим в ячейке Хеле – Шоу, и определен вариационный принцип, согласно которому происходит выбор наиболее предпочтительного течения при конкуренции нескольких стационарных режимов. **Впервые** построена математическая модель, объясняющая процесс разделения двухкомпонентных эвтектических металлических расплавов в тонких капиллярах. На основании численных расчетов получены **новые данные** о влиянии 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 **впервые** определены условия возникновения области нейтральной плавучести струйного движения, несущего примесь.

В настоящее время во многих отраслях промышленности исходные и конечные продукты производятся из субстратов, находящихся в жидком состоянии. При наличии неоднородностей температуры и дополнительных осложняющих факторов в рассматриваемых средах возникает конвективный массоперенос и локальные термодинамические потоки, сопровождающиеся переносом тепла, что сильно осложняет возможности управления процессом. Локальность физических процессов не позволяет описывать физические явления интегрально с помощью простых зависимостей и формул, а требует решения сложных систем дифференциальных уравнений. **Актуальность** исследований, представленных в диссертации, состоит в том, что реализованные математические и численные модели позволяют понять особенности возникновения и эволюцию конвективных течений в условиях, когда решающую роль играют локальные температурные неоднородности вязкости, концентрации примеси, поверхностного натяжения, а также процессы адсорбции и десорбции на межфазных поверхностях. Все это позволяет использовать разработанные модели при решении **актуальных технологических задач**, связанных с получением сверхчистых материалов, а также при проектировании и разработке систем, в которых требуется управление конвективными режимами.

Результаты, полученные для стационарных конвективных течений неоднородновязких жидкостей в ячейке Хеле – Шоу, имеют **теоретическую и практическую значимость** для теплофизических приложений. Перенос массы и теплоотвод сильно зависят от режима движения жидкости. Отбор того или иного сценария установления течения, умение управлять этим процессом являются **актуальными** при конструировании и эксплуатации различных теплообменных устройств и технологических линий. Математическая модель и результаты расчетов, полученные при описании эффекта разделения эвтектических металлических расплавов в тонких капиллярах, **могут представлять практический интерес** для микроэлектроники, при совершенствовании оптоволоконных технологий и получении сверхчистых материалов. Результаты, касающиеся моделирования поведения пленок ПАВ на неоднородно нагретых поверхностях несущей жидкости, расширяют **фундаментальные представления** о технологии очистки поверхностей от загрязняющих веществ. Выявленные механизмы позволяют управлять концентрацией сурфактанта на поверхности в зависимости от внешних условий.

**Достоинством диссертации** является качественное и количественное сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными и с известными предельными случаями, что позволяет сделать вывод об адекватности построенных моделей. Кроме того, применявшиеся в ходе расчетов численные методики верифицировались. Точность расчетных схем и густота сеток всегда контролировалась, чтобы добиться приемлемых значений вычислительных погрешностей. Все это в совокупности обеспечивает **достоверность**, полученных в работе результатов.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 148 наименований. Диссертация содержит 52 рисунка и 5 таблиц. Общий объем диссертации составляет 158 страниц.

Во **введении** обосновывается актуальность и степень разработанности темы исследования, формулируется цель, ставятся задачи работы, отражается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится литературный обзор, в котором описывается современное состояние теоретических и экспериментальных исследований, посвященных явлениям, рассмотренным в диссертации.

**Вторая глава** посвящена изучению тепло- и массопереноса в жидкости, заполняющей ячейку Хеле – Шоу при равномерном подогреве снизу с учётом температурной неоднородности вязкости и различных тепловых граничных условий на боковых узких гранях ячейки. Расчеты показали, что в зависимости от числа Релея в данной конвективной системе может быть реализовано несколько типов стационарных режимов. Интегральной мерой интенсивности диссипативных процессов при заданном числе Релея служила энергетическая характеристика, называемая «производство энтропии». Результаты численного моделирования без учета зависимости вязкости от температуры дают отличие от эксперимента, в котором с ростом числа Релея всегда сначала возникает одновихревое стационарное течение, а затем двухвихревой режим конвекции с опускным движением в центре. В численных расчетах возможна реализация двухвихревого стационарного течения с обратной закруткой вихрей. Учет температурной неоднородности вязкости и теплопроводности узких вертикальных граней позволяет в численных расчетах реализовать только экспериментальный сценарий развития течения. С точки зрения неравновесной термодинамики выбранная конвективная система подчиняется вариационному принципу минимума энтропии перехода.

**В третьей главе** рассмотрена задача разделения двухкомпонентной смеси жидких металлов, заключенных в тонком капилляре, стенки которого не смачиваются рабочей жидкостью. Капилляр помещен в неоднородное температурное поле, определяемое условиями нагрева в высокотемпературных печах. В главе сформулирована

математическая модель конвекции расплавленной смеси, в которой учтены: генерирующий термокапиллярное течение эффект Марангони; стабилизирующее течение концентрационно-капиллярный механизм; эффекты адсорбции-десорбции, позволяющие поверхностно-активному компоненту переходить из объемной фазы в поверхностную и наоборот. Численные расчеты показали, что вдоль капилляра устанавливается экспоненциальный профиль концентрации, сравнимый с экспериментами. Предложенная математическая модель позволила объяснить аномальное разделение двухкомпонентной смеси Al-Si, в которой легкий компонент накапливается снизу капилляра.

**В четвертой главе** было изучена динамика поверхностно-активного вещества, нанесенного на свободную неоднородно нагретую поверхность жидкости в ячейке Хеле – Шоу. На основании численного моделирования были определены условия возникновения линии стагнации на поверхности, разделяющей свободный участок поверхности от области, покрытой пленкой сурфактанта. В ходе численного моделирования учитывалась возможность присутствия пленки, как в газообразном, так и в жидкорасширенном состоянии. Получен ряд результатов, хорошо согласующихся с экспериментальными данными, в которых наблюдается нелинейная зависимость положения линии стагнации от параметра упругости. В главе рассмотрено поведение пленки растворимого сурфактанта на поверхности жидкости с учетом механизмов адсорбции-десорбции. В отличие от случая с нерастворимым сурфактантом свободная поверхность жидкости не очищается термокапиллярным течением. Двигаясь вместе с потоком жидкости, нагретое поверхностно-активное вещество проникает в объемную фазу и, попадая в область нейтральной плавучести, начинает перемещаться в горизонтальном направлении, пока не достигнет противоположной стенки. Далее поверхностно-активное вещество движется вместе с основным течением в сторону поверхности и частично адсорбируется на ней.

**В заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

К **достоинствам диссертации** следует отнести, приведенный автором, литературный обзор. Все задачи, представленные в диссертации, имеют ясную математическую формулировку. Результаты решения задач подробно проанализированы, из них выделены основные положения, которые лаконично сформулированы в конце каждой главы и в заключении к диссертации. Диссертант показал хорошее владение современными численными методами. Фундаментальные результаты, полученные в диссертации, имеют несомненную теоретическую и практическую значимость, могут быть полезны при проектировании технологических систем.

К работе можно высказать ряд **замечаний**.

1. Большинство задач поставленных и решенных в диссертации имеет экспериментальные аналоги, и естественно, что численные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Однако такое сравнение во многих местах работы носит декларативный характер. Например, утверждается, что графики на рисунках 3.10, 3.18*a* и 3.19*b* хорошо согласуются с экспериментом. Было бы неплохо привести на этих рисунках или рядом экспериментальные данные, как это сделано на рисунках 3.27*b* и 4.6.
2. Все задачи характеризуются большим количеством параметров, выбор значений которых должен быть обоснован, особенно это важно при сравнении с экспериментом. На странице 44 коэффициенту зависимости вязкости от температуры  $\epsilon$  приписывается значение  $0,02 \text{ K}^{-1}$ . Из каких соображений сделан такой выбор значения данного параметра? На страницах 70 и 98 представлены наборы размерных, а на страницах 65, 71, 82, 98 и 136 безразмерных параметров, но не обсуждается каким конкретным жидкостям (смесям) эти параметры соответствуют. В разделе 3.6 декларируется, что в качестве рабочей выбрана смесь Pb-Sn, для которой на странице 113 представлены значения безразмерных параметров.

Размерные значения материальных параметров для этой смеси не указаны. Поэтому сложно оценить соответствие безразмерных и размерных параметров заявленной смеси.

3. В параграфах 3.6.1 и 3.6.2 не обоснована причина усложнения вычислительной процедуры путем разбиения всей области на отдельные части. В расчетах видимо использовалась равномерная сетка, не было и параллельных вычислений. Зачем разбивать расчетную область на несколько подобластей и ставить на их границах дополнительные условия, которые могут привести к неустойчивостям расчетной схемы?
4. В параграфе 2.1 главы 2 очень лаконично описана постановка задачи. Диссертант использует некоторые стандартные процедуры для решения конвективных задач в геометрии ячейки Хеле-Шоу, опуская очевидные для него, но возможно не очевидные для читателя математические преобразования. Не ясен, например, переход от системы (2.1) – (2.2) к системе уравнений в терминах завихренность, функция тока, температура. Что означает приближение «плоских траекторий»? Как из задачи исключается  $z$  – компонента скорости? Как удовлетворяются граничные условия на широких гранях полости?
5. При обсуждении результатов расчетов отсутствует единообразие в определении размеров расчетных областей. Размеры расчетных областей на ряде рисунков (смотри, например, рисунки 2.4, 2.7, 2.10, 3.4, 3.21) указаны в узлах расчетной сетки. На других рисунках (смотри, например, рисунки 3.17, 3.31, 4.2) размеры указаны в безразмерных единицах длины. Причем, в тексте диссертации при обсуждении конкретных рисунков не говорится о способе определения линейных размеров полостей на них.

Приведенные замечания не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Автореферат отражает содержание диссертации.

**Заключение.** Диссертационная работа Петухова Максима Ивановича выполнена на хорошем научном уровне, она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Петухов Максим Иванович заслуживает присуждения степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, а. 251, [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru), +7 (342) 2-198-025

Перминов Анатолий Викторович  
19.06.2020

Я, Перминов Анатолий Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку



Подпись Перминова А.В.

ЗАВЕРЯЮ:

Именной секретарь ПНИПУ

Б.И. Макаревич

19 06 20 г.