

На правах рукописи



**Петухов Максим Иванович**

**ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В УЗКИХ КАНАЛАХ И ПОЛОСТЯХ  
С УЧЕТОМ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ).

Научный руководитель: **Демин Виталий Анатольевич**, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Марчук Игорь Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ФГАОУ ВО "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет", декан механико-математического факультета (г. Новосибирск).

**Перминов Анатолий Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", заведующий кафедрой общей физики (г. Пермь).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Защита состоится **28 мая 2020 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » апреля 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы диссертации.** Современное материаловедение, ядерная энергетика, биотехнологии, приборостроение, химическое производство предъявляют все новые и новые требования к сырью и своим конечным продуктам. В настоящее время все эти отрасли промышленности так или иначе тесно связаны с механикой сплошных сред, и в частности, с гидродинамикой по причине того, что используемые исходные и конечные продукты часто производятся из субстратов, находящихся в жидком состоянии. При наличии неоднородностей температуры, силовых полей и дополнительных осложняющих факторов в рассматриваемых средах возникает конвективный массоперенос и локальные термодинамические потоки, сопровождающиеся переносом тепла в физической системе, что сильно осложняет возможности управления тем или иным процессом. Таким образом, локальность является основной особенностью современных технологических процессов. Это свойство не позволяет описывать физические явления интегрально с помощью простых зависимостей и формул, а требует решения сложных эволюционных систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с большим числом неизвестных полевых характеристик.

В результате высокотехнологичные отрасли промышленности, упомянутые выше, зачастую представляют собой синтез физики, химии и чрезвычайно сложных расчетных методов с применением технологий высокопроизводительных вычислений. Зачастую даже микрофлюидические системы характеризуются наличием сильных локальных неоднородностей, в результате чего их поведение описывается теоретическими моделями, которые учитывают пространственное распределение физических полей и неоднородные граничные условия.

Исследования, представленные в диссертации, вносят вклад в теорию конвективного тепло- и массопереноса. Реализованные математические и численные модели позволяют понять особенности возникновения и эволюцию течений в условиях, когда решающую роль играют локальные неоднородности характеристик сплошной среды, а именно, температурная неоднородность

вязкости, а также температурная и концентрационная неоднородность поверхностного натяжения. Помимо этого, указанные модели могут быть применимы при рассмотрении адсорбционных и десорбционных процессов, проявляющихся на межфазных поверхностях. Все это позволяет использовать разработанные модели при решении задач, связанных с получением сверхчистых материалов, а также при проектировании и разработке систем, в которых требуется управление конвективными режимами.

**Цель работы** заключается в аналитическом и численном исследовании течений жидкостей с ярко выраженными локальными неоднородностями вязкости и поверхностного натяжения.

### **Научная новизна**

1. Установлена роль температурной неоднородности вязкости жидкости при смене одного стационарного течения другим в ячейке Хеле – Шоу, равномерно подогреваемой снизу. Для данной гидродинамической системы выявлен вариационный принцип, согласно которому происходит выбор наиболее предпочтительного течения при конкуренции нескольких стационарных режимов.
2. Построена математическая модель, объясняющая процесс разделения двухкомпонентных эвтектических металлических расплавов в тонких капиллярах. Проведено численное моделирование процесса разделения в задачах с различными рабочими смесями и геометрическими постановками.
3. Выявлено 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 плаучести струйного движения, несущего примесь.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретическая модель, описывающая формирование стационарных конвективных течений в ячейке Хеле – Шоу с учетом зависимости вязкости от температуры, данные численного моделирования на основе разработанной модели и результаты анализа слабого нарушения симметрии этих течений.

2. Результаты численного исследования динамики пленки нерастворимого и растворимого сурфактанта на свободной поверхности узкого зазора в ячейке Хеле – Шоу с учетом термо- и концентрационно-капиллярных сил и анализ взаимодействия поверхности с конвективным движением в объеме.
3. Теоретическая модель продольного перераспределения компонентов эвтектических расплавов металлов в тонких капиллярах. Утверждение, что перенос компонентов определяется регулярной силой, действующей вдоль несмачиваемых поверхностей.
4. Результаты расчетов по разделению на компоненты бинарных расплавов металлов в вертикальном и наклонном тонких капиллярах.
5. Результаты численного моделирования переноса компонентов бинарного металлического расплава в прямоугольном контейнере при помощи несмачиваемого неоднородно нагретого рабочего стержня.

**Практическая значимость.** Результаты, полученные в отношении неоднородновязких жидкостей при установлении стационарных течений в ячейке Хеле – Шоу, могут быть востребованы в теплофизических приложениях. Перенос массы и теплоотвод сильно зависят от режима движения жидкости. Отбор того или иного сценария установления течения, умение управлять этим процессом, однозначный выход на тот или иной нужный режим представляются чрезвычайно актуальными при конструировании и эксплуатации различных теплообменных устройств и технологических линий.

Модель и результаты расчетов, полученные при описании эффекта разделения эвтектических металлических расплавов в тонких капиллярах, позволяют понять механизмы возникновения трудно контролируемых неоднородностей концентрации при распределении компонентов расплавов в микрофлюидических системах. Эти данные могут представлять интерес для микроэлектроники, при совершенствовании оптоволоконных технологий и получении сверхчистых материалов.

Результаты, касающиеся моделирования поведения пленок ПАВ на неоднородно нагретых поверхностях несущей жидко-

сти, расширяют фундаментальные представления о технологии очистки поверхностей от загрязняющих веществ. Выявленные механизмы позволяют управлять концентрацией сурфактанта на поверхности в зависимости от внешних условий.

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке гранта Ведущих научных школ РФ (НШ-9176.2016.1), а также гранта Правительства Пермского края (Программа поддержки Научных школ Пермского края, № С-26/788). Исследования, представленные в главах 3 и 4, выполнялись в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований № 16-01-00662-а.

**Достоверность результатов.** Задачи, рассматривавшиеся в диссертации, так или иначе, были инициированы экспериментами. Поэтому результаты теоретических исследований по каждой из глав сопоставлялись с экспериментальными данными. Оказалось, что в зависимости от полноты экспериментального материала, результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, полностью согласуются с опытом. Соответствие экспериментальным данным обусловлено применением моделей, которые были апробированы в предельных случаях на известных задачах. Применявшиеся в ходе расчетов численные методики стандартно верифицировались, в том числе, всегда проводился анализ результатов на предмет минимизации погрешностей. Точность расчетных схем и густота сеток всегда контролировалась, чтобы добиться приемлемых значений погрешностей.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих научных конференциях, семинарах и съездах: Всероссийская конференция с международным участием “Пермские гидродинамические научные чтения” (Пермь, 2015, 2016, 2018); Научно-практическая конференция молодых ученых “Физика для Пермского края” (Пермь, 2015, 2016); Второй всероссийский научный форум “Наука будущего – наука молодых” (Казань, 2016); First International Conference on Multiscale Applications of Surface Tension (Belgium, Brussels, 2016); XX и XXI Зимние школы по механике сплошных сред (Пермь, 2017, 2019); Международный симпозиум “Неравновесные процессы в сплошных средах” (Пермь,

2017); 12-th International Conference “Two-Phase Systems for Space and Ground Applications” (Novosibirsk, 2017); VI Всероссийская конф. с участием зарубежных ученых (Барнаул, 2017); XXIII Международная конф. “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность” (Звенигород, 2018); The Third Russian Conference on Magnetohydrodynamics (Perm, 2018); Всероссийская науч. конф. по математике и механике (Томск, 2018); Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019);

Помимо перечисленных выше конференций результаты исследований докладывались на 10-ом Всероссийском семинаре “Физикохимия поверхностей и наноразмерных систем” (Москва, 2019, рук. акад. Л.Б. Бойнович), Пермском городском гидродинамическом семинаре имени проф. Г.З. Гершуни, Е.М. Жуховицкого и Д.В. Любимова (Пермь, 2017, 2018, номера заседаний 1470, 1492, 1496, рук. проф. Т.П. Любимова) и научном семинаре кафедры Нанотехнологий и микросистемной техники ПГНИУ (Пермь, 2019, рук. проф. А.Б. Волынцев).

**Публикации и личный вклад автора.** Материалы диссертации изложены в 30 работах, включая 8 основных статей в периодических изданиях из перечня ВАК, из них 7 индексированы в международных базах данных Scopus и Web of Science. Все численные результаты получены и обработаны диссертантом лично. Анализ и сравнение с экспериментом осуществлялись совместно с научным руководителем и остальными соавторами.

**Структура диссертации.** 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, определена цель исследования, продемонстрированы научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, а также описаны апробация работы и личный вклад автора. Прокомментирована структура диссертации.

**В первой главе** приводится литературный обзор, в котором описывается современное состояние теоретических и экспериментальных исследований, посвященных явлениям в жидкостях, связанных с неоднородностью локальных характеристик.

**Вторая глава** посвящена изучению тепло- и массопереноса в жидкости, заполняющей ячейку Хеле – Шоу при равномерном подогреве снизу. Для теоретического описания конвективных движений использовалась система уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска, в которой учитывалась температурная неоднородность вязкости:  $\nu = \nu_0(1 - \varepsilon T)$ . Здесь  $\nu_0$  – коэффициент кинематической вязкости воды при некотором реперном значении температуры,  $\varepsilon$  – коэффициент зависимости вязкости от температуры. Широкие вертикальные грани полости обладали конечной теплопроводностью, узкие горизонтальные грани были идеально теплопроводными. На узких вертикальных гранях рассматривались различные тепловые граничные условия: идеально теплопроводные грани в одном случае и теплоизолированные грани в другом. На всех границах полости выполнялось условие прилипания жидкости. Основным параметром задачи, задававшим степень надкритичности, служило число Рэлея  $Ra = g\beta\Theta d^3/\nu_0\chi$ . Здесь  $\chi$ ,  $\beta$  – коэффициенты теплопроводности и теплового расширения,  $\Theta$  – характерная разность температур по вертикали на расстоянии, равном полутолщине слоя  $d$ ,  $g$  – величина ускорения свободного падения.

В зависимости от надкритичности в данной конвективной системе может быть реализовано несколько типов стационарных режимов, характерный вид которых представлен на рис. 1. Производство энтропии служило интегральной мерой интенсивности диссипативных процессов при заданной надкритичности. В экспериментальном сценарии с ростом надкритичности при усложнении режимов<sup>1</sup> сначала возникает одновихревой стационарный, а затем двухвихревой режим с опускным движением в центре. В отличие от реального эксперимента, в численном моделировании возможна реализация такого же двухвихревого стационарного течения с подъемным движением в центре.

<sup>1</sup>Бабушкин И.А., Демин В.А. Экспериментальное и теоретическое исследование переходных конвективных режимов в ячейке Хеле-Шоу // Изв. РАН, МЖГ, № 3, 2006.

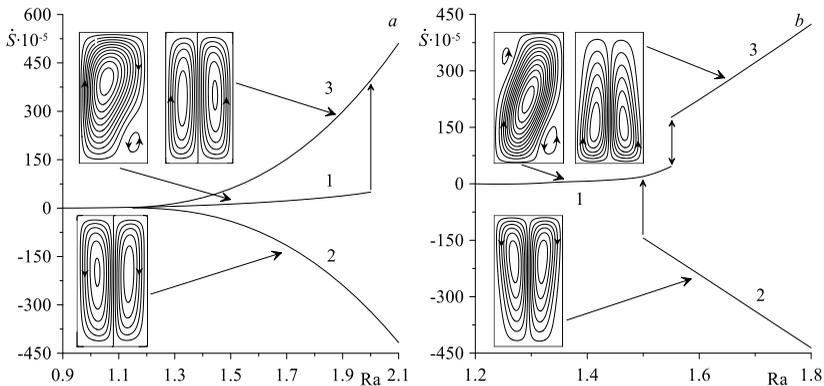


Рис. 1. Зависимость производства энтропии системы от надкритичности для случая неоднородной вязкости: *a*, *b* – теплоизолированные и идеально теплопроводные узкие вертикальные грани; 1 – одновихревой, 2, 3 – двухвихревые режимы с неэкспериментальной и экспериментальной закрутками.

Результаты численного моделирования показали, что учет температурной неоднородности вязкости необходим для того, чтобы реализовать экспериментальный сценарий развития течения. В опыте из механического равновесия сначала рождается одновихревое течение, а затем оно всегда перестраивается в двухвихревой режим с подъемным течением вблизи вертикальных стенок. Учет теплопроводности узких вертикальных граней приводит к появлению у одновихревого течения двух дополнительных угловых вихрей. В свою очередь, неоднородность вязкости нарушает симметрию течения, делая нижний угловой вихрь чуть больше относительно верхнего. В связи с этим, при развитии неустойчивости, связанной с ростом надкритичности нижнему угловому вихрю проще вытеснить основное течение и перестроить его в двухвихревое с экспериментальной закруткой. С точки зрения неравновесной термодинамики из данного результата следует, что выбранная конвективная система подчиняется вариационному принципу минимума энтропии перехода (рис. 1*b*).

**В третьей главе** рассмотрена задача разделения двухкомпонентных эвтектических смесей жидких металлов, заключенных

в тонком алуновом или кварцевом капилляре. Во всех постановках имеет место неоднородность температуры, вызванная условиями нагрева в высокотемпературных печах.

Объяснение экспериментальных результатов<sup>2</sup> основано на допущении полной несмачиваемости рабочими жидкостями стенок капилляра. На образованной таким образом свободной границе, вследствие неоднородности поверхностного натяжения, возникает эффект Марангони, который генерирует термокапиллярное течение, направленное в нижнюю холодную часть канала, в которой начинает скапливаться один из компонентов смеси. Учитываемый в модели концентрационно-капиллярный механизм, создающий касательные напряжения в противоположном направлении, стабилизирует течение. Эффекты адсорбции-десорбции позволяют поверхностно-активному компоненту переходить из объемной фазы в поверхностную и наоборот. Математически данная модель описывается следующей системой уравнений межфазной конвекции<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + g(\beta_T T - \beta_C C) \boldsymbol{\gamma}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) T &= \chi \Delta T, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) C &= D \Delta C, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \nabla^s (\mathbf{v} \Gamma) = D_s \Delta^s \Gamma + k_A C - k_D \Gamma, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{v}$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $C$  – поля скорости, давления, температуры и концентрации тяжелого компонента смеси,  $\beta_T$ ,  $\beta_C$  – коэффициенты температурного и концентрационного увеличения плотности,  $\nu$ ,  $\chi$ ,  $D$  – кинематическая вязкость, температуропроводность и коэффициент диффузии,  $\boldsymbol{\gamma}$  – единичный вектор, направленный вертикально вверх,  $\Gamma$  – поле поверхностной концентрации тяжелого компонента смеси;  $D_s$ ,  $k_A$ ,  $k_D$  – коэффициенты поверхностной диффузии, адсорбции и десорбции. Индекс  $s$  у операторов обозначает дифференцирование по координатам поверхности.

Механизм адсорбции-десорбции на вертикальных свободных

<sup>2</sup>Гаврилин И.В., Фролова Т.Б., Захаров В.П. О ликвации в жидких эвтектических расплавах // Изв. АН СССР. Металлы, 1984.

<sup>3</sup>Братухин Ю.К., Макаров С.О. Гидродинамическая устойчивость межфазных поверхностей. Пермь: Изд-во ПГУ, 2005. 240 с.

границах, а также баланс касательных напряжений описывались следующими граничными условиями:

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = \mp k_A C \pm k_D \Gamma, \quad \eta \frac{\partial v_y}{\partial x} = \pm \sigma_T \frac{\partial T}{\partial y} \pm \sigma_\Gamma \frac{\partial \Gamma}{\partial y}.$$

Знак правой части выбирался, исходя из расположения границы. Здесь  $\eta$  – динамическая вязкость,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_\Gamma$  – коэффициенты, описывающие температурную и концентрационную неоднородность поверхностного натяжения:  $\sigma = \sigma_0 - \sigma_T T - \sigma_\Gamma \Gamma$ . После обезразмеривания роль поверхностных эффектов описывалась двумя параметрами подобия: тепловым  $Ma_T = \sigma_T \Theta L / \eta \chi$  и концентрационным  $Ma_\Gamma = \sigma_\Gamma C_0 L^2 / \eta \chi$  числами Марангони. Здесь  $C_0$  – начальное значение концентрации поверхностно-активного компонента,  $\Theta$  и  $L$  – характерные перепад температуры и пространственный масштаб задачи.

Численное моделирование показало, что при такой постановке в плоском капилляре возникает интенсивное перераспределение компонентов в изначально однородной смеси.

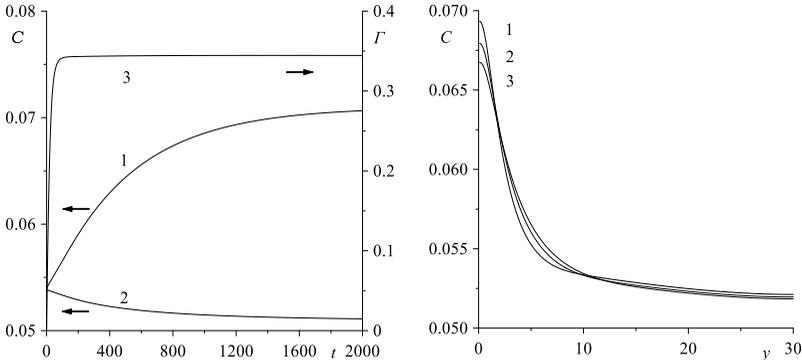


Рис. 2. Слева: максимальное (1) и минимальное (2) значения поля объемной концентрации и максимальное (3) значение профиля поверхностной концентрации в зависимости от времени при  $Ma_\Gamma = 8$ ,  $Ma_T = 7$ . Справа: продольные профили объемной концентрации при  $Ma_\Gamma = 8$ . 1 –  $Ma_\Gamma = 3$ , 2 –  $Ma_\Gamma = 5$ , 3 –  $Ma_\Gamma = 7$ .

С течением времени между верхним и нижним торцами капилляра возникает перепад концентрации, свидетельствующий о разделении смеси на компоненты (рис. 2). При выходе системы

на стационар (рис. 2, 3) вдоль капилляра устанавливается экспоненциальный профиль концентрации, сравнимый с экспериментами. В случае произвольно ориентированного относительно вертикали капилляра результаты численного моделирования продемонстрировали немонотонную зависимость величины разделения от угла наклона (рис. 4). Помимо этого, предлагаемая теоретическая модель позволяет объяснить anomalous разделение двухкомпонентной смеси Al-Si с инверсионным продольным распределением компонентов. В отличие от ранее рассмотренных случаев поверхностно-активным здесь является легкий компонент, который теперь накапливается внизу.

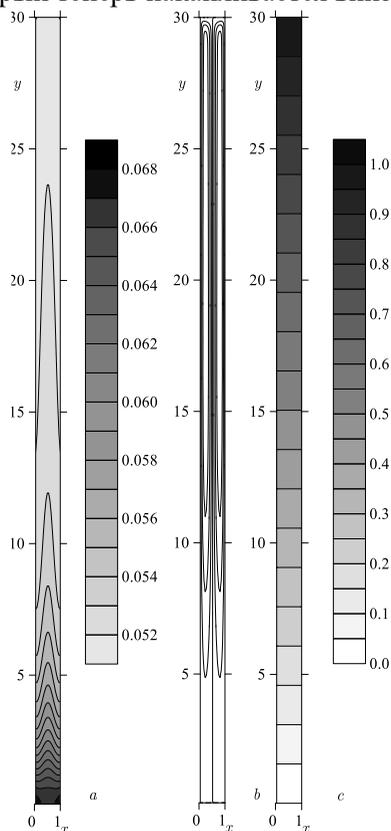


Рис. 3. Поля концентрации (a), функции тока (b) и температуры (c) при  $Ma_T = 8$ , и  $Ma_T = 7$ ,  $t = 800$

Описанную технологию разделения можно применить в случае, когда двухкомпонентная смесь находится в плавильном тигле. Для перераспределения компонентов достаточно погрузить в рабочую жидкость неоднородно нагретый алундовый стержень, на поверхности которого, вследствие сделанных ранее предположений, будут работать те же механизмы, что и на стенках капилляра. В результате численного решения было подтверждено заметное разделение смеси с накоплением тяжелого компонента вблизи нижней стенки тигля (рис. 5).

**В четвертой главе** было решено две задачи, посвященных динамике поверхностно-активного вещества, нанесенного на свободную поверхность жидкости в ячейке Хеле – Шоу, которая неоднородно нагревалась сверху. В первой постановке поверхностно-активное вещество было нерастворимым. Как и в задаче, описывающей перераспределение компонентов металлов в капиллярах, температурная неоднородность поверхностного натяжения ( $\sigma = \sigma_0 - \sigma_T T - \sigma_\Gamma \Gamma$ ) приводит к возникновению термокапиллярного течения вдоль свободной поверхности. Данное течение смещает пленку сурфактанта в холодную часть поверхности. В свою очередь, за счет сжатия пленки возникает концентрационно-капиллярный механизм, стремящийся сбалансировать течение. В качестве управляющего параметра был выбран параметр упругости  $E = Ma_\Gamma / Ma_T$ .

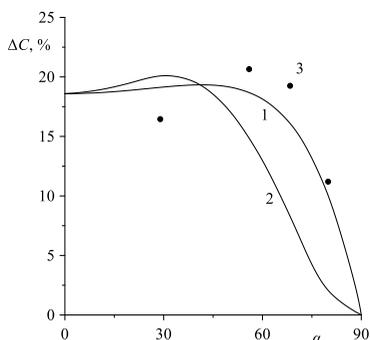


Рис. 4. Зависимости перепада концентрации на торцах от угла наклона: 1 – капилляр с постоянной длиной, 2 – капилляр с переменной длиной, 3 – пересчитанные результаты эксперимента<sup>4</sup>

<sup>4</sup>Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Шмыров А.В. Разделение легкоплавких металлических расплавов в тонком наклонном капилляре // Известия РАН. МЖГ, 2019.

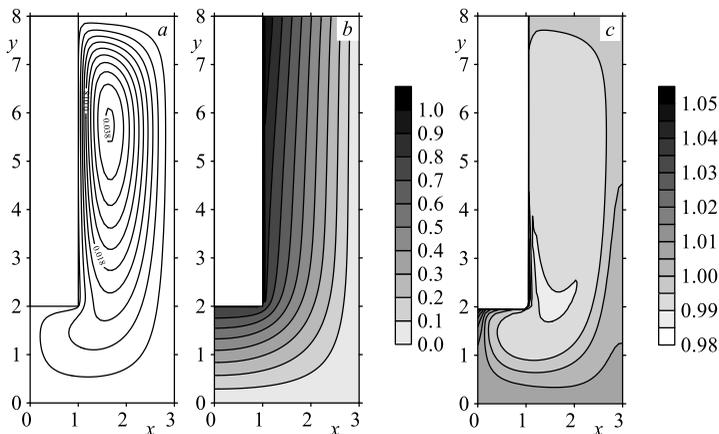


Рис. 5. Поля функции тока (а), температуры (b) и концентрации тяжелого компонента (с).

По аналогии с третьей главой  $Ma_T = \sigma_T \Theta L / \eta \chi$  и  $Ma_C = \sigma_T \Gamma^* L^2 / \eta \chi$  – тепловое и концентрационное числа Марангони;  $\Gamma^*$  – значение поверхностной концентрации, при которой происходит фазовый переход “газообразное состояние – жидкорасширенное”. При определенных условиях, а именно, при  $E < 1$ , часть межфазной поверхности полностью очищается от сурфактанта: на ней возникает точка стагнации, вблизи которой течение подтекает под пленку (рис. 6).

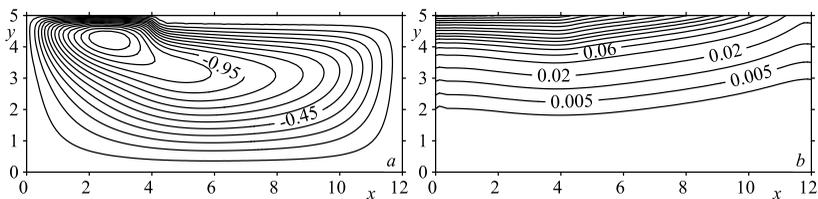


Рис. 6. Поле функции тока (а) и температуры (b) при  $E = 0.6$ .

Увеличение интенсивности нагрева приводит к интенсификации течения на поверхности и большему сжатию пленки. Другими словами, точка стагнации сильнее смещается в холодную область. При этом сильное сжатие может привести к более плотной упаковке молекул сурфактанта: из газообразного состояния пленка переходит в жидкорасширенное (рис 7а).

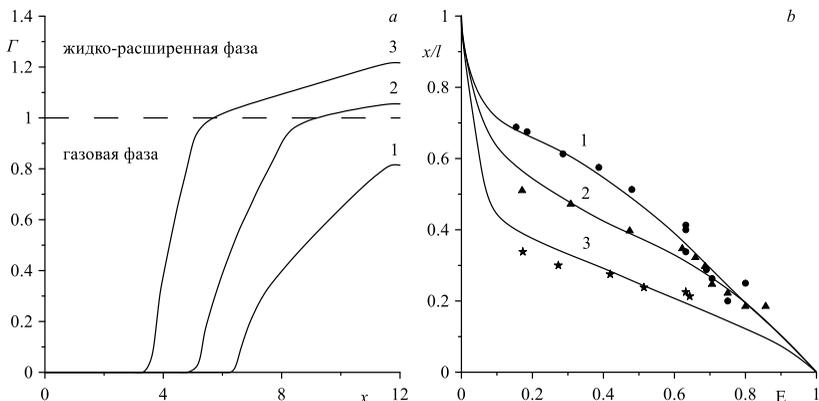


Рис. 7. Профили сурфактанта при фиксированном параметре упругости  $E = 0.4$  (a). Влияние параметра упругости на ширину свободного участка поверхности. Круги, треугольники и звезды соответствуют данным экспериментов<sup>5</sup>: 1 –  $\Gamma_0 = 0.1$ , 2 –  $\Gamma_0 = 0.2$ , 3 –  $\Gamma_0 = 0.3$  (b)

Зависимость положения точки стагнации от параметра упругости и начального значения поверхностной концентрации  $\Gamma_0$  представлена на рис. 7. При небольших нагревах данная зависимость имеет линейный характер (пленка находится только в газообразном состоянии). Усиление нагрева уменьшает площадь поверхности, занимаемую сурфактантом вследствие его сжатия. В результате часть пленки переходит в жидкорасширенное состояние. Это приводит к появлению нелинейного участка на рис. 7b. Учет возможности фазового перехода в расчетах дает хорошее согласие с экспериментальными данными.

Вторая задача, рассмотренная в данной главе, учитывает растворимость сурфактанта за счет добавления в модель механизмов адсорбции-десорбции. Это приводит к тому, что в процессе вытеснения пленки из-за термокапиллярного течения поверхность никогда не очищается от сурфактанта полностью. При этом возможна ситуация, в которой в центре полости образуется “концентрационный язык” нейтральной плавучести (рис. 8).

<sup>5</sup>Мизев А.И., Шмыров А.В. Влияние нерастворимого сурфактанта на развитие термокапиллярной конвекции // Конвективные течения... 2013.

Возникновение концентрационного языка связано с охлаждением ПАВ после проникновения в объем и дальнейшим движением вдоль холодной стенки в нижнюю часть ячейки. При течениях с умеренными скоростями сурфактант при достижении некоторой высоты полости будет иметь плотность, сравнимую с плотностью окружающей жидкости, что позволяет ему двигаться дальше не в сторону нижней стенки, а вдоль горизонтального направления. При этом данное движение будет гораздо медленнее, чем то, которое формируется на межфазной поверхности, из-за чего происходит постепенное накопление тяжелой примеси в правой части ячейки. Тем не менее, движение примеси вдоль сформированного “языка” будет продолжаться. Рано или поздно концентрационный язык достигнет вертикальной левой стенки и будет двигаться с объемным течением в сторону межфазной поверхности, где происходит адсорбция тяжелого компонента в поверхностный слой.

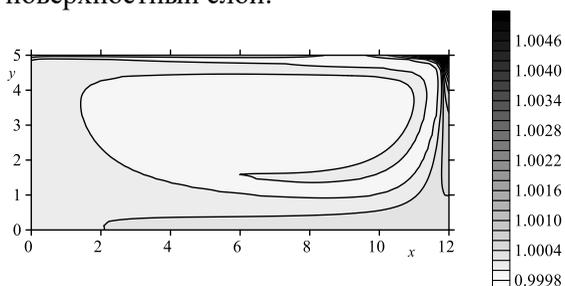


Рис. 8. Поле объемной концентрации

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

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Получено теоретическое объяснение процесса формирования стационарных конвективных течений в ячейке Хеле – Шоу при равномерном подогреве снизу. По результатам аналитических расчетов и данных численного моделирования было определено, что включение в математическую модель факторов температурной неоднородности вязкости в объеме и конечной теплопроводности широких вертикальных граней является обязательным, если ставится задача получения адекватного сценария наблю-

давшегося ранее в эксперименте усложнения течений сильновязких жидкостей. Установлено, что варьирование теплопроводности узких вертикальных граней обеспечивает стабилизацию определенных режимов, в результате чего в модельных расчетах становится возможным как прямой, так и обратный переход “одновихревой стационарный – двухвихревой режимы”. При этом на карте течений будет существовать гистерезисная область, в которой навязанными начальными условиями будет определяться не только количество вихрей в течении, но и конечная их закрутка. Неоднородность вязкости приводит к нарушению симметрии течения “верх – низ”, в результате чего при прямом переходе вытеснять основное течение будет именно нижний угловой вихрь, рост которого приводит к подъемному движению вдоль боковых граней, что согласуется с опытом.

Разработана теоретическая модель, позволяющая объяснить перераспределение компонентов эвтектических расплавов металлов при их взаимодействии с неоднородно нагретыми поверхностями стенок капилляров из алунда или кварцевого стекла. В ее основе лежит допущение о полной несмачиваемости данных поверхностей, за счет чего на них в ходе выдержки в печи могут возникать термо- и концентрационно-капиллярные силы, которые в совокупности с механизмами адсорбции-десорбции могут привести к сравнительно быстрому продольному разделению изначально однородной смеси на компоненты. Данная модель была испытана для случаев как вертикально ориентированного, так и наклонного тонкого капилляра. Результаты численного моделирования продемонстрировали хорошее согласие с известными на данный момент экспериментальными данными, а именно, временем разделения смеси, конечной формой профилей концентрации в продольном и поперечном сечении капилляра, а также величиной разделения смеси и влиянием на нее угла наклона капилляра. Помимо этого, предложенная модель объясняет механизм аномального разделения смеси Al-Si, когда более тяжелый компонент накапливается не в нижней, а в верхней части капилляра.

Предложенная теоретическая модель позволила рассмотреть “обратную” технологическую задачу, в которой неоднородно

нагретый рабочий стержень из алунда погружается в однородный двухкомпонентный эвтектический расплав металлов. Здесь возникают условия, при которых работают те же механизмы, что и в уже описанных условиях при разделении смесей в тонких капиллярах. Это позволяет предсказать эффект накопления тяжелого компонента смеси вблизи дна тигля, содержащего расплав.

Численно исследовано поведение пленки нерастворимого сурфактанта на свободной поверхности жидкости, заполняющей ячейку Хеле – Шоу, в случае неоднородного нагрева сверху. Определены условия, при которых на поверхности возникает точка стагнации, разделяющая свободный участок поверхности от области, покрытой пленкой сурфактанта. Для этого был введен параметр упругости пленки ПАВ. В ходе численного моделирования учитывалась возможность присутствия пленки как в газообразном, так и в жидкорасширенном состоянии. При увеличении интенсивности нагрева термокапиллярное течение на свободном участке сильнее сжимает пленку, вследствие чего происходит фазовый переход в поверхностном молекулярном слое. Это позволило получить результаты, согласующиеся с экспериментальными данными, в которых положение точки стагнации в зависимости от параметра упругости перестает подчиняться линейному закону при возникновении жидкорасширенного состояния в пленке.

Помимо этого, было рассмотрено поведение пленки растворимого сурфактанта на поверхности жидкости-носителя при включении механизмов адсорбции-десорбции. Определены условия, при которых нагретое поверхностно-активное вещество проникает в объемную фазу и, двигаясь по потоку жидкости вдоль стенки ячейки, находит в объеме область нейтральной плавучести, после чего перемещается в горизонтальном направлении, пока не достигнет противоположной стенки и, двигаясь вместе с основным течением в сторону поверхности, частично адсорбируется на ней. При этом сама поверхность, в отличие от случая с нерастворимым сурфактантом, не очищается термокапиллярным течением полностью.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

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. Vol. 9, № 2. С. 47–54.
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.
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. pp. 10-17. DOI: 10.1016/j.cis.2017.08.010.
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, pp. 69-76. DOI: 10.1007/s12217-017-9576-3.
5. Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И. Сепарация бинарных сплавов в тонких капиллярах // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Vol. 11, № 1. С. 125-136. (Demin V.A., Mizev A.I., Petukhov M.I. Separation of binary alloys in thin capillaries // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2019, Vol. 60, No. 7, pp. 1184-1196.)
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. (Demin V.A., Mizev A.I., Petukhov M.I., Shmyrov A.V. Separation of low-melting metal melts in a thin inclined capillary // Fluid Dynamics. 2019, Vol. 54, No. 1, pp. 1184-1196.)
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. pp. 89-97. DOI: 10.1007/s12217-019-09744-4.
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. pp. 495-533. DOI: 10.1017/jfm.2019.613.**

9. Петухов М.И. Теоретическое исследование нелинейных конвективных режимов в ячейке Хеле – Шоу. Материалы Второго Всерос. научного форума “Наука будущего – наука молодых”. Казань, Россия, 2016. с. 337-339.

10. Демин В.А., Петухов М.И. К вопросу о механизме крупномасштабного переноса компонентов металлических расплавов в неоднородно нагретых тонких капиллярах // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. 2016. № 3. С. 65-71.

11. Брацун Д.А., Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Шмыров А.В. Численное моделирование термокапиллярной конвекции при наличии нерастворимого сурфактанта. “Неравновесные процессы в сплошных средах”. Материалы междуна. симпозиума, Пермь, Россия, 2017. 74-76 р.

12. Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И. О термокапиллярном механизме пространственного разделения металлических расплавов. “Неравновесные процессы в сплошных средах”. Материалы междуна. симпозиума, Пермь, Россия, 2017. 149-151 р.

13. Demin V.A., Mizev A.I., Petukhov M.I. Division of binary metal melts in a thin capillary. 12-th International Conference “Two-Phase Systems for Space and Ground Applications”. Abstr., Novosibirsk, Russia, 2017. 113-114 p.

14. Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Шмыров А.В. О необычном поведении расплава Al-Si в тонких капиллярах // Вестник Пермского университета. Сер. Физика. 2018. № 1. С. 26-35.

15. Демин В.А., Мизев А.И., Петухов М.И., Углев Н.П., Шмыров А.В. Пространственная локализация компонентов в металлических расплавах. “Пермские гидродинамические научные чтения”. Материалы конф. Пермь. Россия, 2018. 119-121 с.