

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Уточкина Владимира Юрьевича «Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность исследований. Качественный скачок, произошедший за последние десятилетия в области жидкостных технологий, стимулирует неугасающий интерес к гидродинамике и изучению закономерностей конвекции, вызванной комбинированным действием разнородных факторов (тепловыми и/или механическими воздействиями, химическими реакциями и т.п.). Примерами могут служить жидкостные технологии, применяемые в фармацевтике, химической и биомедицинской индустриях, которые были предложены при разработке принципиально новых методик механохимически стимулированного синтеза, более совершенных конструкций микронасосов, микромиксеров, микрореакторов, сложных реакторных цепей или при получении новых материалов/субстанций с заданными характеристиками, в том числе обладающих специальными функциональными и морфологическими свойствами. Управление возникающими состояниями и контроль за режимами течений, реализующихся в таких жидкостных системах, являются сложными технологическими задачами, которые могут быть решены на этапах разработки или лабораторной апробации методик с помощью методов математического моделирования. Присутствие в системе реагирующих сред значительно усложняет соответствующие математические модели за счёт необходимости учёта химического взаимодействия компонентов и возможных дополнительных тепловых эффектов, возникающих при экзотермических и эндотермических реакциях. Кроме того, при описании процессов, происходящих в смесях и растворах, важно учитывать, что состав и состояние смеси сами по себе могут обеспечивать появление специфических свойств жидкой среды и приводить к новым эффектам (диссоциации, сольватации и т.п.) или проявлению новых форм неустойчивости. Многообразие и разнородность процессов, происходящих в таких жидкостных системах, в большинстве случаев требует привлечения различных подходов при разработке моделей и формулировке постановок соответствующих задач. Выбор способа описания зачастую зависит от типа конкретных реакций, их кинетики и условий их протекания в жидкой среде. Таким образом, актуальность тематики исследований, выполненных в диссертационной работе Уточкина В. Ю. «Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле», не вызывает сомнений, а сама работа представляет как теоретический, так и практический интерес.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность тематики, формулируются цели и задачи, описываются методология и методы исследования, трёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 178 наименований. Общий объём работы составляет 140 страниц.

В первой главе анализируются современное состояние изучаемых проблем физико-химической гидродинамики и известные результаты исследований процессов теплообмена и характеристик конвективной неустойчивости в двухслойных си-

стемах реагирующих сред при различных условиях. Отмечены значительные отличия результатов от тех, что получены для систем, состоящих из химически инертных друг относительно друга жидкостей, имеющих общую контактную поверхность, обозначены особенности задач, возникающих при описании систем, находящихся в условиях вращения, и неполнота результатов для случая контролируемого инерционного поля.

Во второй главе в рамках приближения Буссинеска строится обобщение математической модели для корректного описания конвективного теплопереноса в двухслойной системе реагирующих жидкостей в условиях, когда в нижней объёмной фазе происходит реакция нейтрализации за счёт диффузии верхнего вещества в нижний слой. Дается обоснование редукции исходной задачи к однослойной постановке в ячейке Хеле-Шоу с одним управляющим параметром γ , отвечающим начальному составу реагирующих веществ и однозначно определяющим сценарий развития неустойчивости. Предложена модификация слагаемого, описывающего вклад силы плавучести, которая позволяет корректно моделировать динамическое производство растворителя в ходе реакции. На примере системы смесей водный раствор гидроксида натрия – раствор соляной кислоты в пентаноле с помощью модифицированных уравнений изучена динамика взаимодействия сред с различной начальной концентрацией. Описаны условия развития локализованной конвекции, проведён анализ нелинейных режимов хемоконвекции и основных механизмов, обеспечивающих формирование, развитие и упорядочивание типичных пространственных структур. Исследовано влияние производства воды на эволюцию топологии хемоконвективных течений, дано детальное описание динамики возникающих структур вблизи фронта реакции. Выполнена верификация модели на основе сравнения с известными экспериментальными данными.

Третья глава посвящена исследованию хемоконвекции в условиях вращения, для которой характерна пространственная локализация вихревого движения. Для описания нелинейной динамики течений во вращающейся ячейке Хеле-Шоу выведены уравнения для возмущений, учитывающие значительное влияние силы Кориолиса даже в двумерном случае. В предположении малости толщины зазора исследована линейная устойчивость равновесного состояния, проведена селекция мод. С помощью метода многих временных масштабов анализируется поведение решений вблизи порога устойчивости. Доказана возможность формирования колебательных режимов при ненулевых значениях числа Экмана. Установлено, что под действием эффекта Кориолиса осуществляется переход к устойчивому предельному циклу при сколь угодно малых числах Экмана. Численно исследована структура течений, возникающих в цилиндрической системе смешивающихся водных растворов в условиях реакции нейтрализации на нелинейных стадиях. Обсуждаются сценарии перехода к хаотичным режимам и особенности эволюции системы, обусловленные действием плавучести Кориолиса. На примере системы сред, реагирующих по схеме нейтрализации второго порядка, исследовано влияние центробежного поля. Построены карты режимов неустойчивости в плоскости начальных концентраций реагентов. Определён бифуркационный критерий, разделяющий режимы концентрационно-зависимой неустойчивости и перемешивания под действием ударной волны плотности.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна. К настоящему моменту хорошо известны фундаментальные результаты исследований теплообмена в системах реагирующих веществ, в ко-

торых основной интерес был прикован к анализу характеристик молекулярной диффузии и изменений полей концентрации в ходе реакций конкретного типа, а взаимовлияние механического движения и химических превращений и порождаемые ими перекрёстные явления оставались без должного внимания. Многообразие специфических сценариев движения в многокомпонентных системах, возможность спонтанной самоорганизации и разрушения возникающих структур, большое число управляющих параметров (размер системы, температура, состав компонентов и т. п.), богатство возможных форм неустойчивости объясняют сложности, связанные как с выбором подхода к описанию изучаемых явлений, так и с формулировкой соответствующих математических моделей. Поэтому некоторые вопросы, связанные с адекватным описанием процессов тепло- и массопереноса в условиях сосуществования реагирующих сред в рамках корректных постановок, остаются открытыми. К настоящему моменту отсутствует не только универсальная математическая теория, описывающая всё многообразие химических, структурных и механических превращений в жидких растворах, но даже единый подход к моделированию реакций конкретного типа. Не вполне изучены роль кинетики для ряда реакций, характер и степень влияния вращения и геометрии области течения на формирование возникающих режимов хемоконвекции.

В диссертационной работе Уточкина В. Ю. получены новые результаты, развивающие известные результаты теории конвективной устойчивости и вносящие вклад в теорию физико-химической гидродинамики, связанные с возможностью корректного учёта производства растворителя и эффекта Кориолиса при описании хемоконвекции в рамках моделей буссинесковского типа. Научная новизна представленных результатов состоит в следующем:

1. Построено обобщение модели конвекции для описания тепломассообмена в системе реагирующих жидкостей с межфазной границей на случай учёта производства растворителя в реакционной зоне. Для конкретной системы сред предложен переход к односторонней модели, в рамках которой исследована устойчивость системы двух реагирующих растворов в вертикальной ячейке Хеле-Шоу в поле массовых сил. Изучено влияние интенсивности производства растворителя на динамику системы. Описаны структура и эволюция хемоконвективных течений со сложной симметрией, пространственные перестройки фронта реакции слоя жидкости. Установлен механизм динамической стабилизации хемоконвективной структуры.

2. На основе теории возмущений получены уравнения конвекции вращающейся жидкости в приближении Хеле-Шоу. Исследована устойчивость равновесия вращающейся жидкости с внутренней генерацией компонента переноса. Установлено стабилизирующее влияние силы Кориолиса вблизи порога устойчивости, а на сильно нелинейных стадиях процесса – усложнение сценария перехода к хаотичным режимам конвекции под влиянием эффекта плавучести.

3. Изучена эволюция возмущений в системе смешивающихся реагирующих растворов с концентрационно-зависимыми законами диффузии во вращающейся ячейке. В пространстве параметров задачи определены границы существования различных режимов, при которых формируются хемоконвективные ячейки регулярной структуры или плотностная волна ударного типа.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обусловлена корректностью предположений, лежащих в основе разрабатываемых матема-

тических моделей, использованием строгих математических методов теории устойчивости, применением апробированных численных методов и сравнением результатов работы с известными экспериментальными данными.

Научное и практическое значение работы заключается в определении закономерностей формирования хемоконвективных течений в системах реагирующих жидкостей в ячейке Хеле-Шоу под действием силовых полей различной природы. Знание критических параметров устойчивости и внутренних механизмов, приводящих к потере устойчивости основного состояния, является чрезвычайно важным для понимания особенностей конвекции, которая может возникать в сложных жидкостных системах. Результаты диссертации могут быть полезны при разработке и модификации тонких технологий, применяемых в фармакологии, биомедицине, химической промышленности, и требующих строгого контроля за возникающими режимами течений в рабочих средах на малых пространственных масштабах.

Оценка диссертации. По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. При изучении нелинейных режимов конвекции в системе реагирующих растворов в п. 2.1.5 описывается изменение пространственного размера «пальцев» при движении фронта. Можно ли сформулировать закон изменения размера возникающих структур с изменением параметра γ ?
2. В рамках постановок, используемых при решении задач в главе 3, можно ли получить формальный критерий, указывающий на необходимость учёта или возможность исключения кориолисовой плавучести при исследовании конвекции в ячейке Хеле-Шоу?
3. На стр. 80 формулируется условие первого рода для функции A , которая может иметь смысл температуры или концентрации одного из компонентов жидкого раствора: $A = 0$ (см. формулы (3.28)). Каким образом в физической системе может быть реализовано подобное условие для концентрации или контролироваться его выполнение?
4. В рамках задачи, сформулированной в п. 3.3.1, проводилась ли оценка вкладов перепадов плотности, обусловленных неизотермичностью и изменениями концентрации?
5. Могут ли быть обобщены полученные в диссертации результаты на какие-то классы/типы растворов или жидкостных систем или они имеют частный характер и справедливы только для рассмотренных типов жидких растворов?

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки результатов диссертационной работы, их научной и практической значимости.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация Уточкина В. Ю. «Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит вклад в развитие теории конвективной устойчивости и физико-химической гидро-

динамики. В работе приведены результаты исследования условий возникновения и развития конвекции, вызванной химическими реакциями в системах жидких растворов. К несомненным достоинствам работы следует отнести разработку моделей бусинесковского типа, учитывающих изменение объёма реакционной зоны в ходе реакции нейтрализации и влияние эффекта Кориолиса в системах с геометрией Хеле-Шоу, и получение карт режимов неустойчивости и бифуркационных диаграмм в пространстве параметров рассматриваемых задач. Результаты работы представлены на тематических международных и всероссийских конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в 8 печатных работах в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции, Белый список и международные системы цитирования. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Уточкина Владимира Юрьевича «Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно Положению о присуждении учёных степеней в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Заведующий отделом дифференциальных уравнений механики, ведущий научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН) доктор физико-математических наук

Бекежанова Виктория Бахытовна

11.09.2025 г.

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: vbek@icm.krasn.ru

Подпись Виктории Бахытовны Бекежановой удостоверяю:

Заместитель директора ИВМ СО РАН
по научной работе к.ф.-м.н.



Денис Александрович Нестеров

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44
Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: sek@icm.krasn.ru