

"УТВЕРЖДАЮ"



Врио директора федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

д.ф.-м.н. Е.М. Рудой

12.09 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук
о диссертационной работе Уточкина Владимира Юрьевича
«Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Уточкина В.Ю. посвящена теоретическому исследованию хемоконвективной неустойчивости растворов в поле силы тяжести и сил инерции, возникающих в условиях вращения системы.

Исследование взаимосвязи химических реакций и конвективного движения жидкости является **актуальным** по двум причинам. С одной стороны, в последние десятилетия наблюдается бурное развитие представлений о структурообразовании в сложных нелинейных системах. Протекание реакции подразумевает наличие нескольких скалярных полей, которые непрерывно испытывают превращения и определяют локальное значение плотности среды. При этом разница в масштабах диффузионного и реакционного времен может приводить к таким нетривиальным эффектам, как формирование зон с локально неустойчивой стратификацией по плотности. Локальное действие, оказываемое реакцией на концентрационные и температурные поля, также осложняет динамику тонкими эффектами, связанными с зависимостью диффузии компонентов от концентрации, изменениями вязкости растворителя или коэффициента поверхностного натяжения. Таким образом, протекание реакций расширяет спектр режимов поведения жидкости, что обуславливает фундаментальный интерес к рассматриваемой проблеме.

С другой стороны, движение реагирующих жидкостей имеет место в многочисленных технологических процессах. Вопрос о возбуждении или подавлении конвекции в реагирующей среде представляет комплексную задачу исследования множества механизмов. Протекание реакции меняет исходные физические свойства среды, благодаря чему она может выступать в роли генератора движения, менять его структуру и интенсивность. Соответствующие исследования находят применение в технологиях нефтепереработки, сепарации руд, химической и фармацевтической промышленности. Особую роль для приложений играет вращающаяся конфигурация, где пространственно неоднородное центробежное поле может непосредственно контролироваться величиной угловой скорости. Это увеличивает число степеней свободы системы и позволяет эффективно управлять течением.

Оценка содержания диссертации.

Рецензируемая диссертационная работа характеризуется полнотой, завершенностью и систематическим подходом к исследованию и изложению материала. Текст диссертации состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность и новизна исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, отражена теоретическая и практическая значимость результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной исследованиям конвективной неустойчивости реагирующих жидкостей. Отмечается, что среди химических реакций выделяется реакция нейтрализации кислоты основанием, имеющая простую, но нелинейную кинетику. Исследование конвективного движения реагентов в условиях нейтрализации удобно проводить с использованием квази-двумерной ячейки Хеле-Шоу, где растворы размещаются друг над другом в виде двухслойной системы. В большинстве случаев отличительной чертой как для смешивающихся, так и для несмешивающихся слоев является нерегулярная картина течения по обе стороны реакционного фронта. Однако в ряде экспериментов были получены структуры, отличающиеся высокой степенью регулярности. Механизм их образования не имел объяснения в рамках существующих теоретических моделей, что требовало учета новых, более тонких эффектов.

Особое внимание уделяется преимуществу вращающихся конфигураций, где интенсивность силового воздействия может напрямую контролироваться в эксперименте. Внутренний пласт задач о конвекции в условиях вращения рассматривался в связи с динамикой атмосферы. Предпочтительная для ряда приложений геометрия Хеле-Шоу с системой растворов формально не сводится к классической системе уравнений геофизической гидродинамики, поэтому существует необходимость формулировки исходных уравнений конвекции. В приближении Хеле-Шоу поле скорости двумерно и ортогонально скорости вращения, вследствие чего уравнения не содержат силу Кориолиса. Данный результат находится в противоречии с экспериментальными свидетельствами азимутального сноса хемоконвективной структуры против направления вращения. Таким образом, исходная модель Хеле-Шоу требует обобщения на случай вращающейся полости.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию хемоконвективной неустойчивости, возникающей в системе двух реагирующих растворов, помещенных в вертикальную ячейку Хеле-Шоу в поле тяжести. Разработана математическая модель явления, включающая систему уравнений реакции – диффузии – конвекции с поправкой в слабом плавучести уравнений движения, действие которой заключается в учете производства растворителя в зоне реакции. Предложено объяснение механизма спонтанного упорядочения конвективной структуры, наблюдавшейся в эксперименте. Анализ динамики в основном состоянии реакции – диффузии позволил выделить четыре различных профиля плотности, которые отвечают четырем сценариям эволюции системы. Образование воды вблизи фронта реакции уменьшает концентрацию растворов, что приводит к формированию плотностной потенциальной ямы, локализующей движение жидкости. При различных значениях начальных концентраций и интенсивности производства растворителя исследованы структура и эволюция режимов хемоконвекции. Построена бифуркационная диаграмма, демонстрирующая переход от нерегулярной пальчиковой структуры Рэлея – Тейлора к упорядоченной последовательности вихрей с растущим аспектным отношением. Для гомологического ряда солей рассчитаны значения параметра, отвечающего за интенсивность производства воды. Исследованы перестройки фронта реакции, включающие процессы рождения и коагуляции плюмов. Отмечается хорошее согласие полученных результатов с экспериментом.

В третьей главе исследуется хемоконвективная неустойчивость во вращающейся ячейке Хеле-Шоу. С помощью теории возмущений выведено уравнение движения несжимаемой жидкости с эффектом плавучести Кориолиса. Эффект подробно исследуется на примере задачи об устойчивости равновесия жидкости с внутренней генерацией компонента переноса. Проведен линейный анализ устойчивости, исследованы общие свойства спектра возмущений. Показано, что при отличном от нуля числе Экмана спектр наполняется колебательными возмущениями, и при достижении порога равновесие сменяется колебательной конвекцией. Исследование нелинейной динамики показало, что сила Кориолиса оказывает стабилизирующее влияние на основное состояние. Переход к хаотической конвекции с ростом управляющего параметра сопровождается бифуркациями циклов и торов, появлением странных аттракторов тороидального типа. Построена карта устойчивости на плоскости параметров число Рэлея – число Экмана. Показано, что течения в ячейке Хеле-Шоу демонстрируют характерное для силы Кориолиса азимутальное отклонение элемента жидкости в зависимости от скорости его движения.

Исследована двухслойная система смешивающихся жидкостей, реагирующих по схеме нейтрализации второго порядка в поле центробежной силы. Построена карта режимов неустойчивости в плоскости начальных концентраций реагентов. Показано, что зависимость коэффициентов диффузии от концентрации приводит к появлению локального минимума в профиле плотности, в области которого может развиваться локализованная конвекция. Изменение начальных концентраций приводит к формированию волны плотности, распространяющейся в направлении инерционного поля. На основе упрощенной системы уравнений реакции–диффузии аналитически определен бифуркационный критерий, разделяющий режимы конвекции. Численно исследованы эволюция и структура режимов, а также границы устойчивости в плоскости параметров.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей работы.

Следует отметить полученные в диссертации **основные результаты**:

– Установлен механизм динамической стабилизации хемоконвективной структуры в системе несмешивающихся реагирующих растворов соляной кислоты и основания. Показано, что регулярность структуры обеспечивается производством воды в ходе реакции.

– Определены значения начальных концентраций растворов и интенсивности производства воды, при которых регулярная структура вихрей сменяется неустойчивостью Рэлея – Тейлора.

– Установлена роль силы Кориолиса в квазидвумерных течениях вращающейся неоднородной жидкости в геометрии Хеле-Шоу. В рамках теории возмущений получены уравнения конвекции, включающие силу плавучести Кориолиса.

– Показано, что равновесие вращающейся жидкости с внутренней генерацией компонента переноса сменяется колебательной конвекцией. Под влиянием эффекта плавучести равновесие стабилизируется, а переход к хаотической конвекции осложняется бифуркациями тороидальных аттракторов.

– Выявлены сценарии развития неустойчивости в системе смешивающихся реагирующих растворов во вращающейся ячейке Хеле-Шоу. Показано, что нелинейное взаимодействие реакции и диффузии приводит к возникновению потенциальных ям в поле плотности. Под действием центробежной силы в них может возбуждаться два типа неустойчивости: ячейчатая конвекция и плотностная волна. Получено аналитическое выражение для бифуркационной кривой этих режимов.

Все результаты были получены впервые и не имеют прямых аналогов в других работах.

Научная и практическая значимость работы. Модели производства растворителя в зоне реакции и течения Хеле-Шоу в условиях вращения представляют фундаментальный интерес, расширяя представления об особенностях конвективного движения реагирующих жидкостей. Результаты исследования режимов неустойчивости реагирующих жидкостей во вращающейся ячейке Хеле-Шоу могут быть использованы в технологиях центрифугирования растворов драгоценных металлов, а также в ряде биомедицинских устройств на основе вращающихся платформ. Исследования массообмена в течениях Хеле-Шоу актуальны для отраслей химической промышленности, где требуется тщательный контроль движения растворов на малых пространственных масштабах: в микросмесителях, реакторах проточного типа.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью физических представлений, лежащих в основе предлагаемых моделей, использованием апробированных методов расчета и анализа результатов, сравнением с экспериментальными данными.

По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. На стр. 41, в конце, написано: полная математическая постановка задачи включает систему уравнений (2.15)–(2.20) с начальными (2.21) и граничными (2.22)–(2.23) условиями. Но полная постановка должна включать также условия на разделе при $y = 0$. Эти условия приводятся на стр. 40 в описательной, а не математической постановке. Лучше бы их было также сформулировать в терминах математики. Кроме того, к этим условиям возникают дополнительные вопросы.
2. Из каких соображений задаётся значение концентрации на разделе жидкостей, не сказано. Поскольку есть градиент концентрации, она не может быть равна начальному значению.
3. На стр. 40 сказано "Данную границу будем считать свободной, поэтому касательные напряжения и нормальная компонента скорости должны обращаться в нуль." С компонентой скорости всё понятно, но и в случае неподвижной плоской границы раздела возможно движение

жидкости вдоль неё. При этом касательные напряжения не обязательно равны нулю, они должны быть непрерывными. Нужно некоторое обоснование, почему их допустимо считать нулевыми.

4. В подписи к рис. 2.3. сказано "Синие квадраты соответствуют бифуркационным значениям управляющего параметра, красные круги — промежуточным значениям параметра." Но на самом рисунке нету ни кругов, ни квадратов.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области гидродинамических течений реагирующих жидкостей.

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Основные результаты исследований опубликованы в 29 работах, включая 8 статей в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа «Хемоконвекция в ячейке Хеле-Шоу в постоянном и переменном инерционном поле» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Уточкин Владимир Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа обсуждалась на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН» протокол заседания № 1 от 03.09.2025 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара протокол № 2 от 03.09.2025 г.

Заведующий лабораторией
Прикладной и вычислительной гидродинамики
ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук
Владимир Васильевич Кузнецов



Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»
главный научный сотрудник лаборатории
Прикладной и вычислительной гидродинамики
ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН
Владислав Васильевич Пухначев



630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15
тел.: +7 (383)3301241; +7(383)3333046; +7(383)3331819
e-mail: ermanyuk@hydro.nsc.ru
kuznetsov@hydro.nsc.ru
pukhnachev@gmail.com



Протокол заседания В.В. Кузнецова и В.В. Пухначева заверено.

секретарь ИГиЛ СО РАН

А. К. Хе

12.09.2025.