

ОТЗЫВ

**официального оппонента к.ф.-м.н. Субботина С.В.
на диссертационную работу Уточкина Владимира Юрьевича
«ХЕМОКОНВЕКЦИЯ В ЯЧЕЙКЕ ХЕЛЕ-ШОУ В ПОСТОЯННОМ И
ПЕРЕМЕННОМ ИНЕРЦИОННОМ ПОЛЕ», представленную на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».**

Диссертация Уточкина В.Ю. посвящена теоретическому исследованию хемоконвективной неустойчивости растворов в условиях действия постоянных и переменных силовых полей. Протекание химических реакций между компонентами, растворенными в жидкости, определяет локальное значение ее плотности и служит механизмом генерации конвективного движения. В свою очередь, механическое перемешивание реагентов управляет скоростью реакции, благодаря чему данные процессы могут взаимодействовать посредством обратной связи. Это подразумевает рост числа управляющих параметров и расширение спектра возможных режимов поведения жидкости. Соответствующие исследования имеют широкое применение в технологиях управления движением реагирующих растворов, использующихся в химической и фармацевтической промышленности. Вышесказанное обуславливает **актуальность** темы диссертации.

Содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающем 178 наименований. Общий объем диссертации – 140 страниц, включая 57 рисунков и 3 таблицы.

Во **введении** перечислены основные результаты диссертации, выносимые автором на защиту; обсуждаются актуальность и новизна работы; формулируются цель, задачи, теоретическая и практическая значимость исследования.

Первая глава является обзорной. Обсуждается современное состояние исследований конвективной неустойчивости реагирующих жидкостей. Отмечается, что среди химических реакций особого внимания заслуживает реакция нейтрализации. Протекая с высокой скоростью, данная реакция имеет фронтальный характер, и ее исследование в условиях конвективного движения целесообразно проводить с использованием ячейки Хеле-Шоу, куда реагенты размещаются в виде двухслойной системы. Отмечается технологическое преимущество вращающихся реакторов Хеле-Шоу, где интенсивность силового воздействия является контролируемой величиной.

Вторая и третья главы посвящены описанию проводимых автором теоретических исследований.

Вторая глава посвящена исследованию хемоконвективной неустойчивости системы двух несмешивающихся реагирующих растворов в вертикальной ячейке Хеле-Шоу, находящейся в поле тяжести. Построена математическая модель явления, которая включает систему уравнений реакции-диффузии-конвекции, записанную в приближениях Буссинеска и Хеле-Шоу. Модель учитывает производство воды в ходе реакции нейтрализации. Показано, что данный эффект приводит к динамическому формированию потенциальной ямы в поле плотности среды и обуславливает пространственную локализацию конвективного движения. Исследована динамика основного состояния реакции-диффузии в условиях механического равновесия. Выделены четыре различных сценария возникновения неустойчивости в системе в зависимости от начальных концентраций растворов. Численно исследованы структура и эволюция режимов конвекции. Построена диаграмма перехода между режимами Рэлея – Тейлора и регулярной конвекции в виде периодической последовательности вихрей, ограниченной плотностным потенциальным барьером. Исследована вторичная неустойчивость реакционного фронта, в ходе которой происходит образование концентрационных плюмов, насыщенных продуктом реакции. Показано, что данный процесс противодействует огрублению структуры при расширении области ее локализации, вследствие чего длина волны основного движения остается неизменной. Для гомологического ряда солей щелочных металлов рассчитаны значения параметра, определяющего объем генерируемого реакцией растворителя. Демонстрируется сравнение численных и экспериментальных результатов, между которыми наблюдается хорошее согласие.

В третьей главе исследуется неустойчивость в системе реагирующих жидкостей во вращающейся ячейке Хеле-Шоу. Методами теории возмущений получены уравнения конвекции во вращающейся ячейке Хеле-Шоу, которые включают слагаемое плавучести, обусловленной силой Кориолиса. Изучается влияние данного эффекта на движение жидкости в условиях протекания реакции нулевого порядка. Показано, что при отличном от нуля числе Экмана равновесие пороговым образом сменяется колебательной конвекцией. Построена карта устойчивости на плоскости управляющих параметров. В ходе численного исследования нелинейной динамики обнаружено, что сила Кориолиса стабилизирует основное состояние системы. Переход к хаотической конвекции с ростом управляющего параметра сопровождается появлением странных аттракторов тороидального типа. Показано, что при

достаточно высоких значениях центробежной перегрузки хемоконвективное движение осложняется дифференциальным вращением.

Наконец, исследована неустойчивость в системе смешивающихся реагирующих растворов с концентрационно-зависимой диффузией в поле центробежной силы. Взаимодействие процессов реакции и нелинейной диффузии формирует локальные неоднородности в поле плотности раствора. Этим объясняется развитие неустойчивости в виде периодической системы хемоконвективных ячеек, вызванной центробежным полем вблизи реакционного фронта. При изменении управляющих параметров задачи данный режим конвекции сменяется волной плотности ударного типа, возникающей благодаря резкому всплытию реакционного фронта к центру кюветы. Определены границы устойчивости режимов в пространстве управляющих параметров. Получено аналитическое выражение для критерия, определяющего переход между режимами ячеистой конвекции и плотностной волны.

В **заключении** представлены основные результаты исследований и перспективы дальнейшей работы.

Работа написана грамотным научным языком и очень хорошо проиллюстрирована. Основные результаты опубликованы в 8 различных работах в ведущих журналах (Physics of Fluids, Philosophical Transactions of the Royal Society, Microgravity Science and Technology, Interfacial Phenomena and Heat Transfer и др.). Можно выделить **наиболее важные результаты**, полученные в диссертации:

1. Предложен механизм образования периодической последовательности вихревых структур с растущим аспектным отношением в двухслойной системе несмешивающихся реагирующих растворов кислоты и основания в ячейке Хеле-Шоу в поле тяжести;
2. Получены уравнения конвекции, описывающие движение жидкости с плотностными неоднородностями во вращающейся ячейке Хеле-Шоу под действием эффекта плавучести Кориолиса;
3. Определены сценарии развития неустойчивости в двухслойной системе смешивающихся реагирующих растворов с концентрационно-зависимой диффузией во вращающейся ячейке Хеле-Шоу.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы в химической промышленности, например, в технологиях центрифугирования растворов, в смесителях и микрореакторах проточного типа, биомедицинских устройствах.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью физических представлений, лежащих в основе предлагаемых моделей, использованием апробированных методов расчета и анализа результатов. Сильной стороной данной теоретической работы является сравнение результатов с экспериментальными данными.

Существенных замечаний по тексту диссертации нет. После прочтения остаётся очень приятное впечатление. По стилю изложения материала можно судить о высоком профессиональном уровне автора. Результаты третьей главы представляют большой интерес для экспериментаторов. Тем не менее, к тексту диссертации могут быть высказаны следующие **вопросы и незначительные замечания**:

1. Карте течений, приведённой на рис. 1.1 (стр. 20), необходимо было уделить больше внимания: какие параметры отложены по осям, как ориентирована ось x на профилях плотности по отношению к полю силы тяжести, что означает заштрихованная область? Аналогичное замечание можно высказать и к рис. 1.2 (стр. 21): как расположены реагирующие жидкости, что показано цветом? Конечно, автор корректно ссылается на соответствующие статьи, откуда были взяты иллюстрации, но читателю было бы удобнее воспринимать информацию, не обращаясь к дополнительной литературе.

2. Раздел 2.3 в большей степени посвящен описанию экспериментальных результатов работ [96, 168], нежели детальному сравнению с численными результатами, в котором могли бы прозвучать характерные размерные времена, волновые числа, высота области перемешивания и т.д.

3. Непонятно, почему в формуле (3.4) и далее выбирается именно третий порядок малости. Из каких физических соображений это следует?

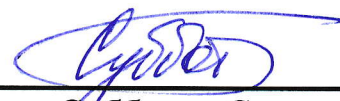
4. На стр. 82 вводится модифицированное число Экмана Ek , преимущества которого над традиционным не обсуждается. Далее при описании рис. 3.4 (стр. 91) говорится, что «... эффект Кориолиса существенно стабилизирует состояние механического равновесия». На самом деле, как подчёркивает и сам автор на стр. 95, с увеличением Ek вклад силы Кориолиса, наоборот, уменьшается. Как будто требуется противоположный вывод. Далее говорится, что на самом деле за эффект отвечает другой комплекс $R_\omega Ek$. Если так, то почему бы не представить пороги неустойчивости в зависимости именно от этого комплекса.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Работа Уточкина В.Ю. выполнена на очень высоком научном

уровне и прошла апробацию на конференциях всероссийского и международного уровней. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяющее требованиям п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", 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.

Доцент кафедры физики и технологии
ФГБОУ ВО «Пермский государственный
гуманитарно-педагогический университет»,
кандидат физ.-мат. наук



Субботин Станислав

Валерьевич

12.09.2025

Адрес: 614990, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24,
ПГГПУ, <http://pspu.ru>
Телефон – 8-952-326-54-17
E-mail: subbotin_sv@pspu.ru

Подпись Субботина С.В. заверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ПГГПУ»
Гранкина Е.Н.

