

«УТВЕРЖДАЮ»

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ

им. М.А. Лаврентьева

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Проспект Академика Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090
Для телеграмм: Новосибирск-90, Гидродинамика
Тел./факс: (8-383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru

14.05.2018 № 15320-16-2d-140

На № _____

Генеральный директор
федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук»

д.Ф.-м.н. С.В. Головин
мая 2018 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
Российской академии наук»

о диссертационной работе Мошевой Елены Александровны «Конвективные процессы в зоне смешивания реагирующих жидкостей»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа Мошевой Е.А. посвящена экспериментальному исследованию структуры и режимов конвективных и диффузионных течений в зоне смешивания реагирующих жидкостей в вертикальной и горизонтальной ячейке Хеле-Шоу.

В современной химической гидродинамике, предметом изучения которой являются тепломассоперенос, межфазный обмен, поверхностные явления и структура течений в реакционно-диффузионных системах, эпизодические исследования гидродинамических явлений силами специалистов-химиков уступили место систематическими исследованиям этих явлений специалистами-гидромеханиками. Необходимость углубленного исследования гидродинамической составляющей современных химических технологий обусловлена сильно нелинейной динамикой, сложным характером и многомасштабностью изучаемых течений, сопровождающихся развитием резких фронтов, диффузионных и конвективных потоков, гидродинамических неустойчивостей различных типов. Для детального изучения структуры течений, встречающихся в задачах современной химической гидродинамики, верификации и развития адекватных теоретических моделей, а также выбора оптимальных критериев подобия необходимо привлечение и развитие широкого арсенала методик экспериментальной гидродинамики, в частности - цифровых и аналоговых оптических методов. Актуальность данных тем и объясняется проведение диссертационного исследования.

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, списка литературы и приложения. Во введении обосновывается актуальность исследуемой темы, формулируются цель и задачи работы. В конце введения описаны структура диссертации,

кратко изложено содержание трех глав, приведены сведения об аprobации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава содержит обзор научной литературы, посвящённой экспериментальному и теоретическому исследованию хемоконвективного движения, обусловленного взаимодействием диффузионных процессов и химических реакций различного типа. Особое внимание в обзоре уделено анализу литературы, описывающей механизмы неустойчивости типа Релея-Тейлора, Релея-Бенара, двойного слоя, двойной диффузии, а также неустойчивости, вызванной конвекцией Марангони; динамику автокаталитических реакций и ее связь с гидродинамическими явлениями, химические реакции в двухслойных системах смешивающихся и несмешивающихся жидкостей. На основании выполненного анализа сделан вывод об актуальности детального экспериментального исследования фронтальной реакции нейтрализации в двухслойной системе смешивающихся жидкостей, позволяющей изучить основные ключевые особенности хемоконвективных течений в строгой модельной постановке.

Вторая глава содержит результаты экспериментального исследования устойчивости двухслойной системы смешивающихся жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу при протекании фронтальной реакции нейтрализации. Обнаружено, что в зависимости от исходных концентраций реагентов сценарий развития реакции определяется доминирующим механизмом массопереноса продуктов реакции, который может быть либо диффузионным, либо конвективным. В первом случае массообмен локализован в окрестности фронта реакции, во втором случае интенсивное конвективное движение охватывает весь объем жидкости над фронтом, вследствие чего скорость реакции увеличивается на два порядка.

Предложена физическая модель наблюдаемых явлений и введён новый безразмерный параметр, расчёт которого позволил получить карты режимов протекания реакции в координатах начальных концентраций и коэффициентов концентрационного расширения для всех пар реагентов. Следует особо отметить ясный и наглядный характер карт режимов реакции и их несомненную пользу при оптимальном планировании экспериментов. В рамках диффузионного режима исследовано влияние механизма двойной диффузии на процессы массопереноса вблизи фронта реакции. Продемонстрировано, что, несмотря на возникающую конвекцию, знак направления движения фронта реакции определяется знаком коэффициента пропорциональности при корневом законе, который ранее был получен теоретически для бесконвективного случая, что косвенно подтверждает диффузионный механизм массопереноса вблизи реакционной зоны. Также при исследовании данного режима обнаружен и описан новый тип неустойчивости семейства двойной диффузии, который был назван конвекцией концентрационно-зависимой диффузии. Неустойчивость характеризуется формированием периодической системы конвективных ячеек. Особенность структуры заключается в её локальном характере: ячейки заключены между двумя устойчиво стратифицированными слоями жидкости, что объясняется формированием локальных карманов плотности с неустойчивой стратификацией, обусловленных концентрационной зависимостью диффузии реагентов и продукта реакции.

Наибольший интерес представляет обнаруженный конвективный режим протекания реакции. Возникающая интенсивная конвекция в этом случае играет роль перемешивателя, который непрерывно поставляет свежие реагенты к зоне реакции и обеспечивает отвод образовавшегося продукта, тем самым интенсифицирует массообменные процессы, что в конечном итоге приводит к росту скорости реакции на два порядка, в сравнении с диффузионным режимом. Экспериментально продемонстрировано, что наибольшая скорость распространения фронта реакции наблюдается при наименьшем значении введенного безразмерного параметра.

В третьей главе исследуется влияние реакции нейтрализации на структуру и устойчивость концентрационного адвективного течения, возникающего при взаимном вытеснении смешивающихся реагирующих жидкостей в тонком горизонтальном канале. Показано, что структура вторичного течения изменяется в зависимости от числа растворённых компонент и их способности к реагированию. В случае одной растворённой компоненты в пристеночных областях канала обнаружено формирование неустойчивости Рэлеевской природы. Возникающая структура представляет собой систему спиральных конвективных валов, расположенных параллельно движению жидкости. Важным результатом является предложенный критерий устойчивости, на основе которого получена карта устойчивости концентрационного адвективного течения. Показано, что при наличии второй растворённой компоненты появляется осложняющий фактор в виде механизма двойной диффузии. В работе исследовано его влияние на ранее обнаруженную в пристеночных областях канала спиральную моду неустойчивости. Экспериментально продемонстрировано, что данный механизм может оказывать как дестабилизирующее действие, при котором спиральная мода формируется, так и стабилизирующее, при котором конвективные валы не развиваются ни при каких условиях. При непосредственном изучении реакции нейтрализации выявлено, что тип неустойчивости определяется режимом протекания реакции, ранее изученным в предыдущей главе. Продемонстрировано, что в рамках диффузионного режима структура вторичного течения зависит от соотношения интенсивностей неустойчивостей двойной диффузии, развивающихся в зонах выше и ниже фронта реакции. Также обнаружено, что наличие реакции нарушает симметрию как основного, так и вторичного течения. В рамках конвективного режима обнаружено нарушение адвекции, которое объясняется всплытием реакционной зоны вследствие действия сил плавучести.

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

Важной частью диссертации является **приложение**, в котором представлены результаты измерения концентрационной зависимости коэффициента диффузии в водных растворах реагентов, использованных в исследовании.

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

- введение критерия устойчивости, на основе которого получены карты режимов протекания реакции нейтрализации в двухслойной системе смешивающихся жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу;
- обнаружение в реагирующей системе нового типа неустойчивости семейства двойной диффузии, обусловленного сильной концентрационной зависимостью диффузии реагентов и продукта реакции;
- обнаружение нового типа неустойчивости концентрационного адвективного течения и введение критерия устойчивости;
- результаты исследования влияния реакции нейтрализации и явления двойной диффузии на спиральную моду неустойчивости, развивающуюся в пристеночных областях адвективного течения в тонком горизонтальном канале.

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

Научная и практическая значимость работы заключается в создании методической базы для проведения систематических исследований задач химической гидродинамики реагирующих жидкостей. Важно отметить, что результаты экспериментов использованы для всестороннего сопоставления с существующими теоретическими моделями и их верификации. Результаты исследования двухслойной системы

смешивающихся жидкостей в условиях реакции нейтрализации могут быть использованы в промышленности, в частности:

1. Обнаруженный режим интенсивного перемешивания может быть использован для увеличения эффективности хемосорбции при секвестрации углекислого газа в глубоких соляных пластах;

2. Полученные карты режимов реакции могут быть использованы с целью контроля скорости массообменных процессов в реакционной зоне.

Достоверность результатов обосновывается тщательной разработкой методик проведения экспериментов, подтверждается сравнением полученных результатов с известными данными других теоретических и экспериментальных работ. Важно отметить, что в представленном экспериментальном исследовании использован целый спектр самых современных методов оптических исследований гидродинамических течений, причем данные, полученные с помощью различных методов, дополняют друг друга, не оставляя никаких сомнений в обоснованности предложенной автором физической интерпретации наблюдаемых явлений и точности полученной количественной информации.

По содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. В тексте диссертации неоднократно упоминается корневая зависимость от времени для координаты фронта в диффузионном режиме. На рисунках (см. напр. 2.8) данные для этой величины приведены в линейном масштабе. Возможно, имело бы смысл представить также версию рисунка в логарифмическом масштабе.
2. В подписи к рисунку 2.13 имеется фраза «На карте изображены всевозможные профили плотности (5 штук)». По видимому, вместо «всевозможные» следует читать «все возможные».
3. В тексте несколько раз (напр. на стр. 71) используется слово «подвижка». Это слово не является техническим термином. По-видимому, уместнее писать «координатное устройство» или «координатник».
4. На стр. 95 обсуждается картина течения в пристенных областях, в которых слой более тяжелой жидкости расположен над более легкой. В результате совместного влияния горизонтальной адвекции и неустойчивости Релея-Тейлора в пристенной области образуются продольные структуры. Похожая ситуация возникает в горизонтальной ячейке Хеле-Шоу при вытеснении одной жидкости другой с образованием гравитационно неустойчивого слоя вблизи верхней крышки, в котором развивается продольная структура, пример расчета такого течения описан в работе: John M.O., Oliveira R.M., Huessler F.H.C., Meiburg E. Variable density and viscosity, miscible displacements in horizontal Hele-Shaw cells. Part 2. Nonlinear simulations // J. Fluid Mech. (2013), vol. 721, pp. 295-323 (см., напр. рис. 10).
5. В пункте 3.5.2. диссертации (стр. 114) обсуждается режим адвективного концентрационного течения в системе с реакцией, протекающей в конвективном режиме. При этом плотность реакционной зоны меньше плотности окружающей жидкости, вследствие чего она всплывает, нарушая адвекцию. Здесь уместно было бы упомянуть аналогию с известным в лимнологии явлением уплотнения за счет смешения: при смешении вод с температурой, например, 2 и 6 градусов Цельсия образуется вода с температурой, близкой к 4 градусам, которая тонет, т.к. эта температура соответствует температуре максимальной плотности. Такая ситуация имеет место, например, на границе термобара в озерах. В океанологии в англоязычной литературе для описания уплотнения за счет смешения используется термин

cabelling. Возможно, химические системы могут быть использованы для экспериментального моделирования таких явлений, т.к. лабораторные эксперименты с водой при температурах, близких к нулевой, бывают затруднены вследствие тепловых утечек и малых разностей плотностей.

Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования гидродинамических течений в зоне смешивания реагирующих жидкостей.

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

Основные результаты исследований опубликованы в 37 работах, включая 8 статей в журналах из списка ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа «Конвективные процессы в зоне смешивания реагирующих жидкостей» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мошева Елена Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «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 № 6 от 28.03.2018 г. Отзыв обсужден и одобрен на заседании №9 от 25.04.2018 г.

Заведующий лабораторией
«Экспериментальной прикладной гидродинамики»
ИГиЛ СО РАН
доктор физико-математических наук
Евгений Валерьевич Ерманюк

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

Руководитель семинара «Прикладная гидродинамика»
главный научный сотрудник
член-корреспондент РАН
Владислав Васильевич Пухначев

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
тел.: +7 (383) 330 12 41; +7(383) 333 30 46; +7(383)333 18 19
e-mail: ermanyuk@hydro.nsc.ru
kuznetsov@hydro.nsc.ru
pukhnachev@gmail.com








