

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертационную работу Мошевой Елены Александровны
«Конвективные процессы в зоне смешивания реагирующих жидкостей»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В диссертационной работе Е.А. Мошевой содержатся результаты экспериментальных исследований гидродинамической неустойчивости, структуры и эволюции конвективных течений, возникающих в двухслойной системе смешивающихся жидкостей в условиях протекания реакции нейтрализации.

Анализ литературы показывает, что относящиеся сюда области исследований в настоящее время вызывают большой интерес специалистов и активно развиваются. Поэтому **актуальность** темы диссертации не вызывает сомнений.

Анализ содержания диссертации. Общий объем диссертации составляет 149 страниц. Она состоит из Введения, 3 глав, Заключения, списка литературы (163 наименования) и Приложения. Работа содержит 69 рисунков и 6 таблиц.

Во *Введении* обоснована актуальность и новизна исследуемых в диссертации проблем, сформулированы цели и задачи, представлено краткое содержание работы, перечислены полученные результаты, описано их практическое и научное значение.

В *первой главе* представлен обзор научной литературы, по теме диссертации. Обоснована потребность в выполнении данной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию конвективной неустойчивости двухслойной системы смешивающихся жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу в условиях фронтальной реакции нейтрализации. В *разделе 2.1.* описана экспериментальная установка и методики измерений. В *разделе 2.2.* рассматриваются режимы протекания реакции. Показано, что, в зависимости от исходных концентраций реакция протекает либо в диффузионном режиме (ДР), в котором доминирующим механизмом массопереноса вблизи фронта реакции является диффузия, либо в конвективном (КР), характеризующимся формированием интенсивного конвективного течения, при котором скорость реакции может резко увеличиваться. В *подразделе 2.2.1.* обсуждаются механизмы формирования режимов реакции. В *подразделе 2.2.2.* исследуется ДР. Показано, что протекание реакции может сопровождаться развитием слабого конвективного движения, обусловленного неустойчивостью двойной диффузии: конвекции двойного слоя и конвекции двойной диффузии. Показаны области существования карт режимов. В рамках ДР обнаружен новый тип неустойчивости, характеризующийся пространственной локализацией и периодичностью возникающих конвективных структур. В *подразделе 2.2.3.* подробно исследуется КР. Изучено влияние физико-химических свойств реагентов на форму и размер области КР, а также скорость фронта реакции. Показано, что при переходе в КР скорость фронта реакции увеличивается на два порядка.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию структуры и устойчивости концентрационного адвективного течения, генерируемого начальным ступенчатым распределением плотности в горизонтальном канале. В *разделе 3.1.* приводится краткий обзор работ, посвященных изучению адвективного течения. В *разделе 3.2.* описана экспериментальная установка и методики измерений. В *разделе 3.3.* рассмотрена двухслойная система, один слой которой

состоит из воды, другой – водного раствора исследуемого вещества. Обнаружено, что при увеличении разности плотностей между слоями основное течение становится неустойчивым, в результате чего около верхней и нижней границ формируется вторичное течение в виде системы спиральных конвективных валов, ориентированных вдоль потока. Показано, что их появление обусловлено формированием неустойчиво стратифицированных участков в пристеночных областях канала. Показано также, что неустойчивость носит пороговый характер, что объясняется наличием двух конкурирующих механизмов, конвективного и диффузионного, способных с разной скоростью изменять толщину переходной зоны, меняя тем самым условия для возникновения неустойчивости. В *разделе 3.4.* рассмотрена двухслойная система, в каждом слое которой растворены разные вещества. Наличие двух компонент с разной скоростью диффузии может приводить к формированию неустойчивости двойной диффузии, влияние которой исследуется в этом разделе. В *разделе 3.5.* изучается влияние реакции нейтрализации на структуру и устойчивость адвективного течения в двухслойной системе, состоящей из водных растворов HNO_3 и NaOH . Обнаружено, что в зависимости от режимов протекания реакции, описанных во второй главе, наблюдаются разные типы течений. В *подразделе 3.5.1.* исследуется адвективное течение в условиях диффузионного режима протекания реакции. Показано, что наличие реакции нарушает симметрию течения, что обусловлено развитием разных типов конвекции двойной диффузии по разные стороны от фронта реакции. В *подразделе 3.5.2.* исследуется адвективное течение в условиях конвективного режима протекания реакции. Показано, что в рассматриваемом случае адвективное течение не формируется в силу развития интенсивной неустойчивости Рэлея-Тейлора, обусловленной всплыванием более легкой реакционной зоны.

В *Заключении* представлены основные результаты и выводы диссертации.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации сформулированы на основе большого объема тщательно выполненных экспериментальных исследований с применением современного научно-измерительного оборудования и надежных методик. Эксперименты выполнялись в контакте с теоретическими исследованиями и в достаточной мере согласуются с результатами последних, а также сопоставлены со сведениями, имеющимися в литературе. Поэтому основные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, представляется **вполне обоснованными**. Этим же обусловлена их **достоверность**.

В диссертации содержится целый ряд **новых результатов**. Среди них я бы особенно отметил:

– обнаружение нового режима протекания реакции, характеризующегося формированием неустойчивости в виде волны плотности ударного типа, аномально быстро распространяющейся в среде и резко увеличивающей скорость реакции;

- обнаружение и описание нового типа неустойчивости семейства двойной диффузии, характеризующегося пространственной локализацией и периодичностью возникающих конвективных структур; показано, что возникновение такой неустойчивости обусловлено зависимостью коэффициентов диффузии реагентов и продукта реакции от их концентрации;

- обнаружение спиральной моды неустойчивости концентрационного адвективного течения, формирующейся в пристеночных областях канала;

- результаты исследования влияние химической реакции нейтрализации на устойчивость концентрационного адвективного течения;

- методика и результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента диффузии от концентрации в водных растворах ряда неорганических кислот и гидроксидов щелочных металлов.

Полученные результаты представляются достаточно **значимыми** не только в **научном**, но и в **практическом** отношении. В частности, обнаруженный режим интенсивного перемешивания может быть использован в некоторых химических технологиях.

Результаты в достаточной мере **апробированы** – заслушивались и обсуждались во многих авторитетных аудиториях. Среди изданий, в которых опубликованы основные результаты диссертации – авторитетные международные журналы, в которых публикуемые материалы подвергаются серьезной экспертизе. Это – дополнительное свидетельство высокого уровня, содержательности и новизны результатов.

Замечания. Серьезных недостатков в диссертационной работе я не нахожу. Но изложение материала в некоторых случаях представляется не вполне оптимальным; встречаются неточные, на мой взгляд, формулировки, неполные пояснения, отдельные технические дефекты. Вот некоторые примеры.

На стр. 27 диссертации говорится: «В отсутствие межфазной границы основным источником формирования конвективного движения служат гравитационные механизмы, действующие при наличии неустойчивой стратификации жидкостей по плотности. Сюда относится классическая RT-конвекция, а также неустойчивости семейства двойной диффузии: DDC, DLC-конвекции». Но известно, что наличие неустойчивой стратификации жидкостей по плотности, вообще говоря, не является необходимым условием для гравитационных механизмов.

В формуле (2.13) не вполне понятно обозначение. Буквой U^* , судя по тексту, обозначается величина критической скорости движение фронта. Но в правой части этой формулы фигурирует безразмерная величина. Следовательно, U^* , видимо, какая-то безразмерная, нормированная скорость, но это не объяснено.

В автореферате фигурирует отношение коэффициентов диффузии δ_b . При этом, насколько я понимаю, упущено пояснение, какой коэффициент в числителе, какой – в знаменателе (в тексте диссертации это пояснено).

Величина δ_D названа отношением коэффициентов диффузии медленно диффундирующего реагента к быстро диффундирующему, но, как видно из приведенной формулы, это не совсем точно – в этой формуле отношение коэффициентов – не единственное слагаемое.

Термин «конвекция двойного слоя (DLC)» по-моему, пока активно используется в относительно узком кругу специалистов. Подавляющему большинству специалистов по данной специальности 01.02.05 он, скорее всего, незнаком. Например, в известных обзорах [21-23], на которые ссылается автор, я не нахожу такой аббревиатуры. Поэтому, как мне представляется, в автореферате несколько недостает пояснений на этот счет или хотя бы литературной ссылки.

Геофизические приложения некоторых исследований не очень удачно названы «климатическими» (стр. 15). Другие примеры не очень удачных в литературном отношении формулировок: «Варьируя концентрации реагентов, в

верхнем слое могла быть как кислота, так и щёлочь» (стр. 28). «Показано, что для систем с химической реакцией и без условия возникновения различны» (стр.24).

Некоторые неточности и технические дефекты содержатся в списке литературы. Например, в названии книги [34] явно пропущено, по меньшей мере, одно слово. В [29] нет интервалов между словами. В [18, 112, 122, 133] имена собственные написаны с маленькой буквы.

Имеющиеся замечания не затрагивают основные результаты диссертационной работы и не снижают ее общей положительной оценки.

Заключение.

Исходя из вышеизложенного, полагаю, что представленный Е.А. Мошевой материал следует признать целостной и законченной диссертацией – научно-квалификационной работой, уровень и результаты которой соответствуют критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГБУ "Научно-
производственное объединение "Тайфун"
(Росгидромет)


Ингель Лев Ханаанович
03.05.2018

Адрес: 249038, Россия, Калужской обл., г. Обнинск,
ул. Победы, 4, ФГБУ «НПО «Тайфун».
Телефон – 8-903-026-62-35
E-mail: lev.ingel@gmail.com

Подпись Ингеля Л.Х. заверяю

Ученый секретарь
ФГБУ "НПО "Тайфун" А.И. Бурков

