

УДК 532.529.2 532.5.013.4  
PACS 47.20.-k

## Хемоконвективное течение в гравитационном и переменном инерционном поле

Е. А. Мошева, Н. В. Козлов

Институт механики сплошных сред УрО РАН  
614013, Пермь, ул. Ак. Королева, 1  
email: mosheva@icmm.ru, kozlov.n@icmm.ru

Экспериментально исследована конвективная неустойчивость, возникающая на границе между двумя реагентами в вертикальной ячейке Хеле-Шоу при фронтальной реакции нейтрализации. Исследуемая неустойчивость представляет собой спонтанно формирующуюся плоскую волну плотности, аномально быстро распространяющуюся в среде в направлении действия силы тяжести. Изучена эволюция структуры течения и получены поля скорости при различных вибрационных ускорениях. Рассмотрен вопрос о возможности управления режимом хемоконвекции посредством вибрационного воздействия.

**Ключевые слова:** реакция нейтрализации; конвекция; вибрации; гидродинамическая неустойчивость;

*Поступила в редакцию 14.01.2020; принята к опубликованию 04.02.2020*

## Chemoconvective flow in gravitational and variable inertial field

E. A. Mosheva, N. V. Kozlov

Institute of continuous media mechanics UB RAS, Ak. Koroleva St. 1, 614013, Perm  
email: mosheva@icmm.ru, kozlov.n@icmm.ru

The convective instability that develops at the boundary between two reagents in the vertical Hele-Shaw cell during the neutralization reaction is experimentally studied. The instability in the form of a plane density wave spontaneously arises and then propagates in the medium at abnormally high rate. Evolution of the flow structure is studied and the velocity fields are obtained at different vibrational accelerations. The question of possibility to control the instability by vibrations is discussed.

**Keywords:** neutralization reaction; convection; vibrations; hydrodynamic instability

*Received 14.01.2020; accepted 04.02.2020*

doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-52-61

### 1. Введение

Динамика развития фронтальной реакции  $A + B \rightarrow C$ , протекающей в двухслойной смешивающейся системе жидкостей, интересна как с фундаментальной точки зрения, так и для много-

численных технологических приложений, в том числе процессов экстракции, поглощения углекислого газа, нефтепереработки и очистки грунтовых вод [1].

Ввиду простой кинетики особое внимание среди множества реакций данного типа уделяется реакции нейтрализации кислоты основанием. При

послойном контакте реагентов между ними формируется тонкая горизонтальная зона реакции, где происходит взаимодействие диссоциированных ионов исходных реагентов, с последующим образованием водного раствора соли. Характерное время реагирования ионов составляет  $\tau_r \approx 10^{-11}$  с. Таким образом, продукт реакции образуется сразу после их столкновения. Несмотря на высокую скорость реакция может протекать сутками, так как время, требуемое на то, чтобы ионы столкнулись, а затем прореагировали, определяется механизмом переноса реагентов вблизи реакционного фронта. Если массообмен в системе осуществляется только за счёт диффузии, то вероятность встречи ионов мала и реакция в этом случае будет протекать достаточно медленно.

В серии работ [2–4] была продемонстрирована возможность увеличения скорости реакции за счёт включения конвективного механизма переноса. На примере фронтальной реакции нейтрализации, протекающей в двухслойной системе, состоящей из водных растворов кислоты и основания, было показано, что концентрационные и тепловые изменения в окрестности реакционного фронта являются причиной формирования неустойчивых градиентов плотности. В поле силы тяжести это может вызывать деформацию фронта вследствие развития конвективного движения в виде пальчиковых структур. Характерное значение интенсивности обнаруженной конвекции было невелико, поэтому и увеличение скорости реакции было незначительным. Позже при исследовании этой же реакционной системы был выявлен новый режим протекания реакции [5]. Его отличительной особенностью является формирование гидродинамической неустойчивости в виде плоской волны плотности, быстро распространяющейся в среде в направлении действия силы тяжести. При этом в её спутном потоке возникает интенсивное конвективное движение, обеспечивающее активное перемешивание верхнего слоя системы и ускорение массообменных процессов вблизи фронта. Непрерывная доставка свежего реагента из верхнего слоя к реакционной зоне и отвод продукта приводят к значительному росту скорости реакции, которая превышает обнаруженные ранее на несколько порядков.

Возможность управления скоростью реакции посредством включения конвективного механизма переноса инициировала ряд исследований, посвящённых поиску эффективных методов обеспечения конвекции и контроля её интенсивности. На примере реакции растворения углекислого газа в водном растворе щелочи, протекающей по схеме  $A + B \rightarrow C$  в вертикальной ячейке Хеле-Шоу, авторами работы [6] продемонстрировано, что при определенных концентрациях щелочи на границе раздела фаз формируется ячеистая конвективная

структура, ускоряющая процесс растворения газа. Исследуя задачу в широком диапазоне физических свойств растворителя, обнаружено, что путем варьирования концентрации и коэффициента концентрационного расширения можно не только изменять интенсивность возникающей конвекции, но и полностью подавить её.

Исследование по управлению конвективным движением посредством варьирования геометрических параметров используемого реактора теоретически рассматривается в [7]. При исследовании динамики реакции  $A + B \rightarrow C$  в проточном канале обнаружено, что интенсивность конвективного течения, а также величину выхода продукта реакции можно контролировать посредством локального изменения толщины зазора используемого канала.

Влияние невесомости и периодического изменения гравитационного поля на движение химического фронта, формирующегося при автокаталитической реакции, было исследовано в условиях параболического полета [8, 9]. Численно и экспериментально показано, что фронт способен существенно деформироваться и изменять скорость своего распространения. Авторы отмечают, что важную роль в ускорении (или замедлении) фронта играют прифронтные конвективные движения, вызываемые неоднородностями плотности.

Управление устойчивостью реагирующей системы при реакции  $A + B \rightarrow C$  с помощью локального изменения температуры теоретически и экспериментально обсуждается в [10]. Авторы показывают, что локальное охлаждение боковых стенок реактора позволяет подавить формирование конвекции, сохраняя при этом механическое равновесие системы. Также стабилизирующее действие температуры теоретически рассмотрено в [11], где на примере фронтальной реакции полимеризации показано, что рост температуры на фронте обеспечивает его стабилизацию и повышает устойчивость.

Вышеупомянутые способы влияния на реакционные системы зарекомендовали себя как действенные, однако в связи с тем, что в реакционных системах основным триггером конвекции является неоднородное распределение плотности, такие системы могут быть также чувствительны к внешним инерционным полям, создаваемым вибрациями. Известно, что вибрации оказывают ориентирующее действие – поверхность устанавливается перпендикулярно направлению вибрационного воздействия [12]. В экспериментальной работе [13] показано, что в таких условиях зарождение конвекции Рэлея–Тейлора, обусловленной наличием неустойчивого градиента плотности, может быть подавлено, поэтому и в реакционных системах также можно ожидать либо стабилизацию конвекции, либо изменение её структуры.

Некоторые исследования по управлению дина-

микой реакции посредством использования переменных инерционных полей уже были проведены. В серии работ [14, 15] при изучении динамики автоколебательной реакции Белоусова-Жаботинского в условиях высокочастотных вибраций обнаружена смена типа структурообразования вследствие развития поверхностной турбулентности.

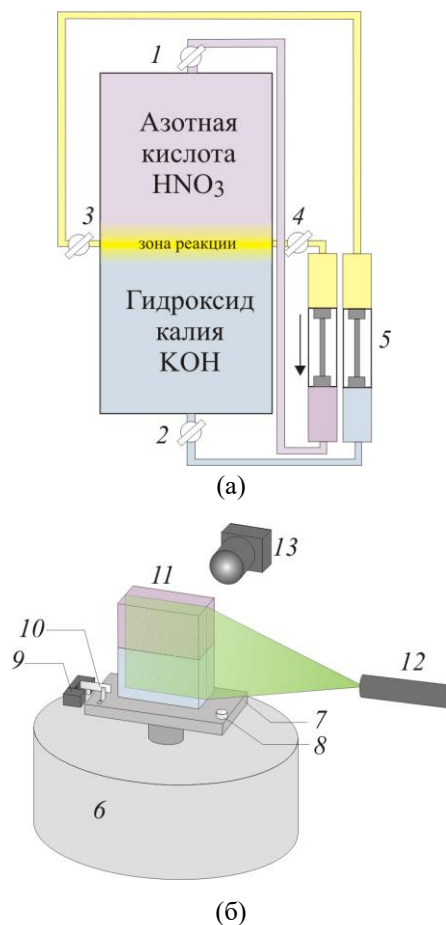
Исследованию влияния вертикальных вибраций на двухслойные реакционные системы посвящена единственная теоретическая работа [16], где показана возможность возникновения параметрического резонанса, приводящего к формированию горизонтального ряда конвективных ячеек, интенсифицирующих массоперенос в окрестности реакционной зоны, что увеличивает скорость реакции. Экспериментальные работы по изучению влияния вертикальных вибраций на двухслойные реакционные системы на сегодняшний день отсутствуют.

В данной работе рассматривается вопрос о возможности управления динамикой реакции нейтрализации, протекающей в двухслойной системе смешивающихся жидкостей в вертикальной ячейке Хеле-Шоу, посредством воздействия высокочастотными вибрациями, ориентированными перпендикулярно реакционной зоне. Экспериментальные результаты получены для различных значений амплитуды вибраций при фиксированной частоте. Проведен сравнительный анализ структуры и интенсивности конвективного течения в случае гравитационного и переменного инерционного поля.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты проводились в ячейке Хеле-Шоу, образованной двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами (рис. 1, а), размерами: ширина  $l = 5.0$  см, высота  $h = 10.0$  см, толщина  $d = 0.12$  см. Ячейка оснащена четырьмя каналами: подающими (1 и 2 на рис. 1, а), расположенными на верхней и нижней границах ячейки соответственно, и отводящими (3 и 4 на рис. 1, а), расположенными в её боковых стенках. Все каналы снабжены кранами и подключены к насосу 5, который обеспечивает синхронный процесс подачи жидкостей через подающие каналы и отвод жидкости из зоны контакта слоёв через отводящие. Используемая конструкция ячейки позволяет создавать в начальный момент времени вертикальную двухслойную систему жидкостей с горизонтальной границей между слоями.

В качестве рабочих жидкостей были использованы водные растворы азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  и гидроксида калия  $\text{KOH}$  с концентрациями  $C_a$  и  $C_b$ , соответственно. Основные физико-химические



**Рис. 1.** Схема эксперимента: а – ячейка Хеле-Шоу: 1, 2 – подающие каналы, 3, 4 – отводящие каналы, 5 – насос; б – экспериментальная установка: 6 – электродинамический вибратор, 7 – стол вибратора, 8 – акселерометр, 9 – оптопара, 10 – обтюратор, 11 – ячейка Хеле-Шоу, 12 – лазер, 13 – видеокамера

параметры используемых реагентов приведены в таблице.

Реакция нейтрализации может протекать в двух основных режимах, выбор между которыми определяется величиной безразмерного параметра  $K_p$ , равного отношению плотности зоны реакции к плотности верхнего реагента, предложенного в работе [5]. Значение  $K_p = 1$  соответствует случаю нейтральной плавучести зоны реакции по отношению к расположенной над ней кислоте. Если  $K_p > 1$ , то зона реакции тяжелее, а вся система в целом находится в механическом равновесии. Характерное время протекания реакции в этом случае сопоставимо с диффузионными временами и составляет десятки часов. Такой режим назван диффузионно-управляемым. В обратном случае, при  $K_p < 1$ , зона реакции оказывается легче верхнего слоя, обуславливая её всплытие, вследствие неустойчивости Релея–Тейлора. В результате вся верхняя часть системы «переворачивается»; это со-

Свойства используемых реагентов

№ реакции	Концентрации реагентов, моль/л	Кинематическая вязкость $\text{HNO}_3^*$ , сСт	Коэффициент диффузии $\text{HNO}_3^+$ , $10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$	Плотность, г/см <sup>3</sup>		
				Реакционная зона	$\text{HNO}_3^*$	$\text{KOH}^*$
1	$C_a = 0.70, C_b = 0.50$	0.993	2.85	1.018	1.022	1.023
2	$C_a = 1.30, C_b = 0.90$	0.990	3.01	1.034	1.041	1.042
3	$C_a = 1.90, C_b = 1.40$	0.992	3.13	1.052	1.062	1.066
4	$C_a = 2.60, C_b = 1.90$	1.000	3.22	1.069	1.085	1.089

Значения приведены для температуры  $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ . \* [17], + [18]

проводится интенсивной конвекцией, локализованной в верхнем слое системы. При этом характерное время протекания реакции составляет несколько минут. Данный режим реакции был назван конвективно-управляемым. В данной работе реакция при выбранных концентрациях протекает в конвективно-управляемом режиме.

Для обеспечения вибраций применялся электродинамический вибратор с высокой точностью позиционирования подвижного столика, обеспечиваемой за счёт обратной связи между управляющим модулем и оптическим датчиком, интегрированным непосредственно в сам вибратор. В качестве источника колебаний жидкости выступали неоднородности плотности, появление которых обусловлено вариацией концентраций реагентов и тепловыделением вследствие экзотермического характера реакции. Однако максимальное изменение температуры, измеренное термопарным зондом вблизи фронта реакции, не превышает 1 К. В таких условиях можно утверждать, что распределение общей плотности в системе зависит только от концентрационных изменений, связанных с выгоранием исходных реагентов и образованием продукта реакции.

Эксперименты были проведены при частоте  $f_v = 40 \text{ Гц}$  и амплитуде, которая изменялась в диапазоне  $b = 0.2\text{--}0.4 \text{ см}$ , что соответствовало значениям безразмерного вибрационного ускорения  $\Gamma = (2\pi f_v)^2 b / g = 15\text{--}30$ , где  $g$  – ускорение свободного падения.

Перед началом эксперимента ячейка закреплялась вертикально на столике электродинамического вибратора и заполнялась более плотной жидкостью – раствором КОН. После того как весь воздух из ячейки выкачивался, начинался процесс заливки устойчиво стратифицированной двухслойной системы. При помощи насоса через впускные отверстия синхронно закачивались водные растворы кислоты и щелочи. Одновременно избыточная жидкость из зоны контакта слоёв отводилась через два выпускных отверстия. Заливочный процесс продолжался до тех пор, пока диффузионная зона между слоями не достигала минимально возможного значения. После этого заливка прекращалась, входные и выходные каналы закрывались, и вклю-

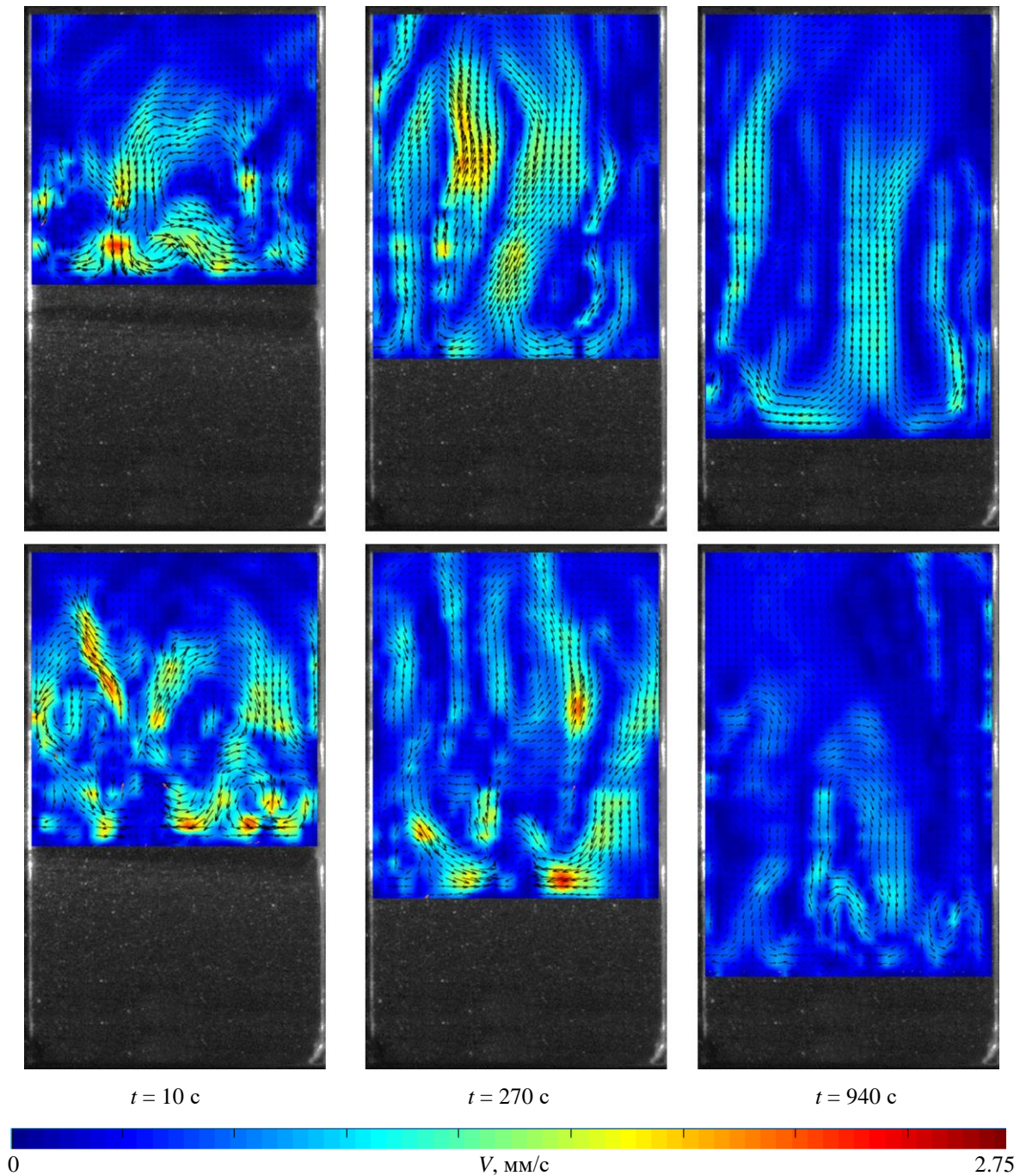
чались вибрации. Этот момент времени принимался за начало эксперимента.

Структура возникающих течений и их интенсивность были исследованы при помощи метода трассерной визуализации. В качестве трассеров использовались частицы нейтральной плавучести Rilsan диаметром 40 мкм, которые добавлялись только к менее плотному раствору, кислоте. Предварительные эксперименты показали, что используемые частицы не влияют на структуру и скорость исследуемого течения. При помощи твердотельного постоянного лазера и асферической линзы создавался световой нож, который заводился через боковую грань ячейки вдоль её средней плоскости, как показано на рис. 1, б. Видеозапись эксперимента осуществлялась через переднее стекло ячейки.

До начала эксперимента используемые растворы и ячейка Хеле-Шоу длительное время выдерживались в лабораторной комнате, снабженной системой климат-контроля, поддерживающей температуру окружающей среды  $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ , что обеспечивало условие изотермичности при проведении эксперимента и исключало возможность формирования тепловой конвекции.

Обработка изображений с помощью PIV-метода осуществлялась в среде MATLAB. Видеозапись эксперимента экспортировалась в серию последовательных кадров. Затем файлы изображений группировались в подсерии длительностью  $\sim 1 \text{ с}$ , каждая из которых состояла из 20 кадров с временным шагом 50 мс. Как показали измерения, за это время поле скорости не изменялось, и течение считалось квазистационарным. Из каждой подсерии формировалась последовательность пар вида  $i\text{--}(i + N)$ , где  $i$  и  $N$  – целые числа,  $i = 1\text{--}20$ .  $N$  было выбрано равным 5, что соответствует парам с временным шагом  $\Delta t_1 = 250 \text{ мс}$ . Для снижения погрешности расчётов результаты, полученные для 20 пар изображений в одной подсерии осреднялись, давая одно поле скорости. Временной шаг между началами последовательных подсерий составил  $\Delta t_2 = 10 \text{ с}$ . Таким образом, получалась последовательность полей скорости с шагом  $\Delta t_2$ , позволявшая наблюдать эволюцию течения.





**Рис. 2.** Временная эволюция полей скорости, полученная для случая постоянного гравитационного (верхний ряд) и переменного инерционного поля (нижний ряд). Указанное время отсчитывается от момента начала эксперимента. Частота и амплитуда вибраций:  $f = 40 \text{ Гц}$  и  $b = 0.35 \text{ см}$

### 3. Результаты

#### 3.1. Структура конвективного течения

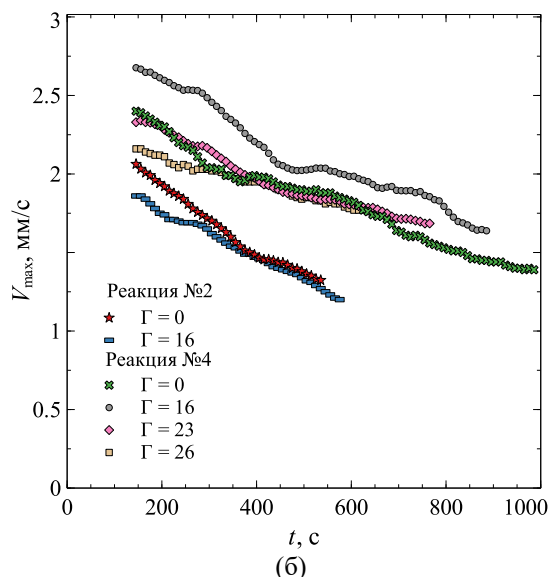
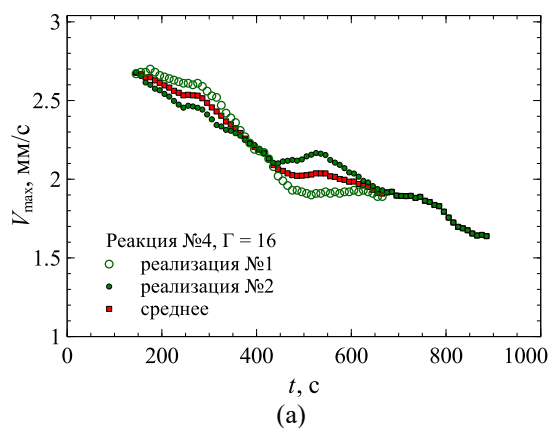
На рис. 2 представлено две серии изображений, демонстрирующих временную эволюцию поля скорости, полученных методом PIV. Первая серия (верхний ряд) характеризует изменение поля скорости со временем в случае постоянного гравитационного поля, вторая серия (нижний ряд) – для

экспериментов в переменном инерционном поле. Ввиду того, что исследуемое течение локализовано над реакционной зоной, поля скорости приведены только для этой области. На обеих сериях хорошо видно формирование характерного для данного режима реакции конвективного течения в виде всплывающих концентрационных плюмов. Наблюдения показали, что в исследованной области параметров вибрационное воздействие слабо влияет на тип структуры возникающей конвекции.

Интересная особенность течения состоит в том, что структуры непрерывно изменяются: крупные ячейки распадаются, а мелкие объединяются; горизонтальные координаты концентрационных плюмов при этом также изменяются.

### 3.2. Интенсивность конвективного течения

В качестве критерия оценки интенсивности течения была выбрана его максимальная скорость. С целью контроля повторяемости результатов при заданной частоте и амплитуде проводилось два независимых эксперимента. На рис. 3, а, приведены две серии экспериментальных точек, полученные при одинаковых параметрах. Величина  $V_{\max}$  для реализаций № 1 и 2 выражает бегущее среднее максимальной скорости течений. Как видно, подобно структуре течений, максимальная скорость испытывает флуктуации, однако в среднем эксперименты хорошо воспроизводятся.



**Рис. 3.** Зависимость максимальной скорости конвективного течения от времени для различных значений вибрационного воздействия  $\Gamma$ . Значение  $\Gamma = 0$  соответствует условиям постоянного гравитационного поля

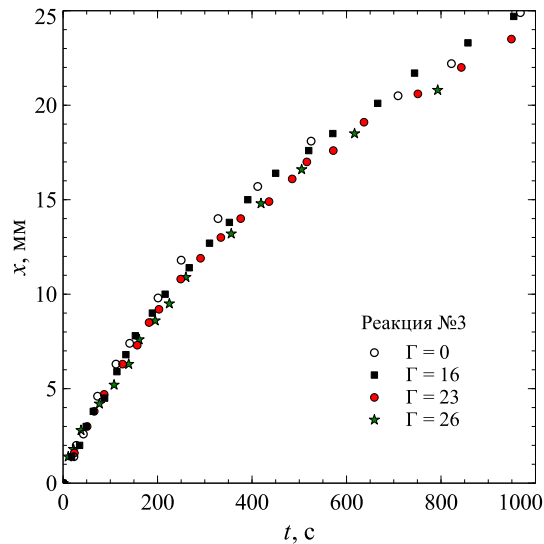
На рис. 3, б приведены результаты для постоянного гравитационного и переменного инерционного полей, полученные при различных параметрах экспериментов. Во всех случаях интенсивность конвекции со временем снижается. Это объясняется тем, что неустойчивый градиент плотности, вызывающий конвекцию, по мере протекания реакции исчезает. В начальный момент времени его величина, равно как и интенсивность конвекции максимальна. Во время реакции конвекция обеспечивает постоянный отвод образующегося продукта (водный раствор соли) из зоны реакции и его смешение с кислотой, что обуславливает уменьшение её концентрации и плотности вследствие разбавления. Таким образом, исходное значение перепада плотности  $\Delta\rho$  между верхним реагентом и зоной реакции уменьшается, вызывая при этом снижение интенсивности конвекции. К концу эксперимента плотность верхнего слоя уменьшается настолько, что становится соизмерима с плотностью реакционной зоны. В этот момент конвективное движение, вызванное неустойчивостью Рэлея–Тейлора, полностью затухает и система становится глобально устойчивой.

Экспериментальные точки разбиваются на две группы, определяемые концентрацией реагентов: скорость при реакции № 2 ниже, чем при реакции № 4 (рис. 3, б). Хорошо видно, что результаты, полученные в экспериментах, проведенных с одинаковыми начальными концентрациями реагентов, но при различных значениях безразмерного ускорения ( $\Gamma = 0-30$ ), имеют близкие значения, но тем не менее расслаиваются по параметру  $\Gamma$ . Это указывает на то, что вибрационное воздействие в исследуемом диапазоне перегрузок слабо влияет на интенсивность течения.

### 3.3. Скорость распространения фронта

Возникающая в конвективно-управляемом режиме реакции неустойчивость Рэлея–Тейлора обеспечивает интенсивный массообмен в системе, что приводит к значительному росту скорости выгорания реагентов и образования продукта. При этом активное всплытие и обновление реакционной зоны (фронта реакции) приводит к её быстрому распространению в сторону неподвижного нижнего слоя в форме волны плотности. На рис. 4 представлены зависимости координаты положения реакционного фронта от времени для различных значений перегрузок. Координата фронта реакции является интегральной характеристикой, однозначно характеризующей скорость массопереноса. Видно, что колебания структуры течений и флуктуации скорости конвекции не оказывают заметного влияния на форму кривой изменения координаты фронта со временем. Эта зависимость монотонна в отличие от приведённых на рис. 3, как при вибрациях, так и при  $\Gamma = 0$ . Хорошо видно, что результаты вибрационных экспериментов совпа-

дают с зависимостью, полученной для гравитационного случая ( $\Gamma = 0$ ). Таким образом, в исследованном диапазоне перегрузок вибрационное воздействие не оказывает существенного влияния на скорость распространения фронта и, следовательно, на скорость протекания реакции.



**Рис. 4.** Зависимость координаты положения фронта реакции от времени для различных значений вибрационного воздействия  $\Gamma$ , полученная для реакции № 3. Значение  $\Gamma = 0$  соответствует условиям постоянного гравитационного поля

#### 4. Обсуждение результатов

В рамках теории термо-вибрационной конвекции рассмотрена задача о влиянии высокочастотных поступательных вертикальных вибраций на плоский слой, подогреваемый снизу [12]. Решение в постановке Хеле-Шоу получено позднее в [19]. С математической точки зрения уравнения для описания тепловой и концентрационной конвекции подобны, поэтому далее проанализируем полученные в настоящей работе экспериментальные результаты в сопоставлении с теоретическими расчётами. Управляющими параметрами, которые определяют динамику жидкости в поле вибраций, являются число Рэлея  $Ra$  и вибрационный параметр  $R_v$  [12]. В постановке Хеле-Шоу эти параметры записываются следующим образом [19]:

$$Ra = \frac{g\beta\nabla T d^4}{\nu\chi},$$

$$R_v = \frac{(b\Omega\beta\nabla T d^2)^2}{2\nu\chi},$$

где  $\Omega = 2\pi f_v$  – циклическая частота вибраций,  $\beta$  – коэффициент объемного расширения,  $\nabla T$  – вертикальный градиент температуры,  $\chi$  – коэффициент

температуропроводности,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $d$  – толщина зазора полости. Для рассматриваемого случая концентрационно-вибрационной конвекции переопределим управляющие параметры следующим образом:

$$Ra = \frac{g\nabla\rho d^4}{\rho_0\nu D},$$

$$R_v = \frac{(b\Omega\nabla\rho d^2)^2}{2\rho_0^2\nu D},$$

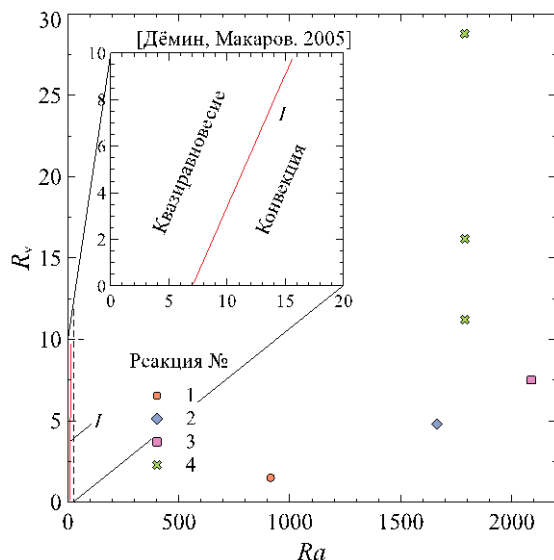
где  $\nabla\rho$  – вертикальный градиент плотности, обусловленный градиентом концентрации,  $\rho_0$  – плотность растворителя (воды),  $\nu$  – кинематическая вязкость кислоты,  $D$  – коэффициент диффузии кислоты. Для оценки вертикального градиента плотности воспользуемся соотношением  $\nabla\rho \sim \Delta\rho/h$ , где  $\Delta\rho$  – перепад плотности между реакционной зоной и верхним реагентом,  $h$  – высота слоя верхнего реагента. Плотность реакционной зоны вычислялась согласно [5].

Теоретические численные расчёты предсказывают существование области вибрационного подавления конвекции. Граница такой области для термо-вибрационной конвекции в ячейке Хеле-Шоу с постоянным вертикальным градиентом температуры, найденная в [19], представлена кривой  $I$  на рис. 5. Условия настоящего эксперимента не имеют полной аналогии с расчётами [19], в первую очередь, из-за того, что в силу нулевого потока массы через широкие грани ячейки на последних не будет поддерживаться постоянный градиент концентрации. Несмотря на это по ряду условий существуют сходства. Во-первых, рассмотрим динамику реагирующей системы на коротком отрезке времени, на котором можно пренебречь изменением поля концентрации. В проведённых экспериментах – это интервал порядка 1 с. Во-вторых, исследуемая хемоконвекция протекает только в верхней части ячейки, ограниченной снизу зоной реакции, а сверху границей ячейки. Таким образом, рассматриваемая область эквивалента горизонтальному плоскому слою. В-третьих, градиент плотности, соответствующий эксперименту, рассчитывается по концентрации реагента и продукта только для начального момента времени. На рис. 5 представлены точки, соответствующие значениям  $Ra$  и  $R_v$  в начале химической реакции для различных пар жидкостей. С течением времени можно ожидать, что положение точек на плоскости  $(Ra, R_v)$  будет изменяться.

Поскольку среди известных авторов работ только [19] является наиболее близкой к настоящему эксперименту, разумно провести качественное сравнение, которое позволяет дать, по меньшей мере, представление о порядках величин  $Ra$  и  $R_v$  и позволяет соотнести режимы конвекции, наблюдаемые в экспериментах, с возможным по-



рогом вибрационного подавления течений. Как видно из рис. 5, экспериментальные результаты соответствуют области развитой конвекции, что хорошо согласуется с отсутствием существенного влияния вибраций на режим течений.



**Рис. 5.** Карта режимов конвекции на плоскости  $(Ra, R_v)$ . Точками нанесены координаты проведенных в данном исследовании экспериментов. Кривая I представляет теоретический порог устойчивости термо-вибрационной конвекции [19]

## 5. Заключение

Экспериментально исследовано влияние переменного инерционного поля, создаваемого вертикальными высокочастотными вибрациями полости на динамику фронтальной реакции нейтрализации, в вертикальной ячейке Хеле-Шоу, протекающей в конвективно-управляемом режиме. С помощью метода PIV впервые получены поля скорости конвективного течения для гравитационного и вибрационного случаев. Проведены экспериментальные измерения скорости течения и скорости распространения фронта. Сравнительный анализ результатов показал, что в исследованном диапазоне перегрузок ( $\Gamma = 0-30$ ) вибрации не оказывают существенного влияния ни на структуру течения, ни на его интенсивность, ни на скорость распространения реакционного фронта. Сравнение с теоретическими результатами для термо-вибрационной конвекции показывает, что можно ожидать существенного вибрационного эффекта на парах жидкостей, которым будут соответствовать меньшие значения  $Ra$  и/или более высокие значения параметра  $R_v$ .

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-31-00308 мол\_a).

## Список литературы

1. Wylock C., Dehaeck S., Rednikov A., Colinet P. Chemo-hydrodynamical instability created by  $\text{CO}_2$  absorption in an aqueous solution of  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  // *Microgravity Science and Technology*. 2008. Vol. 20. P. 171–175. DOI: 10.1007/s12217-008-9022-7
2. Almarcha C., Trevelyan P. M. J., Grosfils P., De Wit A. Chemically driven hydrodynamic instabilities // *Physical Review Letters*. 2010. Vol. 104, 044501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.044501
3. Almarcha C., R'Honi Y., De Decker Y., Trevelyan P. M. J., Eckert K., De Wit A. Convective mixing induced by acid-base reactions // *The Journal of Physical Chemistry B*. 2011. Vol. 115. N. 32. P. 9739–9744. DOI: 10.1021/jp202201e
4. Kuster S., Riolfo L. A., Zalts A., El Hasi C., Almarcha C., Trevelyan P. M. J., De Wit A., D'Onofrio A. Differential diffusion effects on buoyancy-driven instabilities of acid-base fronts: the effect of color indicator // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2011. Vol. 13, 17295. DOI: 10.1039/C1CP21185D
5. Bratsun D., Mizev A., Mosheva E., Kostarev K. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids // *Physical Review E*. 2017. Vol. 96. N. 5, 053106. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.053106
6. Loodts V., Thomas C., Rongy L., De Wit A. Control of convective dissolution by chemical reactions: General classification and application to  $\text{CO}_2$  dissolution in reactive aqueous solutions // *Physical Review Letters*. 2014. Vol. 113. N. 11, 114501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.114501
7. Браун Д. А., Супаев П. П. Управление перемешиванием в проточном микрореакторе с варьируемым зазором // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. Т. 38. Вып. 4. С. 26–36.
8. Eckert K., Rongy L., De Wit A.  $A + B \rightarrow C$  reaction fronts in Hele-Shaw cells under modulated gravitational acceleration // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2012. Vol. 14. P. 7337–7345. DOI: 10.1039/C2CP40132K
9. Horváth D., Budroni M. A., Bába P., Rongy L., De Wit A., Eckert K., Tóth Á. Convective dynamics of traveling autocatalytic fronts in a modulated gravity field // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014. Vol. 16. P. 26279–26287. DOI: 10.1039/C4CP02480J
10. Bratsun D. A., Shi Y., Eckert K., De Wit A. Control of chemo-hydrodynamic pattern formation by external localized cooling // *Europhysics Letters*. 2005. Vol. 69. N. 5. P. 746–752. DOI: 10.1209/epl/i2004-10417-9
11. Shkadinskaya G. V., Shkadinskii K. G. Stabilization of the front of polymerization of composite materials in a plug-flow reactor // *Russian Journal*



- of Physical Chemistry B. 2014. Vol. 8. N. 2, P. 221–226. DOI: 10.1134/S1990793114020213
12. Gershuni G. Z., Lyubimov D. V. Thermal vibrational convection. New York, USA: Wiley, 1998. 372 p.
  13. Wolf G. G. H. Dynamic stabilization of the Rayleigh–Taylor instability of miscible liquids and the related “frozen waves” // *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30. N. 2, 021701. DOI: 10.1063/1.5017846
  14. Von Kameke A., Huhn F., Fernández-García G., Muñuzuri A. P., Pérez-Muñuzuri V. Propagation of a chemical wave front in a quasi-two-dimensional superdiffusive flow // *Physical Review E*. 2010. Vol. 81, 066211. DOI: 10.1103/PhysRevE.81.066211
  15. Von Kameke A., Huhn F., Muñuzuri A. P., Pérez-Muñuzuri V. Measurement of large spiral and target waves in chemical reaction-diffusion-advection systems: turbulent diffusion enhances pattern formation // *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110, 088302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.088302
  16. Bratsun D. A., Stepkina O. S., Kostarev K. G., Mizev A. I., Mosheva E. A. Development of concentration-dependent diffusion instability in reactive miscible fluids under influence of constant or variable inertia // *Microgravity Science and Technology*. 2016. Vol. 28. N. 3. P. 575–585.
  17. Никольский Б. П., Григоров О. Н., Позин М. Е., Порай-Кошиц Б. А., Рабинович В. А., Рачинский Ф. Ю., Романков П. Г., Фридрихсберг Д. А. Справочник химика. Т. 3: Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов, электродные процессы. М.: Химия, 1964. 1008 с.
  18. Nisancioglu K., Newman J. Diffusion in aqueous nitric acid solutions // *AIChE Journal*. 1973. Vol. 19. N. 4. P. 797–801. DOI: 10.1002/aic.690190417
  19. Дёмин В. А., Макаров Д. В. Устойчивость конвективных течений в ячейке Хеле-Шоу при воздействии вертикальных вибраций // *Вестник пермского университета*. 2005. Вып. 1. С. 101–110.
- ### References
1. Wylock C., Dehaeck S., Rednikov A., Colinet P. Chemo-hydrodynamical instability created by CO<sub>2</sub> absorption in an aqueous solution of NaHCO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. *Microgravity Science and Technology*, 2008, vol. 20, pp. 171–175. DOI: 10.1007/s12217-008-9022-7
  2. Almarcha C., Trevelyan P. M. J., Grosfils P., De Wit A. Chemically driven hydrodynamic instabilities. *Physical Review Letters*, 2010, vol. 104, no. 4, 044501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.044501
  3. Almarcha C., R'Honi Y., De Decker Y., Trevelyan P. M. J., Eckert K., De Wit A. Convective mixing induced by acid-base reactions. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 115, no. 32, pp. 9739–9744. DOI: 10.1021/jp202201e
  4. Kuster S., Riolfo L. A., Zalts A., El Hasi C., Almarcha C., Trevelyan P. M. J., De Wit A., D'Onofrio A. Differential diffusion effects on buoyancy-driven instabilities of acid-base fronts: the effect of color indicator. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, vol. 13, 17295, DOI: 10.1039/C1CP21185D
  5. Bratsun D., Mizev A., Mosheva E., Kostarev K. Shock-wave-like structures induced by an exothermic neutralization reaction in miscible fluids. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, no. 5, 053106. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.053106
  6. Loodts V., Thomas C., Rongy L., De Wit A. Control of convective dissolution by chemical reactions: General classification and application to CO<sub>2</sub> dissolution in reactive aqueous solutions. *Physical review letters*, 2014, vol. 113, no. 11, 114501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.114501
  7. Bratsun D. A., Siraev R. R. Control of mixing in a continuous-flow microreactor with a varied gap width. *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 26–36 (In Russian).
  8. Eckert K., Rongy L., De Wit A. A + B → C reaction fronts in Hele-Shaw cells under modulated gravitational acceleration. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, vol. 14, pp. 7337–7345. DOI: 10.1039/C2CP40132K
  9. Horváth D., Budroni M. A., Bába P., Rongy L., De Wit A., Eckert K., Tóth Á. Convective dynamics of traveling autocatalytic fronts in a modulated gravity field. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2014, vol. 16, pp. 26279–26287. DOI: 10.1039/C4CP02480J
  10. Bratsun D. A., Shi Y., Eckert K., De Wit A. Control of chemo-hydrodynamic pattern formation by external localized cooling. *Europhysics Letters*, 2005, vol. 69, no. 5, pp. 746–752. DOI: 10.1209/epl/i2004-10417-9
  11. Shkadinskaya G. V., Shkadinskii K. G. Stabilization of the front of polymerization of composite materials in a plug-flow reactor. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 221–226. DOI: 10.1134/S1990793114020213
  12. Gershuni G. Z., Lyubimov D. V. *Thermal Vibrational Convection*. New York, USA: Wiley, 1998. 372 p.
  13. Wolf G. G. H. Dynamic stabilization of the Rayleigh–Taylor instability of miscible liquids and the related “frozen waves”. *Physics of Fluids*, 2018, vol. 30, no. 2, 021701. DOI: 10.1063/1.5017846
  14. Von Kameke A., Huhn F., Fernández-García G., Muñuzuri A. P., Pérez-Muñuzuri V. Propagation of a chemical wave front in a quasi-two-dimensional

- superdiffusive flow. *Physical Review E*, 2010, vol. 81, 066211.  
DOI: 10.1103/PhysRevE.81.066211
15. Von Kameke A., Huhn F., Muñuzuri A. P., Pérez-Muñuzuri V. Measurement of large spiral and target waves in chemical reaction-diffusion-advection systems: turbulent diffusion enhances pattern formation. *Physical Review Letters*, 2013, vol. 110, 088302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.088302
16. Bratsun D. A., Stepkina O. S., Kostarev K. G., Mizev A. I., Mosheva E. A. Development of concentration-dependent diffusion instability in reactive miscible fluids under influence of constant or variable inertia. *Microgravity Science and Technology*, 2016, vol. 28, no. 3, pp. 575–585.
17. Nikolsky B. P., Grigorov O. N., Pozin M. E., Poraj-Koshic B. A., Rabinovich V. A., Rachinskij F. YU., Romankov P. G., Fridrihsberg D. A. *Chemist's Handbook, Vol. 3*. Moscow, Russia: Khimiya Publishing House, 1964, 1008 p. (In Russian).
18. Nisancioglu K., Newman J. Diffusion in aqueous nitric acid solutions. *AIChE Journal*, 1973, vol. 19, no 4, pp. 797–801. DOI: 10.1002/aic.690190417
19. Demin V. A., Makarov D. V. Ustoichivost' konvektivnykh techenii v iacheike Khele-Shou pri vozdeistvii vertikal'nykh vibratsii (Stability of convective flows in Hele–Shaw cell under vertical vibrations). *Bulletin of Perm University. Series: Physics*, 2005. vol. 1. pp. 101–110. (In Russian).

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

Мошева Е. А., Козлов Н. В. Хемоконвективное течение в гравитационном и переменном инерционном поле // Вестник Пермского университета. Физика. 2020. № 1. С. 52–61. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-52-61

**Please cite this article in English as:**

Mosheva E.A., Kozlov N. V. Chemoconvective flow in gravitational and variable inertial field. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2020, no. 1, pp. 52–61. doi: 10.17072/1994-3598-2020-1-52-61