УДК 532.529.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗОНЫ СМЕШИВАНИЯ, ОБРАЗОВАННОЙ ВСТРЕЧНЫМИ ПОТОКАМИ ДВУХ ВЗАИМОРАСТВОРИМЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Брацун Д.А., Мошева Е.А.

Пермский государственный педагогический университет, Пермь, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (ГК № 1.3103.2011), и в рамках Проекта №031-Ф Программы стратегического развития ПГПУ.

АННОТАЦИЯ

В работе экспериментально исследован процесс формирования пространственных конвективных структур в зоне смешивания двух взаиморастворимых жидкостей, натекающих друг на друга. Установлено, что при переводе в горизонтальное положение вертикального канала прямоугольного сечения, послойно заполненного системой жидкостей, возникает продольный перепад плотности, приводящий к встречному движению жидкостей с развитием вторичного течения в зоне их смешивания в форме системы мелкомасштабных параллельных валиков, расположенных вдоль направления движения фронтов.

Выполнена визуализация распространения фронтов вытеснения и вторичного течения в горизонтальном и вертикальном сечениях вдоль оси горизонтального канала

Изучено поведение вторичной конвективной структуры и механизм распространения фронтов вытеснения.

ВВЕДЕНИЕ

Свободная конвекция является самым распространенным типом движения жидкостей и газов в поле силы тяжести. Она играет важную роль в организации тепломассопереноса в разнообразных технических устройствах, что объясняет стойкий и пристальный интерес к ней исследователей.

Одним из видов конвективного движения является течение, обусловленное разностью плотностей двух взаиморастворимых жидкостей, причем наиболее хорошо исследован случай неустойчивой системы, когда над менее плотной жидкостью находится более плотная. Получаемые в таких задачах профили фронта вытеснения зависят от геометрии полости и от физико-химических параметров самих жидкостей.

Задачи о взаимном проникновении жидкостей с большой вязкостью в горизонтальных и вертикальных капиллярах изучены как численно – традиционным моделированием течений Стокса [1-2], так и экспериментально [3-4]. Исследованы возникающие концентрационные поля, профиль пальцевидной структуры, образующейся вследствие развития неустойчивости, ее эволюция со временем.

Кроме того, можно привести ряд экспериментальных работ, описывающих смешивание растворимых маловязких жидкостей вследствие их всплывания в вертикальной трубе [5-6]. В этих работах, аналогично ранее описанным исследованиям, определена скорость распространения фронта вытеснения и прослежена динамика изменения полей концентрации, а также определена зависимость интенсивности смешивания от числа Этвуда и выяснен характер изменения коэффициента диффузии.

Также рассмотрены течения, возникающие вследствие перемешивания в процессе встречного движения растворимых жидкостей, вызванного наклоном вертикальной трубы [7]. Изучена структура и эволюция полей скоростей и концентраций. Карты течений построены в зависимости от угла наклона трубы и чис-

© Брацун Д.А., Мошева Е.А.

ла Этвуда. Также исследована структура зона смешивания.

Значительная группа работ посвящена изучению неустойчивости на границе взаимно проникающих растворов, находящихся в тонких вертикальных каналах (ячейках Хеле-Шоу), либо в пористых системах, обеспечивающих медленное распространение фронта вытеснения несмотря на высокую разность плотностей. Распространение фронта сопровождается появлением «пальцев» (fingerings) за счет развития неустойчивости Рэлея-Тэйлора. В случае реагирующих жидкостей смешивание сопровождается тепловыделением, что провоцирует возникновение конвективного движения в границах диффузионного слоя [8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В нашей работе в качестве канала использована интерференционная кювета с внутренней полостью высотой 90 мм, шириной 24 мм и толщиной, менявшейся – в зависимости от серии опытов – от 1.2 мм до 4.0 мм. Широкие стенки кюветы, сквозь которые велось наблюдение, образованы двумя плоскопараллельными стеклами с полупрозрачным зеркальным покрытием. На роль рабочих жидкостей выбраны дистиллированная вода и водные растворы изопропилового спирта с массовой концентрацией C_0 от 5 до 40 %.

Эксперимент выполнен с помощью интерферометра Физо, схема которого приведена на рис.1.

Узкий пучок монохроматического света, испускается лазером 1, отражается от наклонного зеркала, попадает в микрообъектив 2, который расширяет пучок лазерного излучения. Далее пучок отражается от полупрозрачного зеркала 3 и попадает на объектив-коллиматор 4, тем самым создается параллельный световой пучок большого диаметра. Световой пучок, отражаясь от зеркала 5, падает на верхнее стекло кюветы (положение II на рис.1) и разделяется на пучки – отраженный (опорный) и проникающий (предметный). В кювете предметный пучок проходит через смешивающиеся жидкости 6, несколько раз отражается от её внутренних стенок 7, каждый раз частично проникая наружу, и проходит сквозь ее полость, неся информацию о структуре раствора в кювете. Вышедший через нижнее стекло световой пучок отражается от зеркала 8, собирается объективом 9 и регистрируется, попадая в камеру 10.

В виду высокой скорости наблюдаемых процессов и их мелкомасштабностью в качестве камеры 8 использована цифровая камера с высоким пространственно-временным разрешением – Basler-700.

Распределение коэффициента преломления света в кювете, созданное распределением концентрации смешивающихся жидкостей, в виде системы изолиний, представлявших собой полосы равного оптического пути, визуализировалось с помощью интерферометра. Если величина концентрации изменялась только поперек зондирующего светового потока, то каждую интерференционную полосу в изотермическом случае можно было отождествить с определенной концентрацией растворенного вещества. Так, переход от одной интерференционной полосы к другой соответствовал изменению концентрации изопропилового спирта в воде от 0.27 % при C_0 = 5 % до 0.81 % при C_0 = 45 % [3].

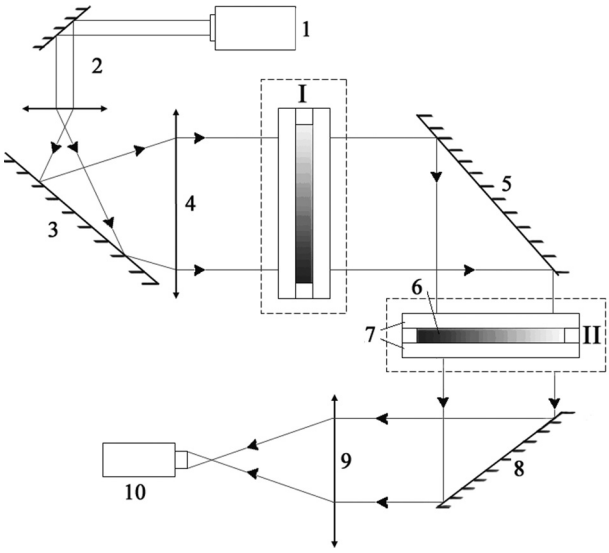

Рис.1 Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – микрообъектив; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – объектив-коллиматор; 5,8 – зеркало; 6 – слой жидкости; 7 – плоские стекла с полупрозрачным зеркальным покрытием; 9 – объектив 10 – видеокамера. I и II – положение кюветы при горизонтальной и вертикальной ориентации.

Отметим, что ввиду очень малого коэффициента диффузии (~10^{-5} см^2/с) линии концентрации оказываются «вмороженными» в движущийся объем жидкости. Благодаря этому, с помощью интерферометра удается не только исследовать распределение концентрации в системе жидкостей, но и определить структуру возникающих течений, а также проследить их эволюцию.

Все опыты были проведены в соответствии со следующей методикой. Вначале кювета устанавливается вертикально (положение I на рис.1) и до половины объёма заполняется водой.

После чего сверху доливается более легкий однородный раствор изопропилового спирта с концентрацией C_0. В результате в кювете формируется система исходных жидкостей с довольно широкой зоной диффузионного перехода между ними. После этого при помощи шприца большая часть неоднородного раствора удаляется из диффузионной зоны, которая после этого сужается до определенной толщины h_0. Затем вновь доливается однородный раствор спирта, кювета герметизируется и переводится в горизонтальное положение (широкой гранью кверху, см. положение II на рис.1).

Возникающий продольный перепад плотности приводит к послойному натеканию жидкостей друг на друга с развитием вторичного течения в зоне их смешивания. Эволюция течения отслеживалась в режиме реального времени с помощью видеокамеры интерферометра.

Все опыты были проведены при температуре окружающей среды (23±1) ºС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эволюция структуры течения, возникающего в канале при переводе его в горизонтальное положение, представлена на двух сериях интерферограмм. Первая серия отражает начальную стадию распространения фронтов вытеснения в горизонтальном канале, лежащем на широкой грани (рис.2, вид сверху). Правая часть каждого снимка описывает продвижение фронта вытеснения воды раствором спирта, в то время как левая часть снимка – раствора спирта – водой.

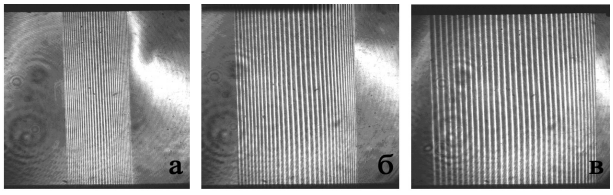

Рис.2 Интерферограммы распространения фронтов вытеснения воды и спирта Время с момента опрокидывания кюветы: а – 0 с, б – 44 с, в – 108 с.

Установлено, что скорость распространения фронтов вытеснения увеличивается с ростом концентрации спирта и толщины кюветы. Движение фронтов удается описать единой зависимостью, если отнормировать координату положения фронта следующим образом:

$$X = \frac{x \cdot \nu}{\Delta\rho \cdot h},$$

где X и x – приведенная и реальная координата фронта распространения, ν – наибольшая кинематическая вязкость пары жидкостей (в рассматриваемом случае – это раствор спирта), $\Delta\rho$ – перепад плотности между парой жидкостей, h – толщина кюветы. На рис.3 приведена зависимость положения фронтов вытеснения «вода-спирт», «спирт-вода» от времени для различных C_0.

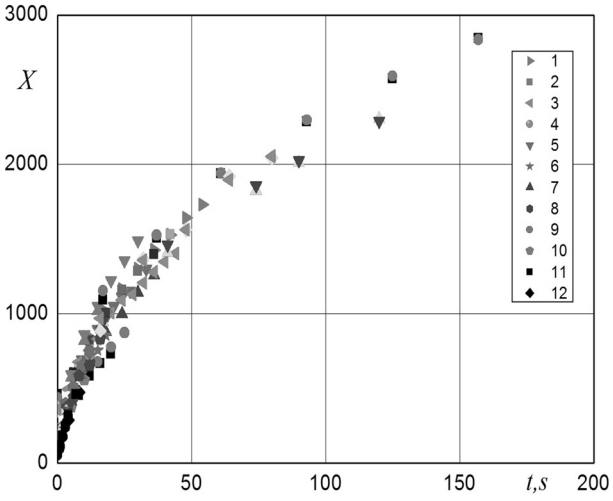

Рис.3 Зависимость положения фронтов вытеснения «вода-спирт» и «спирт-вода» от времени. Начальная концентрация раствора спирта 1,2 – 5%; 3,4 – 10%; 5,6 – 15%; 7,8 – 20%; 9,10 – 30%; 11,12 – 40%.

На рис.4 представлена интерферограмма второй стадии процесса распространения фронтов вытеснения, в течение которой происходит развитие вторичного течения в форме системы мелкомасштабных параллельных валов, которые визуализируются в виде «пальцев», расположенных вдоль направления движения фронтов.

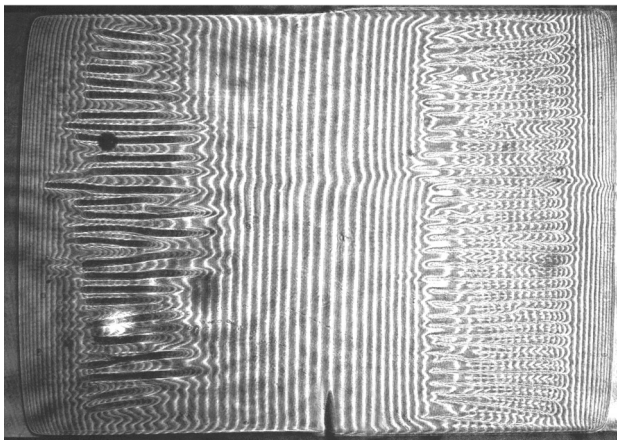

Рис.4 Интерферограмма распространения фронтов вытеснения воды и спирта на стадии формирвоания вторичного течения.

Для выяснения механизмов формирования такой неустойчивости была проведена серия дополнительных экспериментов, в которых кювета при переводе в горизонтальное положение устанавливалась не на широкую грань, а на длинное боковое ребро. Такое изменение позволило выяснить структуру и проследить эволюцию течения в вертикальном сечении вдоль оси горизонтального канала. Обнаружено, что вытесняющее течение имеет Z–образную форму (рис.5) с очень узкими пристеночными областями, появление которых обусловлено сохранением прослоек исходных жидкостей за счет условия прилипания на стенках канала.

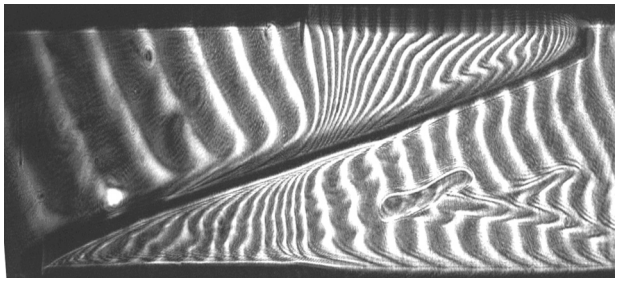

Рис.5 Интерферограмма распространения фронтов вытеснения воды и спирта в вертикальном сечении вдоль оси горизонтального канала.

В результате вблизи стенки канала между двумя однородными жидкостями возникает слой с неустойчивым градиентом плотности, толщина которого растет со временем благодаря диффузии и перестройке структуры основного течения (области вытесняющей жидкости с максимальной скоростью движения смещаются к оси канала под действием сил вязкости).

Известно, что по достижении критического значения числа Рэлея в таком слое возникает свободноконвективное течение (под действием архимедовой силы менее плотная жидкость всплывает, а более плотная – тонет) в форме конвективных ячеек. В нашем случае на вертикальное движение жидкости накладывается адвективное течение, которое обусловлено продольным перепадом плотности и которое приводит к возникновению валов со спиральной закруткой.

Эксперимент показал, что пространственный период вторичной конвективной структуры (продольных валов) заметно уменьшается с ростом концентрации. Также обнаружено, что время формирования вторичного течения зависит перепада плотностей. В частности, чем выше концентрация раствора спирта, тем быстрее возникает вихревое течение.

ВЫВОДЫ

Таким образом, выполненный эксперимент позволил визуализировать распространение фронтов вытеснения взаиморастворимых жидкостей разной исходной плотности и выявить развитие неустойчивости в пристенной области канала. Обнаружено, что пространственный период возникающего вторичного течения уменьшается с ростом концентрации. Также обнаружено, что с увеличением концентрации исходного раствора время зарождения этого течения уменьшается. В пределах погрешности измерений длина волны вторичного течения не зависит от направления движения фронта и толщины кюветы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chen C.-Y., Meiburg E. Miscible displacements in capillary tubes. Part 2: Numerical simulations // J. Fluid Mech. 326, 57 1996;
2. Chen C.-Y., Meiburg E. Miscible displacements in capillary tubes: Influence of Korteweg stresses and divergence effects // Phys. Fluids, Vol. 14, No. 7, July 2002;
3. Petitjeans P. and Maxworthy T., Miscible displacements in capillary tubes. Part 1: Experiments // J. Fluid Mech. 326, 37 1996;
4. Kuang J., Petitjeans P., Maxworthy T. Velocity fields and streamline patterns of miscible displacements in cylindrical tubes // Experiments in Fluids 37 (2004) 301–308
5. Perrin B., Debacq M., Fanguet V., Hulin J. P., Salin D. Self-similar concentration profiles in buoyant mixing of miscible fluids in a vertical tube // Phys. Fluids, Vol. 13, No. 11, November 2001.
6. Séon T., Hulin J.P., Salin D. Buoyancy driven miscible front dynamics in tilted tubes // Phys. Fluids 17, (031702) 2005.
7. Znaien J., Moisy F., and Hulin J. P. Flow structure and momentum transport for buoyancy driven mixing flows in long tubes at different tilt angles // Phys. Fluids 23, 035105 2011.
8. Trevelyan P. M. J., Almarcha C. De Wit A. Buoyancy-driven instabilities of miscible two-layer stratifications in porous media and Hele-Shaw cells // J. Fluid Mech. (2011), vol. 670, pp. 38–65.