

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF SPEED OF THE DYE MASS-TRANSFER IN THE FLAT HORIZONTAL LAYER OF LIQUID ON THE LAYER THICKNESS AT VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS

Ya. Krasnoperov, postgraduate student
M. Sklyarenko, Candidate of Technical sciences, Senior Lecturer
Perm State National Research University, Russia

In our previous article we discovered convection in thin horizontal flat water layer when we put a drop of dye water solution. We measured dye's mass-transfer speed and found out that effective diffusivity is decreased proportionally to layer thickness. Convective mass-transfer is almost eliminated in 0,5 mm layer.

Keywords: diffusion, convection, optical methods, identification, mass-transfer.

Conference participants, National championship in scientific analytics, Open European and Asian research analytics championship

Введение. Исследования процессов массопереноса в различных средах играют важную роль для оптимизации технологии химического производства, в пищевой, текстильной промышленности, в медицине. Появление цифровых фотокамер с высоким разрешением предоставило возможность получения точных данных о концентрации диффузанта в каждой точке (поле концентрации) по яркости окрашенного раствора.

В статье авторов [1] описывается исследование процесса диффузии окрашенных веществ в плоском горизонтальном слое жидкости в открытой ячейке толщиной 1.6 мм. В результате экспериментов оказалось, что эффективный коэффициент диффузии более чем на порядок превосходит значение коэффициента молекулярной диффузии. Была выдвинута гипотеза о том, что это отклонение вызвано наличием конвективных потоков. Наличие конвекции качественно подтвердилось путем добавления в жидкость алюминиевой пудры, которая визуализировала макроскопическое движение. Также путем анализа динамики собственных мод задачи в рамках линейной модели [1] было выявлено наличие колебательных мод, скорее всего, соответствующих конвективному массопереносу.

Силу конвекции можно уменьшить посредством использования закрытой ячейки, позволяющей устранить возможные поверхностные механизмы генерации конвективных потоков и увеличить диссипацию конвективных потоков за счет дополнительной поверхности. Конвекцию можно также ослабить путём уменьшения толщины слоя жидкости.

Целью данной работы является экспериментальное исследование зависимости скорости массопереноса красителя в плоском горизонтальном слое жидкости, находящейся при различных граничных условиях от толщины слоя методом цифровой фотосъемки.

Описание установки. Для экспериментов были изгото-

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ МАССОПЕРЕНОСА КРАСИТЕЛЯ В ПЛОСКОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Красноперов Я.И., аспирант
Скляренко М.С., канд. техн. наук, старший преподаватель
Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия

Как показано в нашей предыдущей нашей работе при помещении капли водного раствора красителя в горизонтальный плоский слой воды наблюдается конвекция. В работе приведены результаты исследования зависимости скорости массопереноса от толщины слоя. Обнаружено, что эффективный коэффициент диффузии убывает пропорционально уменьшению толщины слоя. При толщине менее 0,5 мм конвективные эффекты практически отсутствуют.

Ключевые слова: диффузия, конвекция, оптические методы, идентификация, массоперенос.

Участники конференции, Национального первенства по научной аналитике, Открытого Европейско-Азиатского первенства по научной аналитике

товлены 5 закрытых ячеек. Горизонтальный размер ячеек составлял 5x5 см². Ячейки (см. рис.1) были изготовлены из трех частей: стеклянного основания, рамы и стеклянной крышки, склеенных между собой цианоакрилатным клеем («суперклей»). Ячейки отличались толщиной рамы, изготовленной из нескольких слоев самоклеящейся полиэстеровой пленки толщиной 100 мкм. Таким образом, можно было изменять высоту слоя жидкости, которая составляла в закрытых ячейках 0,5, 0,7, 1, 1,4 и 2 мм. В стеклянной крышке каждой ячейки были просверлены 5 отверстий диаметром 2 мм: 4 по краям и одно в центре. Такая конструкция позволила избежать неполного заполнения ячейки жидкостью вследствие возникновения капиллярных эффектов, препятствующих вытеснению воздуха.

Установка для наблюдения поля концентрации (см. рис. 2) состояла из штатива 2, установленного на лабораторном столе 1, на котором последовательно закреплялись источник света 6, полупрозрачный светорассеивающий экран 3, ячейка 4 и цифровой фотоаппарат 5. Источником света служил сверхъяркий белый светодиод ЗНPD-3 со световым потоком 150 лм, а экраном – 2 листа молочного светорассеивающего стекла толщиной 3 мм каждое.

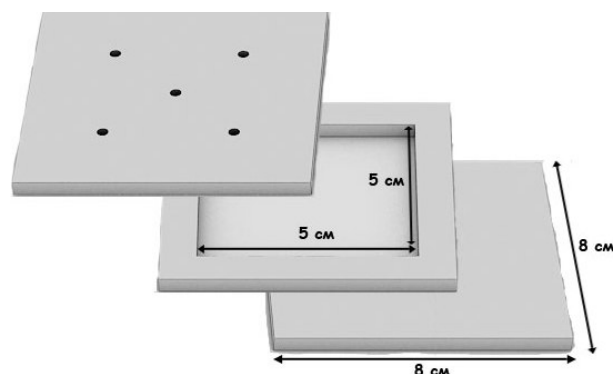


Рис. 1. Ячейка для измерений

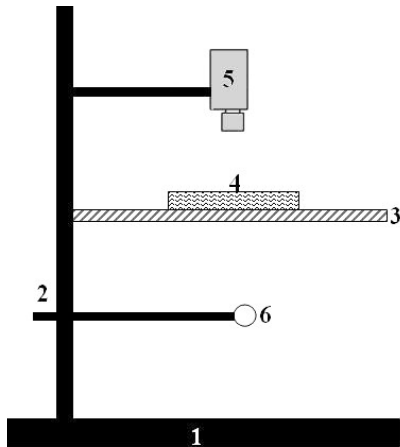


Рис. 2. Установка для измерения поля концентрации

Методика измерения концентрации. Для измерения поля концентрации в плоском слое жидкости в качестве диффузанта используются вещества, дающие цветной раствор. Например, это могут быть анилиновые или другие водорастворимые красители. Чтобы использовать метод цифровой фотосъемки для измерений поля концентрации, необходимо связать яркость изображения с его концентрацией, то есть получить градуировочную кривую.

Для получения одной точки градуировочной кривой в ячейку, установленную на белом или сером фоне, помещают тонкий слой (0.5–2.5 мм) раствора известной концентрации и осуществляют фотографирование ячейки. При этом толщина слоя должна быть одинаковой как при градуировке, так и при дальнейшем измерении концентрации в основном эксперименте. Для уменьшения уровня шумов на изображении для его обработки применяются различные фильтры, например, фильтр Гаусса [2]. По изображению определяется средняя по пикселям яркость раствора. Яркость пикселя B можно определять как:

$$B = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 I_k,$$

где I_k – интенсивности компонент в пространстве RGB, или $B = V$, где V – значение яркости в пространстве HSV[2]. Для исключения зависимости от яркости осветителя (осветителей) вводится относительная яркость $\delta B = B_d/\bar{B}_b$, B_d – яркость раствора, \bar{B}_b – средняя яркость фона. Под фоном понимается эталонный объект (например, лист белой бумаги), расположенный на том же кадре, что и ячейка. В дальнейшем будем оперировать именно относительной яркостью δB .

На рис. 3 показаны зависимости относительной яркости раствора от концентрации для различных ячеек, полученные вышеизложенным методом. В качестве красителя использовался алый тканевый краситель (ТУ 2389-010-44297874-2000), в качестве растворителя – дистиллированная вода.

Для ячеек (рис. 3) толщиной 0.5, 0.7, 1, 1.4, 2 мм были использованы следующие аппроксимирующие кривые соответственно:

$$c(\delta B) = -0,283 \ln(0,407 \cdot \delta B)\%,$$

$$c(\delta B) = -0,101 \ln(0,972 \cdot \delta B)\%,$$

$$c(\delta B) = -0,179 \ln(0,429 \cdot \delta B)\%,$$

$$c(\delta B) = -0,068 \ln(1,05 \cdot \delta B)\%,$$

$$c(\delta B) = -0,116 \ln(0,443 \cdot \delta B)\%.$$

Кривые для 0.7 мм и 1.4 мм расположены в области более низких диапазонов яркости, т.к. при фотографировании данных ячеек помещался другой фоновый объект, относительно которого измерялась яркость раствора.

Определение скорости массопереноса. Для измерения скорости массопереноса капли красителя в плоском слое воды в центр ячейки помещались равные по площади капли 0,1% раствора алого тканевого красителя и в течение 30–60 мин. фотографировался процесс роста диффузионного пятна.

Для количественной оценки скорости массопереноса отслеживалась эволюция размеров диффузионного пятна. В качестве характерного размера использовался средний радиус \bar{r} , определяемый путем усреднения по площади кадра с весами, равными значению концентрации в заданных точках:

$$\bar{r} = \frac{\sum_i \sum_j c_{i,j} \cdot r_{i,j}}{\sum_i \sum_j c_{i,j}}, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$, N – размер ячейки в пикселях изображения, $c_{i,j}$ – массовая концентрация в точке (i,j) , $r_{i,j}$ – расстояние от центра пятна до точки (i,j) .

В реальных экспериментах очень сложно создать точечные начальные условия. При введении капли она неизбежно размывается, будем аппроксимировать ее Гауссовым пятном. При этом поле концентрации будет решением следующей граничной задачи:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \Delta c, \quad c(r, t = 0) = c_0 e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad c(r \rightarrow \infty, t) = 0,$$

где r_0 , c_0 – начальный средний радиус пятна и концентрация красителя в центре пятна. В работе [3] показано, что в данном случае

$$\bar{r}^2 - r_0^2 = \pi D t. \quad (2)$$

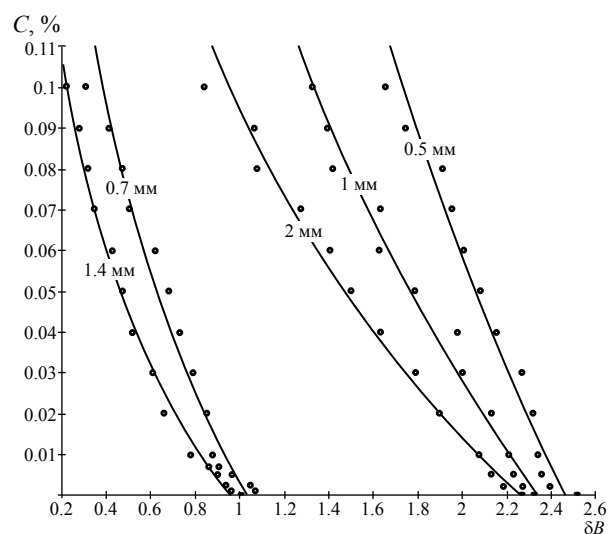


Рис. 3. Зависимость концентрации от относительной яркости раствора

Путем сравнения экспериментальной зависимости разницы квадратов среднего радиуса и начального среднего радиуса с линейной теоретической зависимостью (2) можно по сходимости/расходимости кривых судить о наличии недиффузионных эффектов, а также оценить эффективный коэффициент диффузии, который будет описывать скорость массопереноса.

Зависимость эффективного коэффициента диффузии от толщины. В работе [1] было доказано наличие конвективных эффектов при массопереносе капли красителя в плоской открытой ячейке. Наличие верхней крышки ячейки и уменьшение толщины слоя должно неизбежно привести к более быстрому затуханию конвективных потоков. Верхняя граница также приводит к блокировке механизма генерации конвекции Марангони [4] ввиду отсутствия у жидкости свободной поверхности. Поэтому основным механизмом генерации конвекции останется концентрационная конвекция, вызванная силой плавучести, возникающей в поле тяжести вследствие неоднородности концентрации по вертикали.

В экспериментах будем измерять скорость массопереноса в зависимости от толщины слоя. Однако на скорость массопереноса влияет не только толщина ячейки, но и вязкость жидкости, коэффициент диффузии и т.д. Поэтому удобнее будет оперировать безразмерным параметром. Можно провести прямую аналогию между тепловой конвекцией в плоском слое, которая вызывается вертикальным градиентом температуры и концентрационной конвекцией. По аналогии с коэффициентом теплового расширения [5] можно ввести коэффициент концентрационного сжатия

$$\beta = \frac{\partial \rho}{\partial c} \cdot \frac{1}{\rho}.$$

Пикнометрическим методом была получена зависимость плотности от концентрации и по ней определено значение

$$\beta = 0,039 \frac{1}{\%}.$$

Концентрационная конвекция характеризуется диффузионным аналогом числа Рэлея [5]

$$R_D = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta c \cdot h^3}{\nu D},$$

где g – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость жидкости (в нашем случае воды), Δc – характерный перепад концентраций, h – толщина плоского слоя жидкости. Здесь мы пренебрегаем зависимостью вязкости раствора от концентрации красителя, поскольку использованный нами краситель не является ПАВ и были использованы малые (менее 0,1%) концентрации раствора. В отличие от стационарной тепловой конвекции, которая поддерживается за счет внешних источников тепла, конвекция в нашей ячейке будет иметь диссипативный характер, т.к. вертикальный градиент концентрации не будет постоянным ввиду отсутствия постоянных источников концентрации, поэтому использование числа Рэлея несколько условно. При числе Рэлея, меньшем некоторого критического значения, в ячейке не будет возникать конвекция. Нами

был исследован массоперенос капли красителя в закрытых ячейках толщиной 2,0, 1,4, 1,0, 0,7, 0,5 мм, начальная концентрация капли составляла 0,1%. На рис. 4 представлены зависимости $\bar{r}^2 - r_0^2$ от времени.

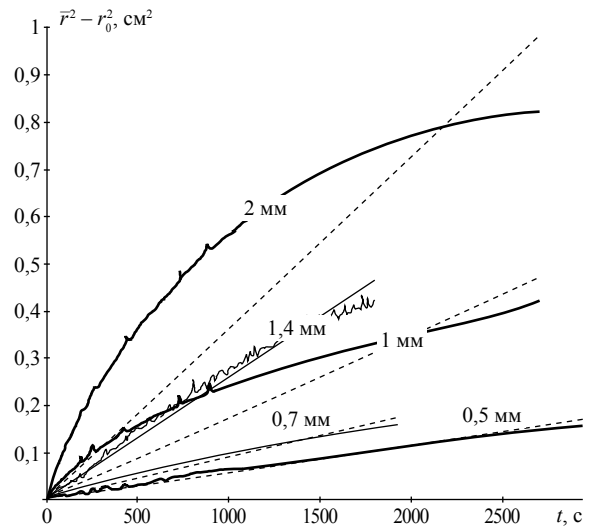


Рис. 4. Зависимость $\bar{r}^2 - r_0^2$ от времени

Данные экспериментальные кривые были аппроксимированы зависимостью (2) с помощью метода наименьших квадратов. В ходе аппроксимации были определены эффективные коэффициенты диффузии. Как видим, с течением времени все зависимости стремятся к линейной (см. формулу (2)), характерной для молекулярной диффузии, так как конвекция в ячейке носит затухающий характер ввиду отсутствия источников, поддерживающих перепад концентрации.

Как видно из рис. 5. эффективный коэффициент диффузии убывает пропорционально кубическому корню числа Рэлея (точность линейной аппроксимации экспериментальных результатов составляет 5%). Отметим, что бесконечного роста эффективного коэффициента диффузии на практике не будет, так как при увеличении толщины слоя не будет справедлива двумерная модель, использованная для описания процесса.

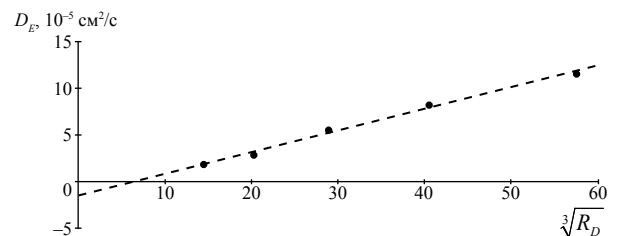


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента диффузии от кубического корня из числа Рэлея

Заключение. Из графиков и таблицы видно, что с уменьшением диффузионного числа Рэлея скорость массопереноса капли раствора красителя в плоском слое жидкости падает. При числе Рэлея, меньшем 3000, конвективные эффекты практически отсутствуют, что подтверждается линейностью зависимости квадрата среднего радиуса от времени. Дальнейшее уменьшение числа Рэлея приведет к полной блокировке конвекции.

References:

1. Марценюк М.А. Анализ процесса диффузии окрашенных веществ в плоском слое жидкости по данным цифровой фотосъемки [Текст] / М.А. Марценюк, М.С. Скляренко // Научн.-техн. Ведомости СПбГПУ. – 2010. – Вып.105. – С. 125–133.

2. Шапиро Л. Компьютерное зрение [Текст] / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.

3. Красноперов Я.И. Исследование зависимости скорости массопереноса красителя в плоском слое жидкости от толщины слоя методом цифровой фотосъемки [Текст] /

Я.И. Красноперов, М.С. Скляренко // Вестн. Перм. ун-та. – 2011. – Вып. 10(15). Информационные системы и технологии. – С. 29–34.

4. Зуев А.Л. Особенности концентрационно-капиллярной конвекции [Текст] / А.Л. Зуев, К.Г. Костарев // УФН. 178:10. – 2008. – С. 1065–1085.

5. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т.6. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 736 с.

6. Скляренко М.С. Методы компьютерного видения в физическом эксперименте [Текст] / М.С. Скляренко // Вестн. Перм. ун-та. – 2007. – Вып. 10(15). Информационные системы и технологии. – С.85–93.



INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONGRESS

Multisectoral scientific-analytical forum for professional scientists and practitioners

Main goals of the IASHE scientific Congresses:

- **Promotion of development of international scientific communications and cooperation of scientists of different countries**
- **Promotion of scientific progress through the discussion comprehension and collateral overcoming of urgent problems of modern science by scientists of different countries**
- **Active distribution of the advanced ideas in various fields of science**

For additional information please contact us:
[www: http://gisap.eu](http://gisap.eu), e-mail: congress@gisap.eu

