

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРА В ЛАМИНАРНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ В СТЕКЛЯННОМ КАНАЛЕ

## PROCEDURE FOR DETERMINING THE DYE SOLUTION CONCENTRATION DISTRIBUTION IN LAMINAR WATER FLOW IN GLASS CHANNEL

Ф.О.Султанов<sup>1,2</sup> / sultanov@issp.ac.ru, И.Б.Быхало<sup>2</sup>

F.O.Sultanov I.B. Bykhalo

<sup>1</sup>ИТФ им. Л.Д.Ландау РАН, г.Москва

<sup>2</sup>ИФТТ РАН, г.Москва

*Разработана экспериментальная методика определения зависимости распределения концентрации раствора Родамина Ж в потоке воды в стеклянном канале. Продемонстрировано, что в потоке воды, движущемся в стеклянном канале, устанавливается стационарная картина распределения концентрации раствора в воде вдоль канала. Концентрация красителя равномерно распределяется по каналу за счет молекулярной диффузии.*

*An experimental technique has been developed aimed at determining a dependence of the distribution of Rhodamine G concentration in a water solution flow in a glass channel. It has been demonstrated that in the water flow moving in the glass channel, a stationary pattern of the distribution of solution concentration in water along the channel is established. The dye concentration is distributed uniformly over the channel due to molecular diffusion.*

Ключевые слова: молекулярная диффузия, распределение концентрации, раствор Родамина Ж, поток воды.

Key words: molecular diffusion, concentration distribution, Rhodamine G solution, water flow.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование течений в трубках и каналах маленького размера в последнее время представляет все больший интерес в различных сферах. Уменьшение размеров трубок и каналов привело к созданию так называемых микрофлюидных устройств. Изучение микрофлюидных систем, может найти применение во многих практических приложениях, таких как: микромиксеры, охлаждающие системы в микросистемах, системы диагностики биологических объектов и т.д.

Каналы Т-типа (рис.1) являются наиболее простой в изготовлении и эффективной формой флюидных устройств. В работе [1] были представлены результаты по численному моделированию процесса смешения двух жидкостей в Т-каналах с различными диаметрами входных и выходных каналов. Авторы работы показали, что существует несколько различных режимов течения в Т-канале. При малых значения чисел Рейнольдса, равных не более 50, в канале устанавливается ламинарный режим течения и преобладает диффузионный механизм перемешивания.

Число Рейнольдса вычисляется по формуле:

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\eta},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – среднерасходная скорость в канале;  $D_h$  – гидравлический диаметр;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

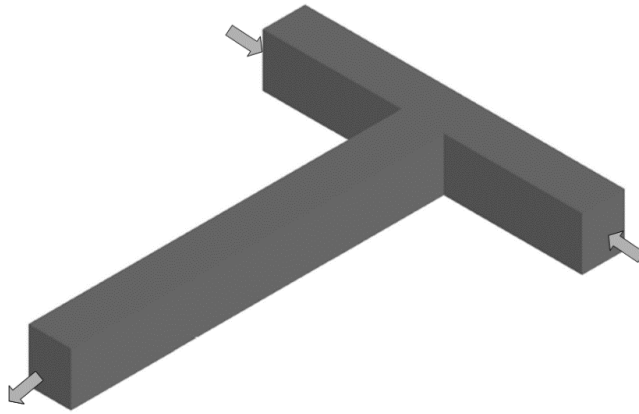


Рис. 1. Схема канала Т-типа.

Количественное описание молекулярных взаимодействий в микроканале в экспериментальной работе [2] представляет собой инструмент моделирования, который учитывает геометрию устройства, коэффициент и зависимость вязкости, ионной силы и других факторов окружающей среды. Модель, представленная, в этом исследовании была двумерной; рассматривалось изменение концентрации по длине канала. Результаты убедительно показывают, что она подходит для моделирования первичных процессов в канале Т-типа.

Линейные задачи диффузии в тонких трубках или каналах решаются аналогично методам, предложенным при решении задач теплопроводности в тонких стержнях [3]. Исходя из этого уравнение, для решения задачи о диффузии в тонком канале будет выглядеть следующим образом:

$$c = \frac{c_0}{2} + \frac{2c_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 D(2n-1)^2}{l^2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi(2n-1)x}{l}\right) \quad (1)$$

где  $c_0$  – начальная концентрация,  $l$  – ширина канала,  $D$  – коэффициент диффузии.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию диффузии в ламинарных потоках в стеклянных каналах.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на экспериментальной установке, продемонстрированной на рис. 2. На предметный столик оптического микроскопа помещался стеклянный канал Т-типа, который фиксировался четырьмя небольшими магнитами. Т-канал имел два входных отверстия и одно выходное. К входным отверстиям подводились два гибких тефлоновых капилляра, внутренний диаметр которых составлял 0.6 миллиметра. К выходному отверстию был подсоединен короткий капилляр, через который жидкость сливалась в небольшую емкость. Два входных капилляра, с другой стороны, были подсоединены к шприцам объемом по 2 миллилитра. Они устанавливались на шприцевой насос SPLab02 с контролируемым объемным расходом в диапазоне от 0,001 мкл/мин до 127 мл/мин. Для регистрации эксперимента на оптическом микроскопе Микмед-6 была установлена беззеркальная камера SONY NEX-5R, с помощью которой производились снимки через объектив микроскопа с номинальным увеличением  $\times 10$ . Пространственное разрешение в плоскости объекта равно  $\sim 1$  мкм, а глубина резкости составляла  $\sim 10$  мкм. Полученные изображения обрабатывались с помощью различных графических редакторов и пакета прикладных программ Matlab. Вся установка находилась на оптическом столе с пневматической виброизолирующей системой 1VIS10.

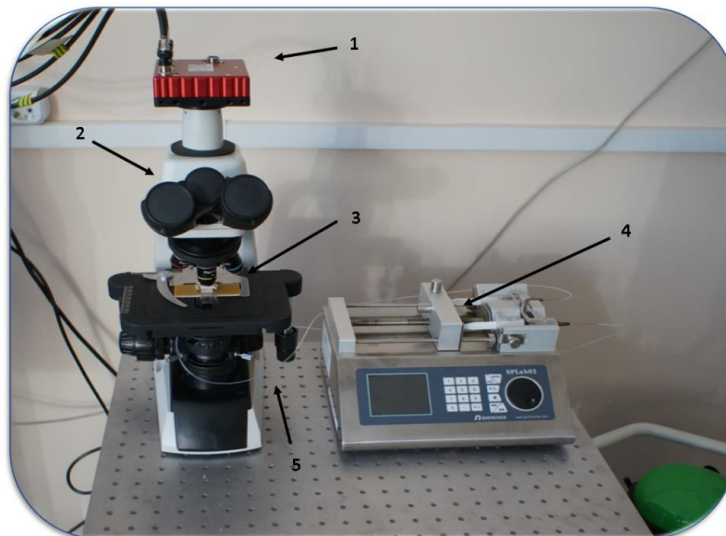


Рис. 2. Схема установки: 1 – высокоскоростная камера; 2 – оптический микроскоп Микмед-6; 3 – стеклянный канал; 4 – шприцевой насос; 5 – тефлоновый капилляр.

Для изготовления стеклянных каналов Т-типа брались три предметных стекла с гладко отшлифованными гранями. Одно из стекол разрезалось на три части для образования Т-формы. Полученные три части устанавливались между двумя другими целыми стеклами, образуя канал Т-формы, и склеивались. С трех торцевых сторон полученного чипа образовывались отверстия. В эти отверстия вклеивались капилляры из нержавеющей стали, которые служили коннекторами для чипа. Получался прозрачный чип, его размеры составляли 76x26x3 мм (рис. 4). Внутренняя ширина канала на всем участке была равна 0.6 мм, высота – 1 мм. Длина канала от места слияния двух каналов в один до выходного отверстия составляла 54 мм. Длины двух входных каналов составляли по 12.5 мм.

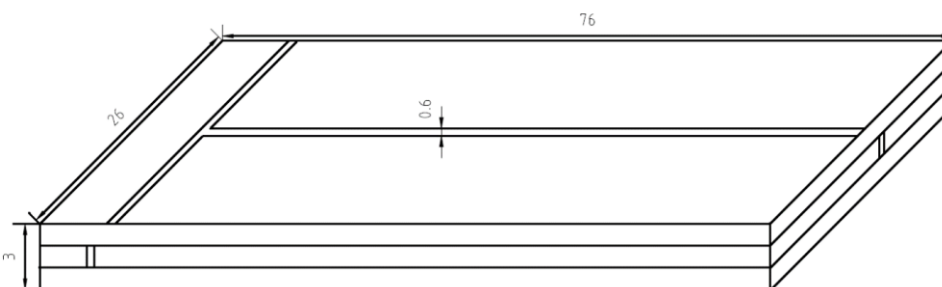


Рис. 3. Схема чипа с каналом Т-типа.

Для корректной обработки полученных изображений эксперимент проходил в несколько этапов. После настройки камеры и света, делался снимок только света исходящего от источника света под предметным столиком, без установленного чипа. Затем устанавливался канал на столик и производилась съемка пустого канала. Параметры камеры и подсветки оставались неизменными на протяжении всех циклов съемок. Далее в канал подавались два потока чистой дистиллированной воды, и камера фиксировала изображения канала с водой. И только после всей этой процедуры, которая делалась для дальнейшей нормировки яркости и цвета изображений канала, подавались потоки с красителем и водой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проходил при комнатной температуре. Кадры на Рис.4 были сделаны при средней скорости потока  $v = 0,5$  мм/с. А число Рейнольдса составляло  $Re = 0,4$ .

Для определения зависимостей распределений концентрации раствора в потоке поперек канала, брались профили интенсивности изображения в серединной области каждого участка канала (рис. 4). Профиль интенсивности получался в виде сигмоиды, что неплохо согласуется с [4]. На рис. 4 представлены три области канала. По оси абсцисс представлена ширина канала. По оси ординат интенсивность яркости обрабатываемого изображения, где нижние значения показывают область канала с раствором Родамина Ж, а верхние значения, область канала без содержания Родамина. Чем дальше от начала соединения, тем переходная область сигмоиды становится плавнее, а разность значений интенсивности уменьшается.

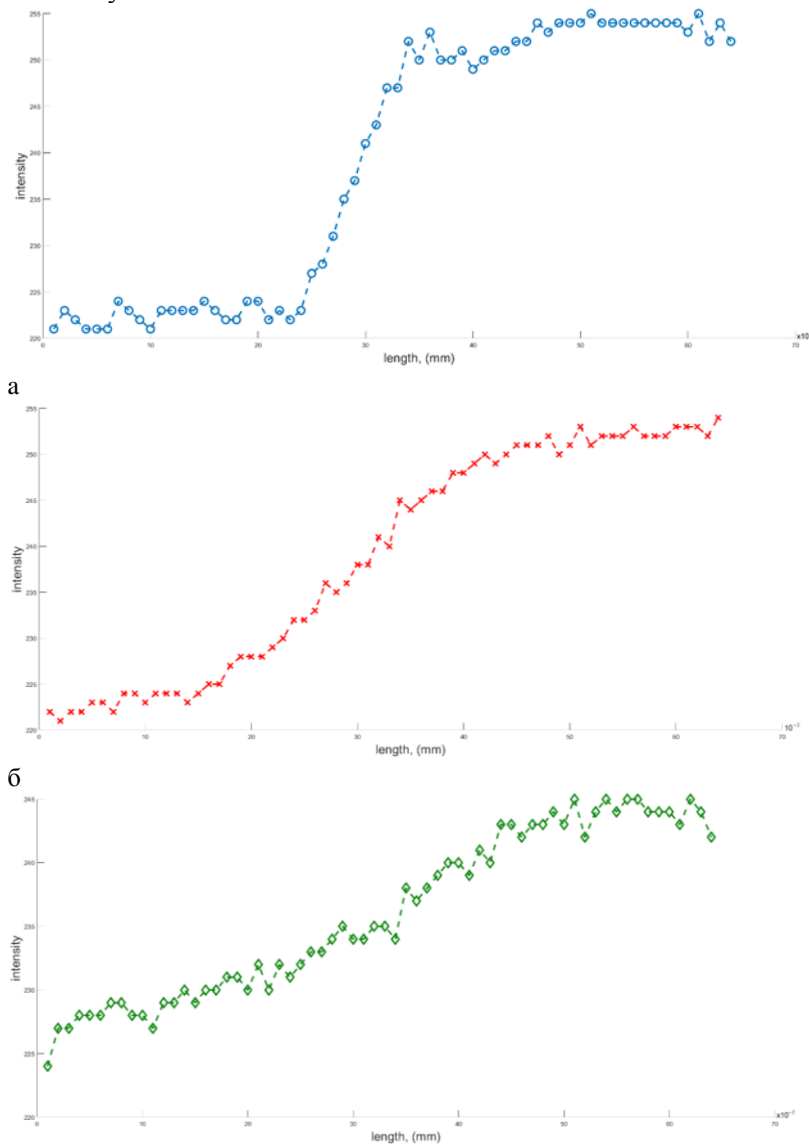


Рис. 4. Поперечные интенсивности участков канала п; а – участок соединения двух потоков; б – участок середины канала; в – участок конца канала.

Для большей наглядности были взяты семь равномерно удаленных поперечных профилей интенсивности по длине канала (рис. 5). Видно, как изменяется наклон кривой по мере удаления потока от места соединения.

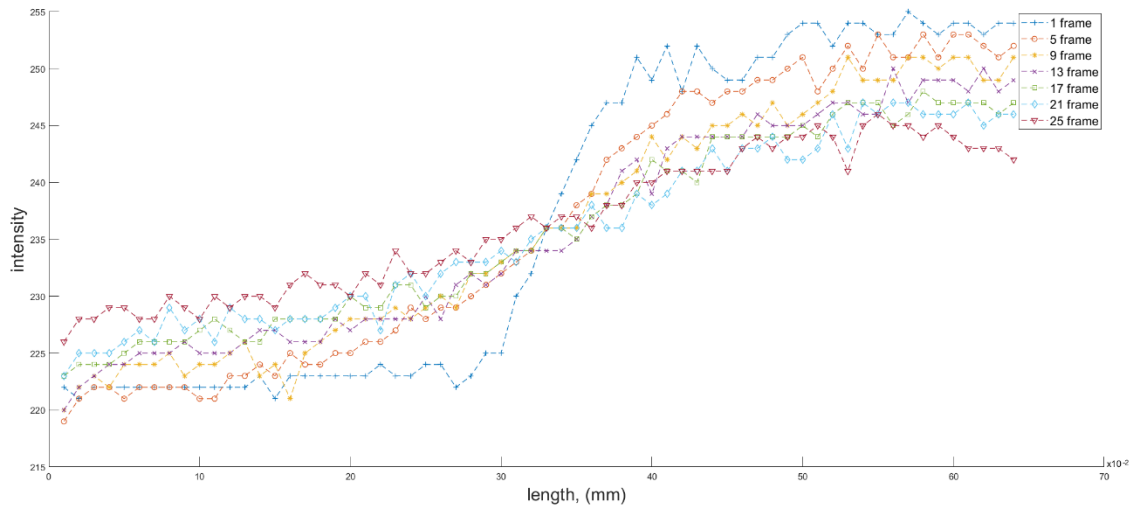


Рис. 5. Профили интенсивности

Начальная концентрация Родамина Ж в воде составляла  $\sim 6,3 \times 10^6$  см<sup>-3</sup>. Коэффициент диффузии Родамина в воде равен  $\sim 4,4 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. Исходя из этих данных, а также значений параметров размера канала и скорости потока, используя формулу (1) была построена аналитическая модель зависимости интенсивности от ширины канала на разных участках (рис. 6). Как видно из представленных графиков, экспериментальный результат находится в хорошем качественном согласии с моделью.

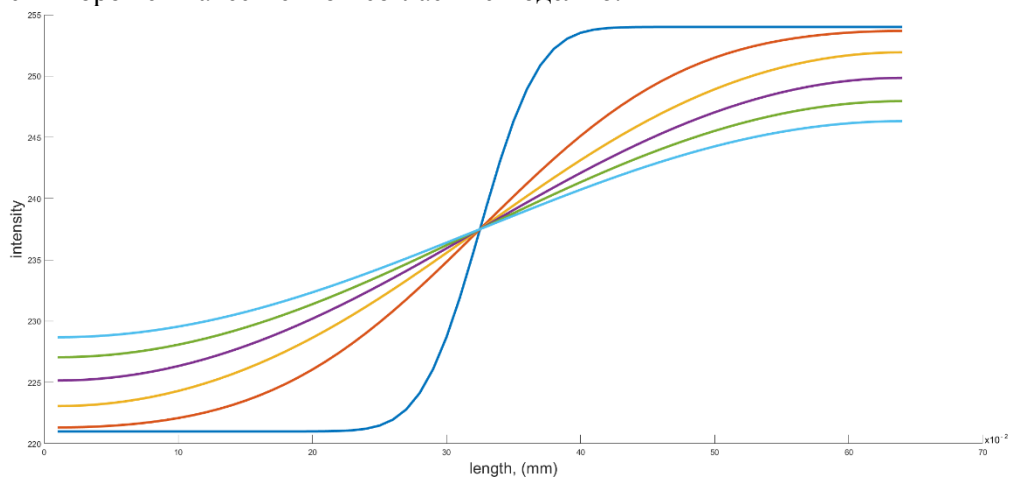


Рис. 6. Модель зависимости интенсивности по ширине канала

## ВЫВОДЫ

Разработана экспериментальная методика, позволяющая оценивать распределение интенсивности изображений потока в каналах. Зная начальную концентрацию раствора, можно легко интерпретировать значения интенсивности в процентное или количественное содержание раствора в потоке жидкости. Что даст полную картину в потоке в канале. Поскольку параметры канала задаются изначально, посчитав среднюю скорость потока и время, можно легко посчитать коэффициент диффузии. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем качественном согласии с моделью.

Представленная методика не привязана к размерам исследуемых систем. Что в дальнейшем даст возможность исследовать ламинарные потоки в микроканалах.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ #075-15-2019-1893

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kockmann N., Foll C., Woias P. Flow regimes and mass transfer characteristics in static micro mixers // Proceedings of SPIE. – 2003. - V. 4982. - P.319-329
2. Ismagilov, R. F., A. D. Stroock, P. J. A. Kenis, and G. Whitesides. 2000. Experimental and theoretical scaling laws for transverse diffusive broadening in two-phase laminar flows in microchannels. Appl. Phys. Lett. 76:2376 –2378.
3. Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики 1969.
4. Kamholz A. E., Schilling. Optical Measurement of Transverse Molecular Diffusion in a Microchannel. Biophysical Journal Volume 80 April 2001 1967–1972.

## СТАБИЛЬНОСТЬ ПРИМЕСЬ-ГЕЛИЕВЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ

### STABILITY OF IMPURITY-HELIUM NANOCCLUSERS

**В.Б.Ефимов**, (ORCID: 0000-0002-9195-2458)

**Л.П.Межов-Деглин**, (ORCID: 0000-0001-5080-3483) / victor\_efimov@yahoo.co.uk

**V.V.Efimov, VL.P.Mezhov-Deglin**

Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.

*При экспериментальном изучении рассеяния нейтронов на нанокластерных образцах примесь-гелиевых гелей было показано, что распад образцов происходит в три фазы: в первой, в среде жидкого гелия может происходить распад крупных наночастиц на более мелкие. Во-второй фазе, после испарения жидкого гелия из рабочей ампулы, происходит оседание примесного каркаса и уплотнение нижней части образца. В третьей фазе при более высоких температурах, которые в 2-4 раз ниже температуры плавления примесной основы каркаса происходит полное разрушение образца и образование аморфного порошка.*

*An experimental study of neutron scattering on nanocluster samples of impurity-helium gels reveals that the decay of the samples occurs in three phases: in the first, in liquid helium large nanoparticle can decay into smaller ones. In the second stage, after the evaporation of liquid helium from the working ampoule, the impurity framework falls down and the lower part of the sample is compacted. In the third stage at higher temperatures, which are in 2-4 times lower than the melting temperatures of the impurity base of the sample frame, the sample is completely destroyed and an amorphous powder is formed.*

Ключевые слова: *примесь-гелиевые гели, низкие давления, сверхтекучий гелий, наночастицы, рассеяние нейтронов*

Key words: *impurity-helium gels, low pressures, superfluid helium, nanoparticles, neutron scattering*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время с развитием микроэлектроники и компьютерной техники интенсивно исследуется поведение нанокристаллов и наночастиц, их стабильность и физические свойства. На физические свойства наночастиц (характерные размеры < 100 нм) как