

УДК 532.574:532.54

А.А. Ягодницына^{1,2}, А.В. Бильский^{1,2}

¹ *Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, п-т. Ак. Лаврентьева, 1, E-mail: yagodnitsinaAA@gmail.com*

² *Новосибирский Государственный Университет, Россия,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В МИКРОКАНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ MICRO-PIV И MICRO-LIF

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты разработки методов цифровой трассерной визуализации с микронным разрешением (micro-PIV) и лазерной индуцированной флуоресценции с микронным разрешением (micro-LIF) для исследования гидродинамики и процессов перемешивания в микроканальных устройствах. Разработанные методы были успешно применены для экспериментального исследования режимов течения и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа. Также с помощью метода micro-PIV был исследован ламинарно-турбулентный переход в прямом микроканале прямоугольного сечения.

**ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, МИКРОКАНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, МЕТОД
MICRO-PIV, МЕТОД MICRO-LIF**

МЕТОД ЦИФРОВОЙ ТРАССЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ С МИКРОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ (MICRO-PIV)

Метод Microresolution Particle Image Velocimetry (micro-PIV) является бесконтактным методом измерения полей скорости в жидкостях и газах с микронным разрешением. В исследуемый поток добавляются трассерные частицы, которые следуют за потоком и делают его наблюдаемым. Суть метода заключается в регистрации двух или более изображений трассерных частиц и обработке для расчета смещения частиц, что позволяет построить векторное поле скорости в потоке по смещению частиц.

Одной из главных характеристик метода micro-PIV и основным отличием от стандартного PIV метода является освещение частиц. В стандартном PIV методе лазерный нож освещает плоскость в потоке. Глубина резкости регистрирующей камеры обычно больше, чем толщина лазерного ножа, поэтому толщина измеряемой плоскости главным образом определяется толщиной лазерного ножа. Создание тонкого лазерного ножа на микронных масштабах практически невозможно, поэтому в micro-PIV освещается вся область потока. Вследствие этого освещаются все частицы в объеме потока, и глубина измеряемой плоскости определяется глубиной резкости объектива микроскопа. В micro-PIV экспериментах обычно применяется понятие «глубина корреляции», определяемая как удвоенное расстояние от фокальной плоскости до ближайшей плоскости, в которой частицы

становятся достаточно расфокусированными, так что они не дают значительного вклада в кросс-корреляционный анализ [1].

Авторами была создана экспериментальная установка для измерения полей скорости в микроканалах. Рассмотрим подробно экспериментальную установку для проведения micro-PIV экспериментов. Фотография установки представлена на Рис. 1.



Рис. 1. Фотография экспериментальной установки для проведения micro-PIV экспериментов

Система формирования изображения состояла из эпифлуоресцентного инвертированного микроскопа (Carl Zeiss AxioObserver.Z1) с набором объективов 63x/NA=0.75, 40x/NA=0.5, 20x/NA=0.3, 10x/NA=0.25 и 5x/NA=0.12 (под номером 1 на Рис. 1). Освещение и запись изображений на цифровую камеру проводились с помощью измерительного комплекса "ПОЛИС", который состоит из следующих основных элементов. Двойной импульсный Nd:YAG лазер с энергией в импульсе от 50 до 120 мДж и частотой повторения импульсов 10 Гц, свет от которого заводился в микроскоп через оптическое волокно. Кросскорреляционная цифровая камера, регистрировала изображения с разрешением 2048x2048 пикселей, которые затем передавались в персональный компьютер для обработки. Синхронизация работы системы осуществлялась при помощи программируемого процессора. Управление экспериментом и обработка данных осуществлялись с использованием пакета программного обеспечения ActualFlow.

Управление движением жидкости осуществлялось с помощью двойного шприцевого насоса с регулируемым расходом жидкости (номер 5 на Рис. 1). Поток жидкости засеивался флуоресцентными трассерами фирмы DukeScientific. Частицы состояли из полистирола, маркированного флуоресцентным красителем Родамин Б. Плотность частиц 1,05 г/см³, средний диаметр 2 мкм, стандартное отклонение 0,04 мкм.

Методика micro-PIV была протестирована при измерении поля скорости в прямом канале прямоугольного сечения размером 200x50 мкм и длиной 4 см. В рамках тестирования предполагалось получение усредненных полей скорости в канале субмиллиметровых размеров и сравнение ламинарных профилей потока с теоретическим решением. На графике на Рис. 2 красными метками показан нормированный на максимальную скорость профиль скорости для данного режима течения, построенный в центральном сечении измерительной области. Зелеными метками показаны экспериментальные данные, полученные Н.Ли [2] для прямоугольного канала с соотношением ширины к глубине 4:1. Сплошной линией обозначено аналитическое решение для данного типа канала [3]. Максимальное отклонение экспериментальных данных от аналитического решения составило 3%.

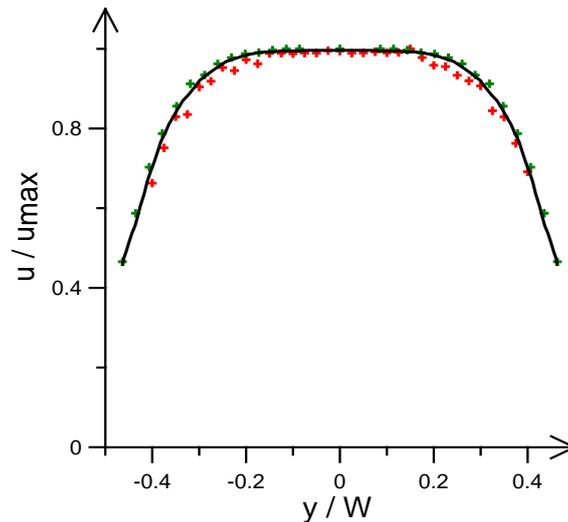


Рис. 2. Измеренный профиль скорости (красным цветом) в центральном сечении микроканала в сравнении с данными H.Li [2] (зеленым цветом) и аналитическим решением для данного типа канала – сплошная линия (F.White, [3])

МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ С МИКРОННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ (MICRO-LIF)

Метод Microresolution Laser Induced Fluorescence (micro-LIF) является методом для измерения полей концентраций и температур и основан на том, что интенсивность флуоресценции пропорциональна концентрации флуоресцентной краски или уменьшается с увеличением температуры. При измерении методом LIF в исследуемый поток добавляют флуорофор, выбранное сечение освещают лазерным ножом, эмитированный красителем свет регистрируют цифровой камерой со светофильтром. Связь между полем концентрации флуоресцентного красителя и измеренной интенсивностью флуоресценции сильно зависит от освещения исследуемого потока. В стандартном методе LIF, применяемом на макромасштабах, плоскость потока освещается лазерным ножом и поле концентрации флуоресцентного красителя пропорционально интенсивности флуоресценции от красителя в данной плоскости. В микроканале создание лазерного ножа невозможно, поэтому (подобно методу micro-PIV) освещается весь объем потока. Для того чтобы получить количественную информацию и поле концентрации в микроканале, необходимо установить связь между интенсивностью флуоресценции и концентрацией флуорофора. Для этого, как правило, пользуются экспериментальной калибровкой. В результате калибровки получается зависимость интенсивности излучения по измерительному полю от концентрации красителя. Для построения такой связи исследуемый объем заполняют красителем в разных постоянных концентрациях с последующей регистрацией набора изображений на цифровую камеру. Такая процедура автоматически учитывает все особенности оптического тракта регистрирующей аппаратуры и возможные неоднородности возбуждающего излучения, которые невозможно учесть при построении аналитической калибровки.

Для правильной интерпретации экспериментальных данных, полученных с помощью метода micro-LIF, и сравнения с результатами численного моделирования требуется оценка пространственного разрешения метода.

Рассмотрев геометрию оптики объектива микроскопа, было получено, что интенсивность излучения точечного источника на расстоянии z от плоскости объекта вычисляется по формуле

$$I(z) = \frac{J_0 D_a^2}{4\pi \left(d_s^2 + \frac{M^2 D_a^2}{s_0^2} z^2 \right) s_0^2}$$

где I_0 - поток света, испущенный точечным источником, D_a - диаметр апертуры линзы, d_e - диаметр диска Эйри на расстоянии z от фокальной плоскости, M - увеличение объектива, s_0 - рабочая дистанция объектива микроскопа.

Так как в методе μ сго-LIF освещается вся глубина канала и концентрация красителя невысока (так что поглощением света при прохождении вдоль канала можно пренебречь), поток света от всех молекул красителя по глубине канала можно считать одинаковым. Отсюда отношение интенсивности излучения точечного источника на расстоянии z от предметной плоскости к интенсивности излучения точечного источника, находящегося в предметной плоскости, равно

$$\frac{I(z)}{I(0)} = \frac{d_e^2(z)}{d_e^2(0)}$$

где $d_e(z)$ - диаметр функции рассеяния точки на расстоянии z от фокальной плоскости.

Расстояние между молекулами Родамина в растворе по сравнению с диаметром функции рассеяния точки очень мало. Таким образом, можно считать, что интенсивность каждой точки «в слое» μ сго-LIF изображения от глубины z есть среднее по области диаметром $d_e(z)$. Отсюда, средний диаметр пространственного усреднения метода равен среднему диаметру функции рассеяния точки.

Так, например, для объектива $5\times/NA = 0.12$ и глубиной канала 200 мкм средний диаметр пространственного усреднения равен 55 мкм.

На основе полученной оценки пространственного разрешения метода μ сго-LIF был разработан алгоритм усреднения данных численного моделирования для сравнения с экспериментальными μ сго-LIF данными: концентрация в каждой точке измеренного поля концентрации есть средняя концентрация по усеченному конусу, основаниями которого являются диаметр диска Эйри и диаметр функции рассеяния точки на расстоянии половины глубины канала.. Алгоритм был протестирован на μ сго-LIF данных и данных численного моделирования в микромиксере Т-типа при $Re = 30$, когда поток ламинарный и жидкости движутся параллельно друг другу (см. Рис.3).

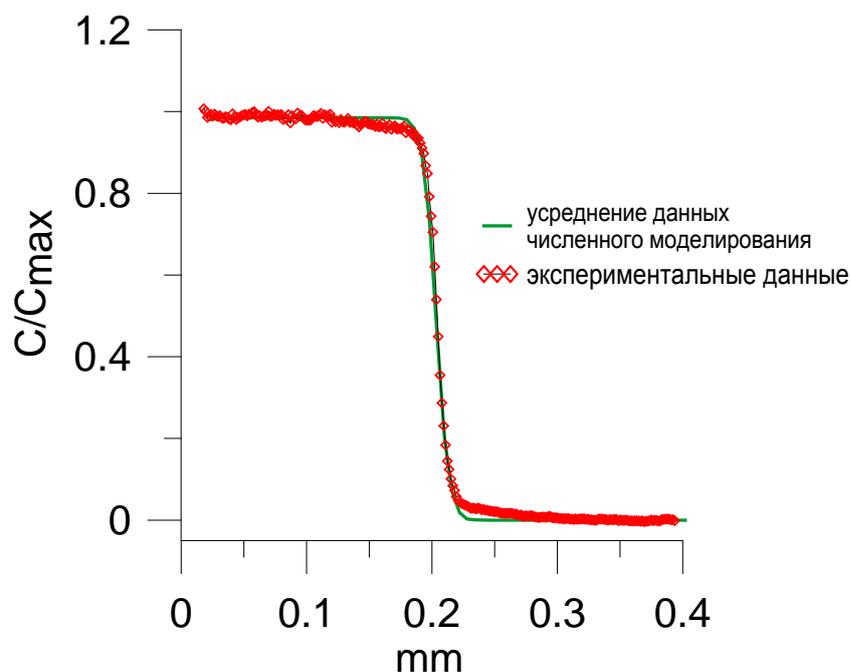


Рис. 3. Нормированные профили концентрации поперек смешивающего канала для $Re = 30$. Экспериментальные и усредненные численные результаты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В МИКРОМИКСЕРЕ Т-ТИПА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ MICRO-PIV И MICRO-LIF

С помощью разработанных экспериментальных методов micro-PIV и micro-LIF были исследованы режимы течения и процессы перемешивания в микромиксере Т-типа. Исследуемый микромиксер Т-типа (производство microLiquid, Испания) представлял собой два входных канала, расположенных под углом 180° друг к другу, и смешивающий канал, расположенный под углом 90° к входным каналам. Поперечный размер входных и смешивающего каналов микромиксера был 200×200 мкм и 200×400 мкм, соответственно. Длина входных и смешивающего канала равнялась 5 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Были проведены micro-PIV измерения в трех областях Т-миксера (так, что поле скорости было рассчитано вплоть до семи калибров от входа в смешивающий канал). Измерения проводились в центральной плоскости канала при числах Рейнольдса от 10 до 300 с шагом 30.

На Рис. 4 показаны нормированные на среднерасходную скорость профили скорости в центральном сечении смешивающего канала на расстоянии 2,5 калибров от входа в смешивающий канал. По профилям скорости и полям скорости (см. Рис.5) видно, что при Re больше 150 профиль скорости в канале меняется, появляются перегибы. Течение из вихревого переходит в «захватывающий» режим. Это связано с возникновением S-образной структуры в смешивающем канале. Таким образом, было установлено, что переход в «захватывающий режим» течения происходит при $120 < Re < 150$.

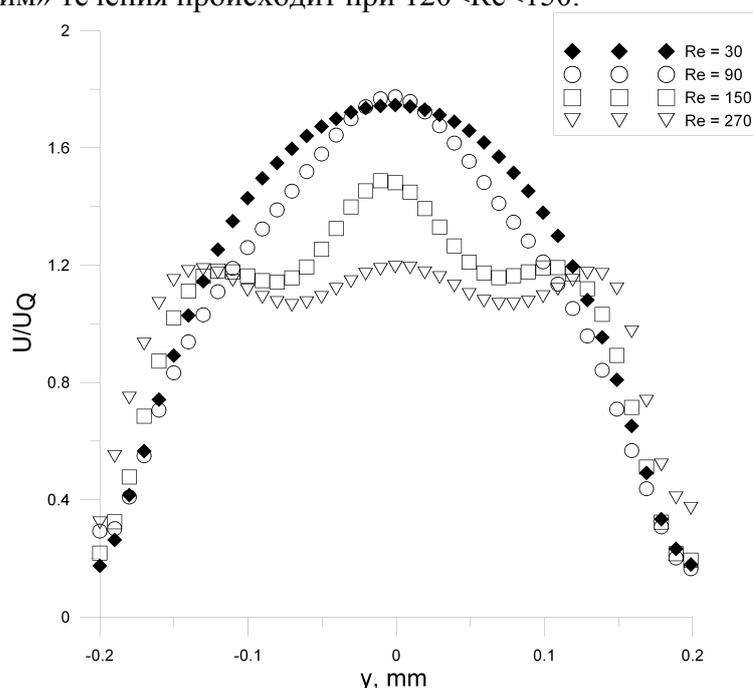
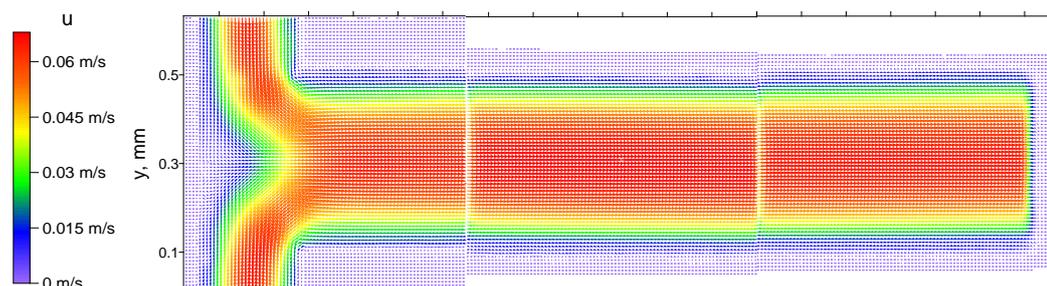


Рис. 4. Нормированные на среднерасходную скорость профили скорости в центральном сечении смешивающего канала ($l = 2,5 Dh$)



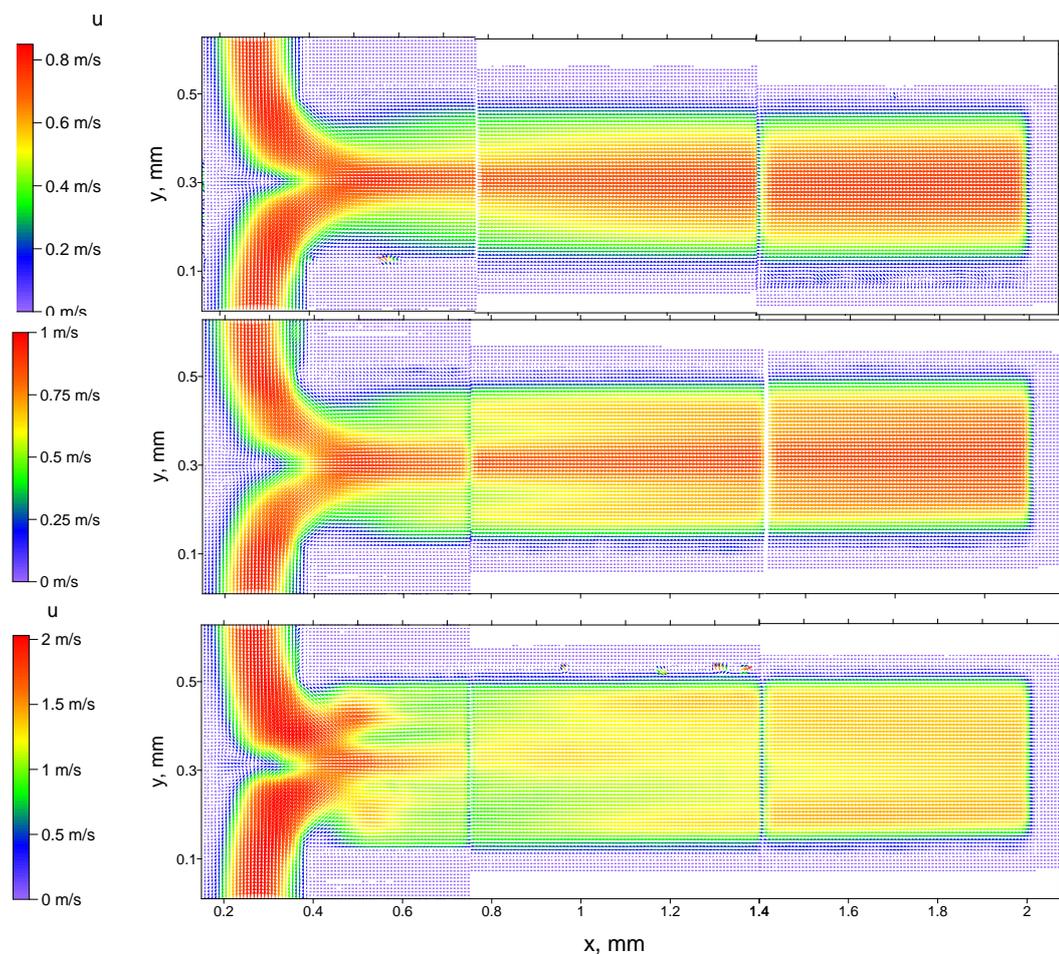


Рис. 5. Средние поля скорости в центральном сечении микромиксера Т-типа при различных числах Рейнольдса. Сверху вниз: $Re = 10$, $Re = 120$, $Re = 150$, $Re = 300$

При проведении *micro-LIF* измерений в качестве осветителя использовалась ртутная лампа. Для визуализации потока использовался объектив микроскопа с увеличением $5\times$ и числовой апертурой $NA = 0.12$. С помощью зеленого светофильтра из спектра излучения ртутной лампы «вырезалась» зеленая длина волны. Для регистрации света, излученного флуорофором Родамин 6Ж, и подавления отраженного света использовался светофильтр. Излучение флуорофора регистрировалось на цифровую камеру Видеоскан с разрешением 2048×2048 пикселей и динамическим диапазоном 12 бит. Был определен диапазон концентраций, при котором интенсивность свечения флуорофора имеет линейную зависимость от концентрации. Калибровка проводилась с помощью алгоритма калибровки в программном обеспечении ActualFlow с попиксельной коррекцией. Это позволило устранить пространственную неоднородность освещения в канале. При проведении измерений полей концентраций в один из входных каналов Т-канала подавалась дистиллированная вода, в другой входной канал подавался водный раствор Родамин 6Ж в концентрации 60 мг/л. В эксперименте исследовались режимы течения при Re от 10 до 300 с шагом 30. Для каждого режима было снято 500 изображений. Для того чтобы сравнить поля концентрации, полученные с помощью метода *micro-LIF*, и поля концентрации, полученные в результате численного моделирования [4], был применен алгоритм усреднения результатов численного моделирования. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных представлены на Рис. 6.

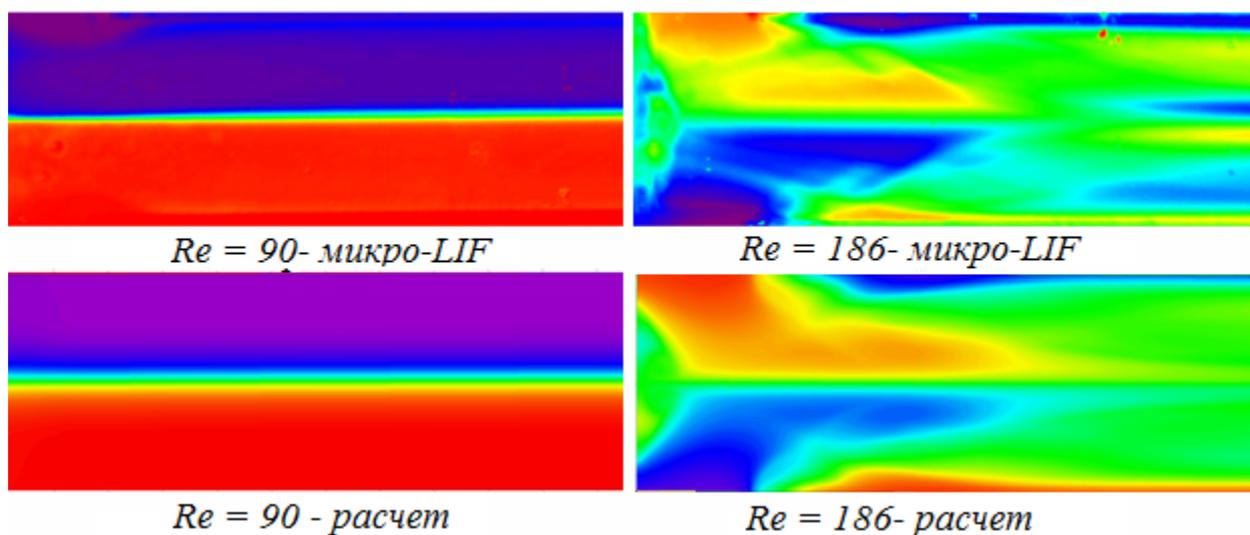


Рис. 6. Осредненные поля концентрации в центральном сечении микромиксера для чисел Рейнольдса 90 и 186

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА В ПРЯМОМ МИКРОКАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА MICRO-PIV

В данной работе исследовался ламинарно-турбулентный переход в прямых микроканалах квадратного сечения с гидравлическим диаметром $= 200$ мкм с помощью метода micro-PIV. Измерения мгновенных полей скорости были проведены при различных числах Рейнольдса от 50 до 1880 в центральном сечении канала. На Рис. 7 представлены средние профили продольной скорости, нормированные на максимальную скорость, в центральном сечении канала при различных числах Рейнольдса. Поперечная координата нормирована на ширину канала $W = 200$ мкм. Сплошной линией показан полностью установившийся турбулентный профиль в макроканале при $Re = 4000$. Из Рис. 7 видно, что при $Re \leq 950$ профили скорости ложатся на одну кривую, при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса профили продольной скорости начинают отклоняться от ламинарного профиля, становятся более плоскими и наполненными.

Высокая плотность засева потока и малая задержка между кадрами позволила измерить мгновенные поля скорости, что в свою очередь, позволило рассчитать пульсации в микроканале. На Рис. 8 представлены пульсации продольной скорости при различных числах Рейнольдса, нормированные на максимальную скорость (скорость в центре канала). При числах $Re=950$ пульсации скорости малы и находятся в пределах погрешности метода. Тем не менее, профиль пульсаций является характерным и повторяет профили при более высоких скоростях потока. Следовательно, можно сделать вывод о том, что поток, в целом оставаясь ламинарным, имеет незначительный уровень пульсаций, который может быть вызван шероховатостью стенки, либо неидеальностью входных условий в канале. При увеличении числа Рейнольдса продольные пульсации растут. Уровень пульсаций при $Re = 1880$ в центральной части канала на 60% выше, чем при $Re = 950$.

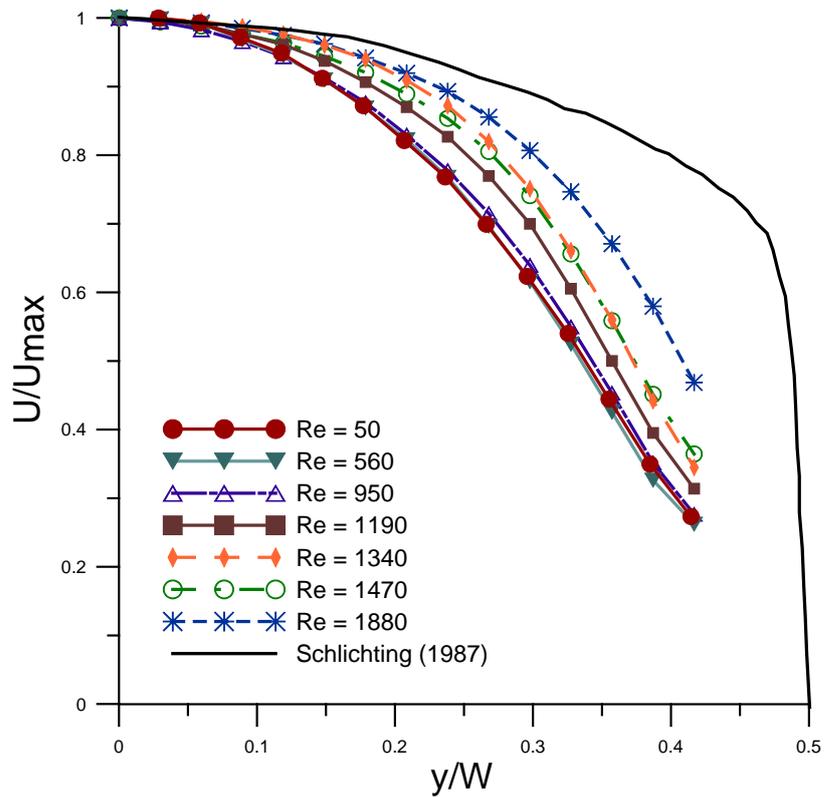


Рис. 7. Нормированные на максимальную скорость средние профили продольной скорости в прямом канале прямоугольного сечения 200×200 мкм в центральном сечении канала

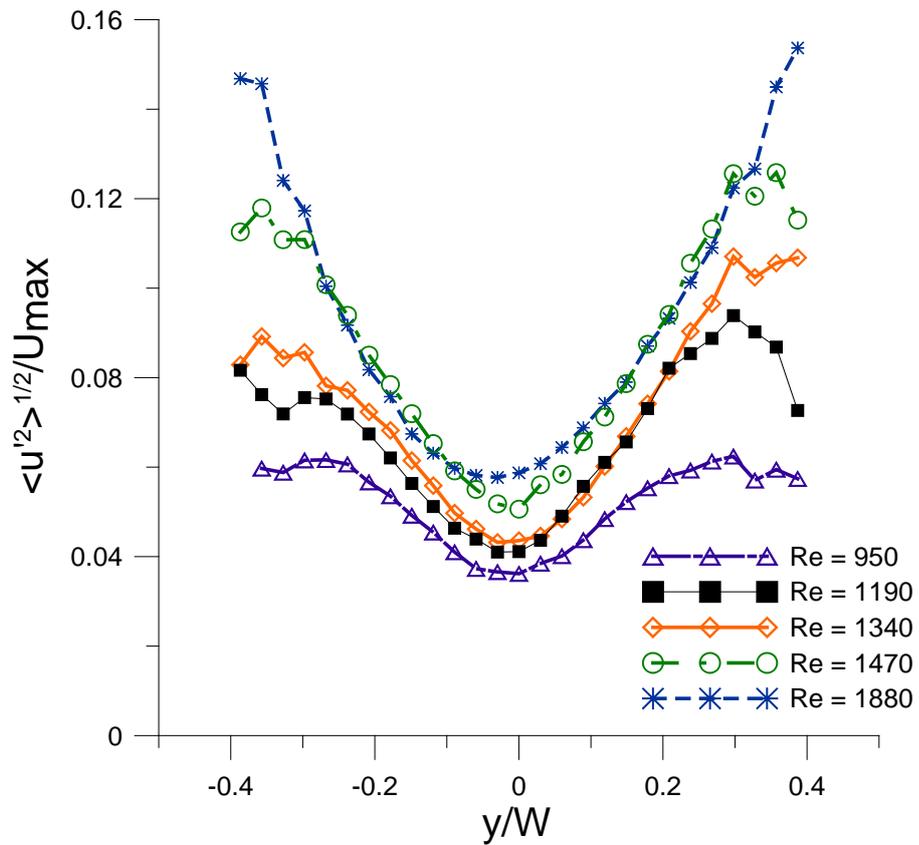


Рис. 8. Нормированные пульсации продольной скорости в микроканале

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были разработаны и реализованы экспериментальные методики для измерения полей скорости и концентраций в микроканалах *micro-PIV* и *micro-LIF*. В работе впервые был предложен метод расчета пространственного осреднения метода *LIF* для расчета полей концентраций с микронным разрешением.

С помощью данных методик были проведены экспериментальные исследования режимов течения и процессов смешения в микромиксере Т-типа. Измерение полей скорости показало, что при числе Рейнольдса от 120 до 150 режим течения в Т-канале меняется, происходит переход в несимметричный вихревой режим. При этом распределение скорости в канале существенно изменяется. Проведено измерение полей концентраций при смешении двух жидкостей в Т-канале для различных чисел Рейнольдса. Разработанный алгоритм расчета пространственного усреднения метода *micro-LIF* позволил сравнить полученные экспериментальные и расчетные поля концентрации при смешивании жидкостей в микромиксере Т-типа.

Высокая плотность засева потока и малая задержка между кадрами позволила измерить мгновенные поля скорости, что в свою очередь, позволило рассчитать пульсации в микроканале при исследовании ламинарно-турбулентного перехода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **C.D. Meinhart, S.T. Wereley, M.H.B. Gray** Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry // *Measurement Science and Technology* - 2000 - V. 11, P. 809-814.
2. **Hao Li, Michael G. Olsen.** Aspect Ratio Effects on Turbulent and Transitional Flow in Rectangular Microchannels as Measured With *MicroPIV* // *Journal of Fluid Engineering* - 2006 - V.128 - P. 305-315.
3. **F.V.White.** *Viscous Fluid Flow* (2nd end.). New York 1991.
4. **Бильский А.В., Лобасов А.С., Минаков А.В., Рудяк В.Я., Ягодницына А.А.** Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном // *Нано- и микросистемная техника*, 2013, №3, с. 18-21

A.A. Yagodnitsyna^{1,2}, A.V. Bilsky^{1,2}

¹ *Institute of Thermophysics SB RAS, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentev ave., 1, E-mail: yagodnitsinaAA@gmail.com*

² *Novosibirsk State University, Russia,
630090, Moscow, Pirogova st., 2*

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMICS AND MIXING PROCESSES IN MICROCHANNEL DEVICES BY MEANS OF MICRO-PIV AND MICRO-LIF TECHNIQUES

In the present work micro-PIV and micro-LIF techniques development results for investigation of hydrodynamics and mixing processes in microchannel devices are presented. Developed experimental techniques were successfully applied for experimental investigation of flow regimes and mixing processes in a T-shaped micromixer. Also micro-PIV technique was applied to investigate laminar-turbulent transition in a straight microchannel with rectangular cross-section.

MICRO-PIV, MICRO-LIF, MICROMIXERS, MICROHYDRODYNAMICS