

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Ягодницына Анна Александровна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТЕЙ
В МИКРОКАНАЛАХ Т-ТИПА**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
к.ф.-м.н. Бильский Артур Валерьевич

Новосибирск – 2019

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Гидродинамика однофазных течений и процессы перемешивания в микромиксерах Т-типа	9
1.2 Течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа	17
1.3 Бесконтактные оптические методы диагностики потоков на микромасштабах	25
1.3.1 Метод цифровой трассерной визуализации микронного разрешения (micro-PIV)	25
1.3.2 Метод лазерной индуцированной флуоресценции для измерения полей концентраций в микроканалах (micro-LIF)	40
1.4 Выводы по главе 1	48
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И КОНЦЕНТРАЦИЙ НА МИКРОМАСШТАБАХ	50
2.1 Разработка методики micro-PIV	50
2.1.1 Аппаратная часть micro-PIV системы	50
2.1.2 Реализация алгоритмов обработки micro-PIV изображений	52
2.1.3 Результаты тестирования и апробация методики micro-PIV	55
2.2 Разработка методики micro-LIF	64
2.2.1 Установка для проведения micro-LIF экспериментов	64
2.2.2 Расчет пространственного разрешения метода micro-LIF	66
2.2.3 Алгоритм расчета эффективности перемешивания по полям концентраций	72
2.3 Выводы по главе 2	73
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЙ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В МИКРОМИКСЕРЕ Т-ТИПА	75
3.1 Измерение полей скорости в Т-миксере	75
3.1.1 Описание эксперимента	75
3.1.2 Результаты micro-PIV измерений в Т-канале	76
3.2 Измерение полей концентраций в Т-канале	82
3.3 Сравнение экспериментальных micro-PIV и micro-LIF данных с результатами численного моделирования	86
3.4 Выводы по главе 3	91

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ В Т-ОБРАЗНЫХ МИКРОКАНАЛАХ	92
4.1 Описание экспериментов	92
4.2 Результаты визуализации режимов течения	96
4.2.1 Визуализация течения керосин – вода	96
4.2.2 Визуализация течения парафиновое масло – вода	99
4.2.3 Визуализация течения парафиновое масло – касторовое масло	101
4.3 Карты режимов течения несмешивающихся жидкостей	102
4.4 Снарядный режим течения несмешивающихся жидкостей	108
4.5 Выводы по главе 4	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ	127
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	128

Введение

Актуальность темы. В последние десятилетия технологические устройства с применением микроканальных технологий стали активно разрабатываться и применяться во многих областях народного хозяйства, таких как энергетика, химия, биология. Микроканальные устройства заняли свое место в различных областях науки и техники: в качестве химических микрореакторов с применением двухкомпонентных потоков смешивающихся и несмешивающихся жидкостей, в качестве микротеплообменников для охлаждения электроники, а также в составе комплексных систем для диагностики и сортировки биологических объектов (анализаторы ДНК и т.п.). Переход от больших масштабов к микромасштабам позволил достичь небывалых до настоящего времени показателей эффективности технологических устройств. Это связано с рядом преимуществ использования микроканалов в технологических процессах: экстремально высокое отношение площади поверхности к объему позволяет достигать максимальной эффективности проводимых реакций, снимать критические тепловые потоки с единицы площади, а также значительно повышать безопасность проводимых процессов при использовании минимально возможного объема веществ.

Потребность в разработке микроканальных устройств привела к развитию новой области науки – микрогидродинамики. Одной из главных целей данной науки является разработка интегрированных микроканальных систем, заменяющих целые лаборатории. Число экспериментальных и теоретических работ в данной области экспоненциально растет. В то время как однофазные течения жидкостей в микроканалах простой геометрии достаточно просто поддаются численному моделированию, с течениями газожидкостных потоков и потоков несмешивающихся жидкостей часто возникают сложности: необходимо учитывать множество факторов, таких как контактный угол, толщина пленки жидкости на стенке микроканала, неоднородность поверхностного натяжения на границе раздела жидкостей и так далее. В связи с этим работы по численному моделированию неотъемлемым образом связаны с экспериментом и полагаются

на него. Вот почему одновременно с возникновением микрогидродинамики стали активно развиваться экспериментальные методы по диагностике потоков на микроуровне. Очевидно, что получение интегральных данных, таких как расход и перепад давления, недостаточно для верификации результатов численного моделирования, что дало толчок к разработке бесконтактных полевых методов измерения различных физических величин в микротечениях.

Микроканалы Т-типа с прямоугольным сечением являются наиболее широко используемыми при создании микроустройств. Это связано с простотой изготовления такого типа микроканалов и удобством подвода жидкостей. Проектирование такого рода микроканальных устройств требует знания целого ряда параметров, влияющих на гидродинамику потока и процессы перемешивания. Необходимость проведения экспериментальных исследований гидродинамики течений однофазных потоков и потоков несмешивающихся жидкостей в Т-каналах для построения базы фундаментальных знаний, которые в дальнейшем будут использоваться при проектировании и оптимизации микроканальных технологических устройств, определяют актуальность настоящей работы.

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование двухкомпонентных течений смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа для построения фундаментальных основ проектирования микроканальных устройств.

В соответствии с указанной целью были поставлены следующие **задачи**:

разработка бесконтактных оптических методов измерения полей скорости (micro-PIV) и концентраций (micro-LIF) в микроканалах;

экспериментальное исследование гидродинамики течений и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа. Построение карт режимов и оценка эффективности перемешивания;

экспериментальное исследование течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа. Построение карт режимов и безразмерных критериев,

определяющих основные параметры, влияющие на эффективность технологических устройств.

Научная новизна.

1. Предложена модель оценки пространственного усреднения метода μ -LIF, позволяющая проводить адекватную интерпретацию экспериментальных данных и верификацию данных численного моделирования.

2. Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с отношением вязкостей, варьирующимся в широком диапазоне.

3. Предложен безразмерный параметр, учитывающий вязкость жидкостей и позволяющий построить универсальную карту режимов для течений несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа.

4. Впервые построены зависимости длины и скорости снарядов для систем несмешивающихся жидкостей с наличием контактной линии и без нее. Показано значительное влияние механизма формирования снаряда на его длину.

Теоретическая и практическая значимость.

Разработанные методики μ -PIV и μ -LIF могут использоваться в научных и образовательных целях для экспериментального исследования потоков с микронным разрешением.

Полученные экспериментальные данные по режимам течения и эффективности перемешивания в Т-образном микромиксере могут быть использованы для верификации данных численного моделирования и проектирования микромиксеров, в том числе для проектирования устройств подачи реагентов при создании комплексных интегрированных микроканальных систем (лабораторий на чипе).

Полученный безразмерный критерий, позволяющий построить универсальную карту режимов течения несмешивающихся жидкостей, может быть использован при проектировании микроканальных устройств для предсказания режима течения.

На защиту выносятся:

Результаты разработки методик *micro-PIV* и *micro-LIF* для измерения полей скорости и концентрации в микроканалах.

Модель оценки пространственного усреднения метода *micro-LIF*.

Результаты экспериментального исследования гидродинамики течений и эффективности перемешивания в Т-образном микромиксере.

Результаты экспериментального исследования течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа.

Достоверность результатов подтверждена сравнением с экспериментальными и теоретическими данными других исследователей, постановками специальных тестовых экспериментов, использованием разработанных методик экспериментов, воспроизводимостью экспериментальных режимов.

Личный вклад соискателя. Все экспериментальные данные, включенные в диссертацию, получены лично автором. Обработка экспериментальных результатов, их анализ и построение безразмерных критериев проведены лично автором. Модель пространственного усреднения метода *micro-LIF* разработана лично автором, программный код для сравнения данных численного моделирования и эксперимента посредством усреднения данных численного моделирования по разработанной модели разработан лично автором. Личный вклад автора включает участие в постановке задач, решаемых в рамках выполнения диссертационной работы. Экспериментальные методики *micro-PIV* и *micro-LIF* разрабатывались при непосредственном участии автора.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: 3rd European Conference on Microfluidics (Heidelberg, Germany, 2012); 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Naples, Italy, 2015), 13th Asian Symposium on Visualization (Novosibirsk, 2015), International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (Novosibirsk, 2016), 5th International Conference on Micro and Nano Flows (Milano, Italy, 2016); Всерос. конф. «Фундаментальные основы

МЭМС- и нанотехнологий» (Новосибирск, 2010, 2012 и 2015 гг.); Межд. научно-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2013); Всерос. конф. «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2016, 2017); XLVIII, XLIX, LIII и LIV Межд. Научная студ. конф. (Новосибирск, 2010, 2011, 2015, 2016); Всерос. школа-конф. молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2011, 2016); Межд. конф. «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта, 2011, 2015).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 27 работ, включая 10 статей, в том числе 6 статей – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, включающих в себя обзор литературы, заключения и библиографии. Работа изложена на 130 страницах, содержит 68 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 92 наименования работ.

Глава 1. Обзор литературы

1.1 Гидродинамика однофазных течений и процессы перемешивания в микромиксерах Т-типа

Значительное количество работ в области исследования микрогидродинамики направлено на изучение смешивания жидкостей в микроканалах. Актуальность данных исследований состоит в широком применении микроректоров и микросмесителей в биологии и химии, производительность которых определяется эффективностью перемешивания реагентов. Микрореакторные технологии вышли на передний план в качестве инструмента для разработки новых реакций и их масштабирования. Основными достоинствами микроректоров является быстрое и эффективное перемешивания реагентов, более эффективный теплоперенос по сравнению с традиционными химическими реакторами, очень малый расход реагентов, точное регулирование параметров проведения реакции (расхода, времени пребывания, давления, температуры), простая и быстрая подстройка оптимальных условий для проведения реакции [1]. Влияние масштабирования на скорость протекания химических реакций подробно описано в работе D. Vothe et al. [2]. В случае течения водяных растворов через микроканал с характерным гидравлическим диаметром порядка нескольких десятков микрометров гидродинамика течения описывается уравнениями Навье-Стокса в обезразмеренном виде, дополненными уравнением неразрывности и граничными условиями:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p' + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u} \quad (1.1)$$

где p' - безразмерное давление, $Re = \frac{U d_H}{\nu}$ - число Рейнольдса. При подобном изменении геометрии с соответствующим масштабированием граничных условий течение определяется числом Рейнольдса.

Перенос идеально растворенного нереагирующего вещества описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \frac{1}{ReSc} \Delta c \quad (1.2)$$

где c – безразмерная концентрация вещества, Sc – число Шмидта. Таким образом, при сохранении чисел Re и Sc проявляется подобие процессов переноса и гидродинамика потока.

Для реагирующих потоков уравнение процесса переноса дополняется кинетическим членом:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla c = \frac{1}{ReSc} \Delta c - \frac{d_H}{l} Da_I \quad (1.3)$$

здесь $Da_I = \frac{kl}{U}$ – первое число Дамкёлера для реакции первого порядка, определяющее отношение скорости протекания химической реакции к скорости конвективного переноса, k – константа скорости реакции. Авторы работы [2] ввели масштабирующий коэффициент $\lambda \ll 1$ и рассмотрели течение с характерными масштабами $l' = \lambda l$ и $d'_H = \lambda d_H$. Чтобы обеспечить те же условия потока, приняли $U' = U/\lambda$. Тогда:

$$Re' = Re \quad Sc' = Sc \quad Da'_I = \lambda^2 Da_I \quad (1.4)$$

То есть при уменьшении характерных масштабов временные масштабы прохождения химической реакции значительно увеличиваются по сравнению с временным масштабом процессов переноса. Так, например, «слишком быстрые» реакции, которые невозможно проанализировать в макрореакторах, с большим успехом проводятся и анализируются в микрореакторах.

В макроустройствах при перемешивании жидкостей обычно превалирует турбулентный режим течения, благодаря которому образуется большая площадь раздела между смешивающимися жидкостями. Перемешивание жидкостей за счет диффузии происходит на микромасштабе Бэтчелора, определяемом размером самых малых вихрей (Колмогоровским масштабом) и числом Шмидта: $\eta_B = \eta_K / Sc^{1/3}$ [3]. В микроканалах из-за малого гидравлического диаметра чаще всего процессы переноса происходят в ламинарном режиме течения и определяются, в основном, диффузией. Таким образом, для интенсификации процессов

перемешивания на микромасштабах необходимо создавать такие устройства, в которых возникает ненулевая поперечная компонента скорости.

Одним из наиболее часто применяемых микромиксеров является микромиксер Т-формы. Геометрия данного микромиксера (см. Рис. 1) с входными каналами квадратного сечения со стороной d от десятков до сотен микрометров, и выходным каналом прямоугольного сечения высоты d и ширины $2d$, проста в изготовлении и позволяет использовать макроканалы для подвода жидкости к микромиксеру, т.к. входные и выходные каналы миксера максимально удалены друг от друга. Два потока втекают в микромиксер под углом 180° и вытекают из выходного канала, расположенного под углом 90° к входным каналам.

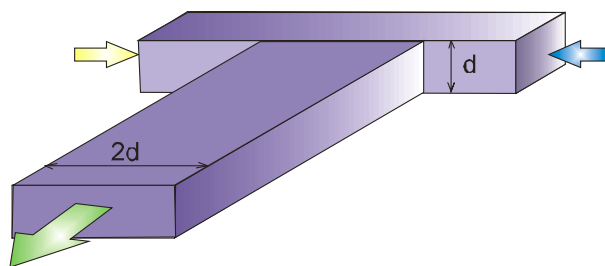


Рис. 1. Геометрия микромиксера Т-формы.

В настоящий момент существует ряд работ по численному моделированию течения в Т-миксерах. В работе N. Kockmann et al. [4], представленной на Первой международной конференции по мини- и микроканалам, впервые были представлены результаты по численному моделированию процесса смешения двух жидкостей в Т-каналах с различными диаметрами входных и выходных каналов ($d = 50, 100$ и 200 мкм). Авторы работы показали, что существует три различных режима течения в Т-канале: ламинарный, вихревой и «захватывающий». При ламинарном режиме течения преобладает диффузионный механизм перемешивания, а значит, перемешивание является неэффективным. При увеличении скорости потока на входе в выходной канал образуются вихри. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса течение становится неустойчивым, симметрия потока нарушается, что увеличивает эффективность перемешивания.

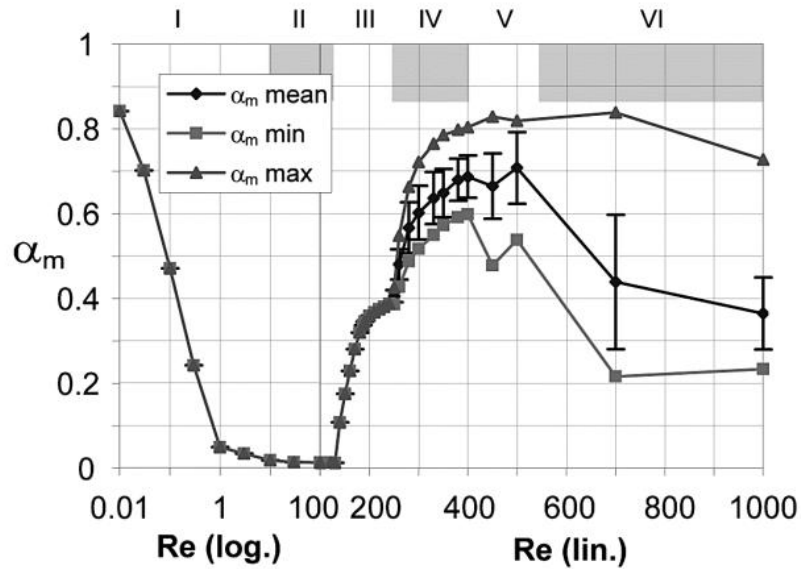


Рис. 2. Эффективность перемешивания на расстоянии 2000 мкм от торца смешивающего канала при различных числах Рейнольдса для Т-образного микроканала 300x300x600 мкм [5].

Развитием работы стало численное моделирование процессов смешения жидкостей в Т-канале 300x300x600 мкм в статье S. Dreher et al. [5] в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,01 до 1000. Пространственный размер расчетной сетки в поперечном сечении микроканала составил 10 мкм, для некоторых режимов использовалась более мелкая сетка 5 мкм. График зависимости эффективности перемешивания от числа Рейнольдса на расстоянии 2000 мкм от торца смешивающего микроканала показан на Рис. 2. Авторы работы установили, что при малых числах Рейнольдса $Re < 0.1$ перемешивание происходит только за счет диффузии, так как жидкости находятся в микроканале достаточно долгое время, степень перемешивания жидкостей высока. Было показано, что при числах Рейнольдса больше 10 в канале образуются симметричные вихри (так называемое течение Дина). Образование данных вихрей связано с центробежными силами на криволинейных участках микроканала и определяется безразмерным параметром, числом Дина:

$$Dn = Re * \left(\frac{d_H}{2w}\right)^{1/2} \quad (1.5)$$

Подробно образование вихрей Дина в изогнутых микроканалах в виде колен, а также влияние отношения глубины к ширине данных микроканалов и числа Рейнольдса потока на перемешивание жидкостей исследовано с помощью численного моделирования в работе [6]. На Рис. 3 показаны картины распределения концентрации примеси в изогнутом микроканале при повороте потока на 90° , видно, что на некотором расстоянии от колена образуется грибообразное распределение концентрации, приводящее к значительному росту эффективности перемешивания при изначальном слоистом течении жидкостей в канале. В Т-образном микроканале, однако, возникновение вихрей Дина не ведет к увеличению эффективности перемешивания. Образование вихрей не связано с нарушением симметрии потока, и, так как время нахождения жидкостей в микроканале обратно пропорционально числу Рейнольдса, эффективность перемешивания падает.

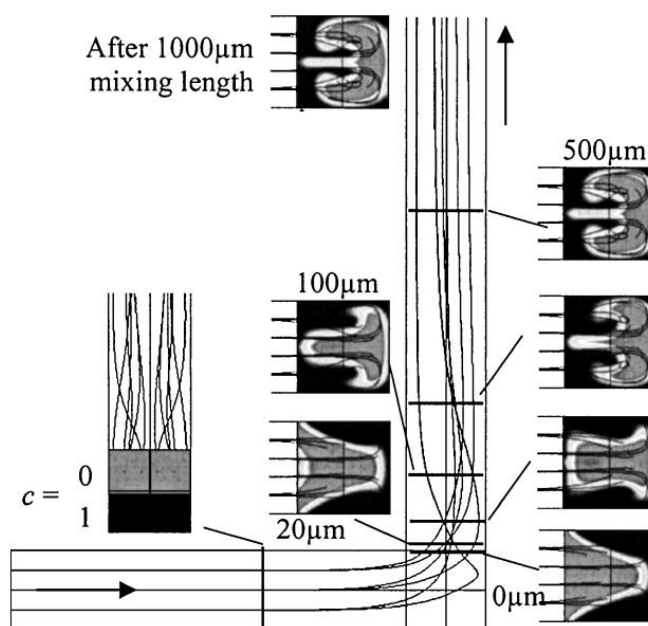


Рис. 3. Линии тока и распределение концентрации примеси в поперечных сечениях изогнутого микроканала 100×100 мкм [6].

При числах Рейнольдса больше 140 жидкость перетекает от одной стенки выходного канала к другой и образует два вихря, вращающиеся в противоположные стороны (см. Рис. 4). Это значительно увеличивает эффективность перемешивания. При $Re > 240$ течение становится

нестационарным, появляются периодические пульсации вследствие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, на графике Рис. 2 показаны минимальное, максимальное и среднее значения эффективности перемешивания. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса $Re > 500$ пульсации потока становятся нерегулярными, двойные вихри, приводящие к образованию большой площади раздела между жидкостями, разрушаются, что приводит к уменьшению эффективности перемешивания. Стоит заметить, что размер расчетных ячеек, используемых в данном исследовании, позволил лишь приблизительно смоделировать градиенты концентрации, таким образом, тренды, показанные на Рис. 2 дают завышенные оценки для эффективности перемешивания из-за числовой диффузии и могут только качественно описать процесс.

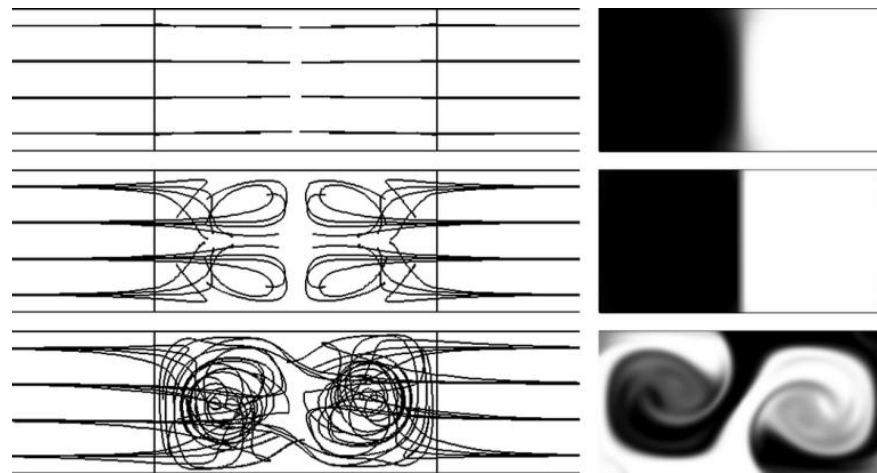


Рис. 4. Линии тока и концентрация трассеров в микромиксере Т-типа. Вверху: слоистое ламинарное течение ($Re = 1$), в центре: вихревое течение ($Re = 100$), внизу: захватывающий поток ($Re = 200$). S. Dreher et al. [5].

В работе D. Vothe et al. [2] на основе численного моделирования были изучены процессы перемешивания в микромиксере Т-типа для трех различных режимов течения. Авторы использовали очень мелкую расчетную сетку с пространственным разрешением 1 мкм, что позволило добиться более высокой точности при определении полей концентрации примеси. В первом, ламинарном, режиме течения линии тока параллельны друг другу, распределение концентрации примеси полностью сегрегированно. Во втором случае (вихревой режим) формируется пара двойных вихрей, что связано с неустойчивостью,

вызванной центробежными силами, однако ось симметрии, перпендикулярная входным каналам, сохраняется. В третьем режиме в связи с неустойчивостью точки застоя течения ось симметрии нарушается, происходит «переплетение» потоков с входных каналов, образуется большая площадь поверхности между жидкостями, что значительно повышает эффективность перемешивания. Для описания процессов перемешивания жидкостей в микроканале авторы работы наряду с эффективностью перемешивания использовали понятие интенсивность сегрегации Данквертса [7]. График зависимости интенсивности сегрегации и эффективности перемешивания от среднерасходной скорости в смешивающем канале показан на Рис. 5.

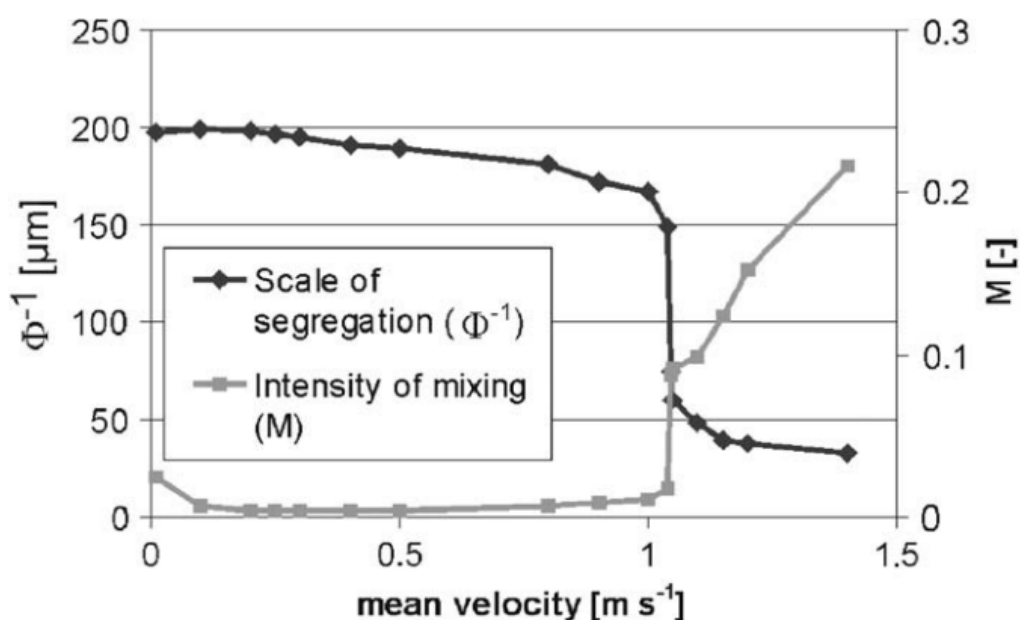


Рис. 5. Интенсивность сегрегации и эффективность перемешивания в зависимости от среднерасходной скорости в микромиксере Т-типа 100x100x200 мкм [2].

Из вышеперечисленных результатов численного моделирования очевидно, что для проектирования эффективных микромиксеров и микрореакторов необходимо разработать критерий перехода из вихревого в захватывающий режим. Данному вопросу посвящены работы А. Soleymani et al. [8,9]. Проведя численное моделирование течения в Т-образных микроканалах с размерами $A \times B \times C$ с одинаковыми гидравлическими диаметрами D_h , но разным отношением глубины к ширине B/C и A/C , авторы работ обнаружили, что на переход из вихревого в

захватывающий режим влияют расход жидкостей и геометрия микроканала. Далее авторы предположили, что существует безразмерный параметр, описывающий переход из вихревого в захватывающий режим, который может быть выражен как произведение степенных функций числа Рейнольдса, отношения ширины к глубине смешивающего и подводящих микроканалов, а также их гидравлических диаметров. Для определения значения степеней в работе было проведено численное моделирование потока для Т-образных микроканалов 30 различных геометрий. В результате была установлена формула для безразмерного параметра:

$$K = Re^{0,82} \cdot \left(\frac{B}{C}\right)^{-0,79} \left(\frac{D_{hin}}{D_h}\right)^{-1,5} \cdot \left(\frac{A}{C}\right)^{0,15} \quad (1.6)$$

и определено критическое значение для перехода из вихревого в захватывающий режим $K = 100$.

Экспериментальные работы по изучению смешения в Т-миксерах существуют, однако они ограничены либо качественной визуализацией течения, либо невысоким пространственным разрешением и дискретным набором чисел Рейнольдса. M. Engler et al. [10] проводили визуализацию течения жидкости в Т-миксере с помощью добавления флуоресцентного красителя в один из каналов, и установили, что поток является симметричным при $Re = 89$, и ассиметричным при $Re = 140$. S. Wong et al. [11] также провели экспериментальное и численное исследование потока в выходном канале Т-миксера с различным отношением глубины к ширине и гидравлическим диаметром, однако эксперимент ограничился качественными картинками перемешивания жидкостей.

В работе M. Hoffmann et al. [12] было проведено экспериментальное исследование смешения жидкости в Т-каналах различной геометрии с помощью методов *micro-PIV* и *micro-LIF*. Для измерения полей концентраций авторы данной работы использовали конфокальный сканирующий микроскоп. Были получены поля концентраций в тонком слое в нескольких сечениях по глубине канала, в отличие от стандартного метода, когда рассчитывается усредненное по всей высоте канала поле концентрации, что позволило восстановить трехмерное

распределение концентрации в объеме микроканала в стационарных режимах (Рис. 6). Несмотря на весьма ценные экспериментальные данные по измеренным полям концентраций в Т-каналах, представленные данные по измеренным полям скорости весьма ограничены по режимам течения и количественным характеристикам.

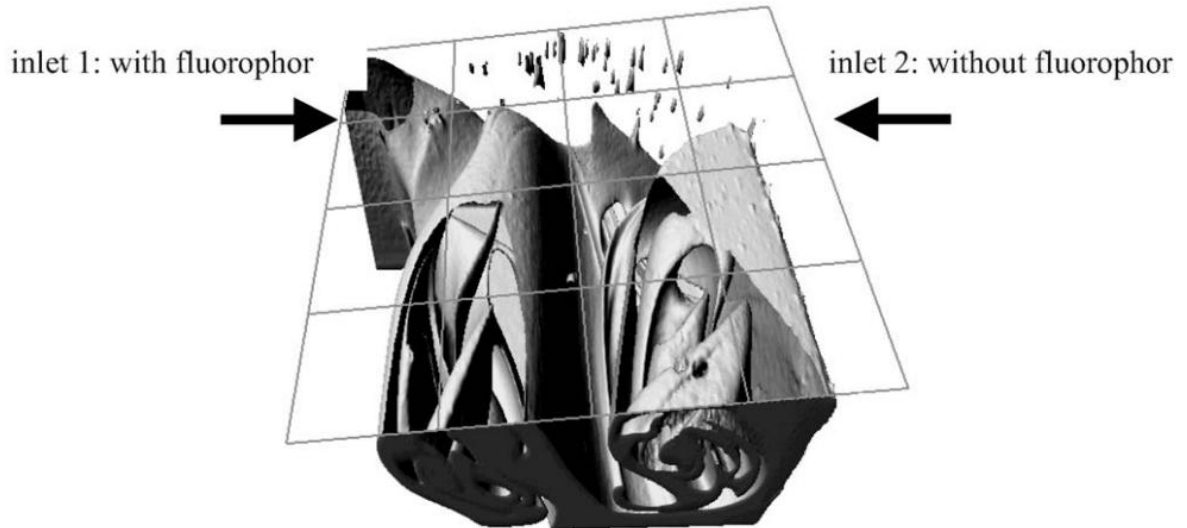


Рис. 6. Трехмерное распределение концентрации красителя (изоповерхности концентрации), восстановленное по измеренным в тонких слоях полям концентрации с помощью лазерного сканирующего микроскопа в Т-канале с размерами 100x285x400 мкм, $Re = 160$ [12].

1.2 Течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа

Течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах имеют массу приложений, таких как производство эмульсий [13–15], синтез наночастиц [16,17], проведение реакций нитрирования [18] и экстракции [19,20], а также ряд биохимических приложений [21,22]. Аналогично микроканальным устройствам с однофазными потоками, использование течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах обеспечивает высокие скорости тепло и массопереноса, позволяет проводить непрерывные и безопасные химические реакции. Более того, на создание единицы межфазной поверхности между двумя жидкостями в микроканалах приходится меньше затраченной энергии, чем в альтернативных технологических устройствах [23]. Микроканальные устройства с течением

несмешивающихся жидкостей используются в биологических анализах, в том числе для секвенирования ДНК одиночных клеток [24]. В таких устройствах анализируемые объекты помещаются в капли дисперсной фазы, и затем могут продвигаться по микроканальной системе в окружении несущей фазы, подвергаться анализу и дальнейшему слиянию с другими веществами. В работе [25] было показано, что эффективность таких устройств может превышать стандартные устройства для проведения биологических анализов в десятки раз.

Разработка и оптимизация микроканальных устройств с течением несмешивающихся жидкостей требует комплексных данных о режимах течения в микроканальных устройствах в зависимости от физических свойств жидкостей и параметров потока. Течение несмешивающихся жидкостей в микроканалах характеризуется огромным многообразием реализующихся режимов: капельный, снарядный, скользяще-снарядный, параллельный, параллельный с деформированной границей, кольцевой, дисперсный и т.д [26–30]. Влияние гравитационных сил, определяемое числом Бонда, в микроканалах крайне мало, поэтому режимы течения определяются балансом между силами межфазного натяжения, инерции и вязкостными силами, который может быть выражен в терминах безразмерных параметров, числа Рейнольдса Re , числа Вебера We и капиллярного числа Ca :

$$Re = \frac{\text{силы инерции}}{\text{вязкостные силы}} = \frac{\rho U D_h}{\mu}$$

$$We = \frac{\text{силы инерции}}{\text{силы поверхностного натяжения}} = \frac{\rho U^2 D_h}{\sigma} \quad (1.7)$$

$$Ca = \frac{\text{вязкостные силы}}{\text{силы поверхностного натяжения}} = \frac{\mu U}{\sigma}$$

Для построения карт режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах используются различные безразмерные параметры. Так, в работе Y. Zhao et al. [29] проведено экспериментальное исследование течения керосина и воды в микроканале Т-формы. Для построения карты режимов авторы использовали числа Вебера для обеих фаз, разделив карту на три области:

преобладание сил межфазного натяжения (снарядный и капельный режимы), преобладания сил инерции (параллельный и кольцевой режимы) и область, где данные силы сравнимы. В работе Н. Foroughi и М. Kawaji [27] построена карта режимов для течения вязкого масла и воды с использованием чисел Рейнольдса, чисел Вебера и капиллярных чисел несущей и дисперсной фаз. Было выделено пять зон на карте режимов: преобладание сил межфазного натяжения ($Re_w < 20$, $Ca_w < 0,0016$, $We_w < 0,03$) в снарядном и капельном режимах, область, в которой силы межфазного натяжения сравнимы с силами инерции ($20 < Re_w < 46$, $0,0016 < Ca_w < 0,0037$, and $0,03 < We_w < 0,17$) в параллельном режиме и режиме с удлиненными снарядами, область со сравнимыми силами инерции и вязкости, преобладающими над силами межфазного натяжения ($95 < Re_w < 116$, $0,0077 < Ca_w < 0,0094$, $0,73 < We_w < 1,1$) в кольцевом режиме течения, область с доминированием сил инерции ($Re_w > 116$, $Ca_w > 0,0094$, $We_w > 1,1$) в дисперсно-кольцевом режиме.

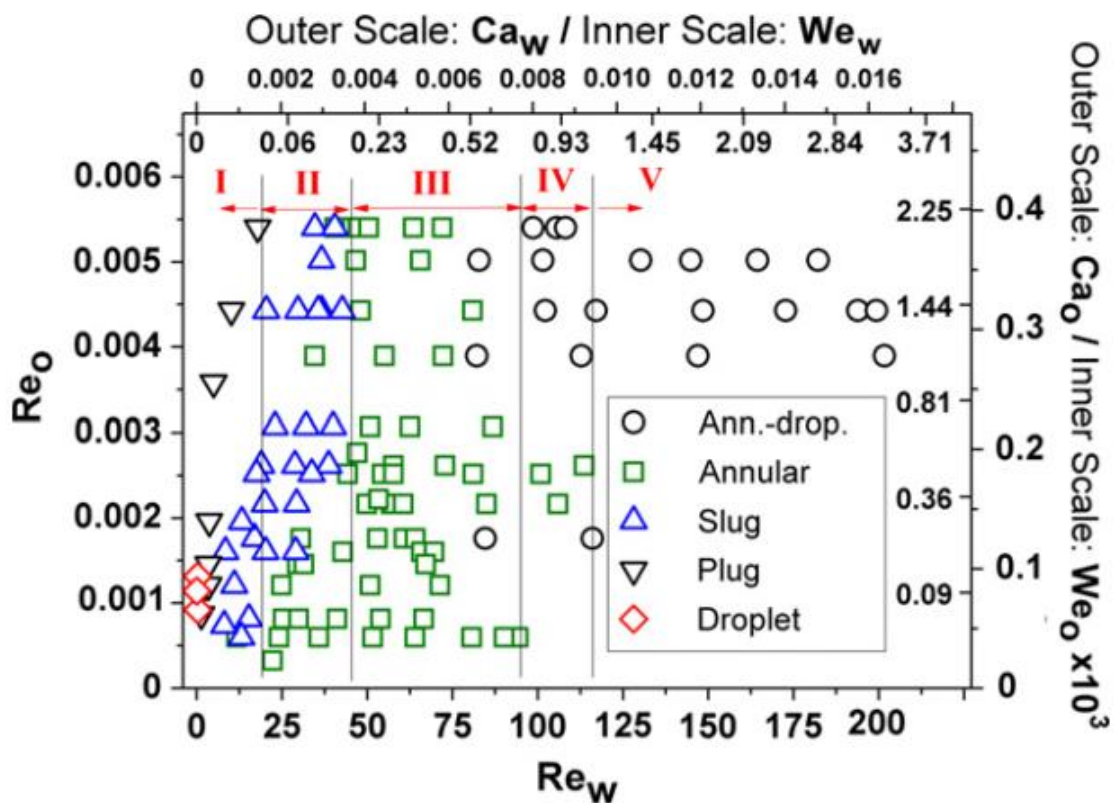


Рис. 7. Карта режимов несмешивающихся жидкостей из работы [27].

В работе М. Kashid и L. Kiwi-Minsker [28] для построения карты режимов течения несмешивающихся жидкостей по оси ординат использовалось число Лапласа для несущей фазы $La = \frac{Re_c}{Ca_c}$, по оси абсцисс – размерный параметр $\frac{Re_d D_h}{\epsilon_d}$, представляющий собой произведение числа Рейнльда дисперсной фазы, нормированное на ее объемную долю, и помноженное на гидравлический диаметр канала (Рис. 8). Авторы работы делят карту режимов на три области: режим с преобладанием сил поверхностного натяжения $\frac{Re_d D_h}{\epsilon_d} < 0,1$ м, переходной режим $0,1 < \frac{Re_d D_h}{\epsilon_d} < 0,35$ м и режим с преобладанием сил инерции $\frac{Re_d D_h}{\epsilon_d} > 0,35$ м. При построении такой карты режим течения определяется скоростью дисперсной фазы и не зависит от скорости несущей фазы. Такой подход был также использован для построения карты режимов газожидкостных течений в микроканалах [31], и подходит для течений жидкость-жидкость только в том случае, если одна из фаз не смачивает стенки канала. Более того, критерий разделения режимов течения вовсе не зависит от свойств несущей фазы.

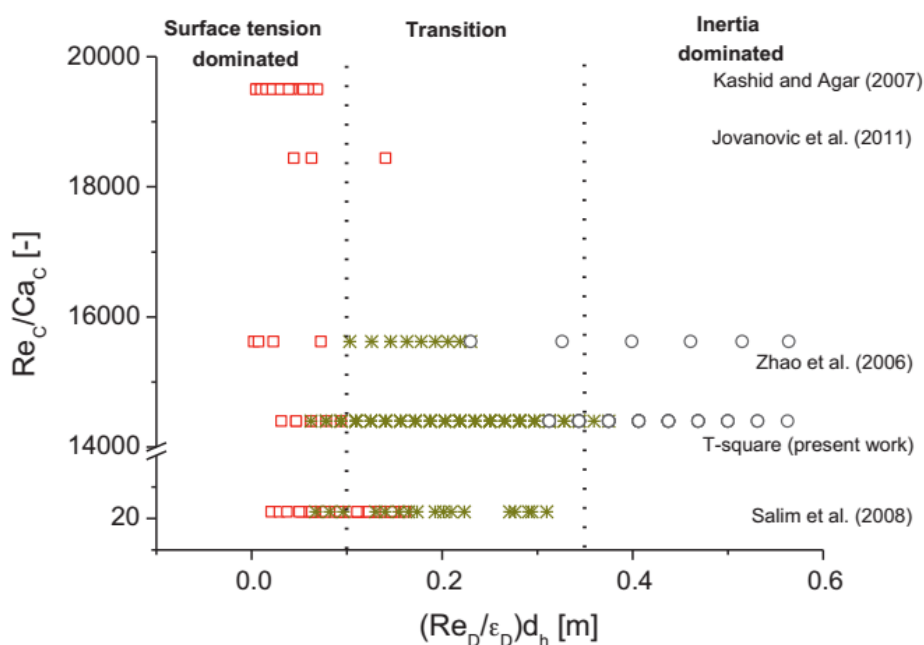


Рис. 8. Карта режимов течения из работы [28], построенная по числу Лапласа для несущей фазы и размерному критерию $(Re_d/\epsilon_d)d_h$ для дисперсной фазы.

Попытка создать универсальный критерий для построения карты режимов была сделана в работе S. Waelchli и von Rohr [32], авторы которой применили П-теорему для создания безразмерного комплекса и провели его валидацию с помощью набора экспериментальных данных по визуализации газожидкостных течений в микроканалах. Полученный безразмерный комплекс $Re^{0.2}We^{0.4}$ позволил хорошо обобщить экспериментальные данные авторов. Однако применение данного комплекса к построению карты режимов других авторов не дало удовлетворительных результатов.

Таким образом, несмотря на необходимость предсказания режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах для разнообразных жидкостей, геометрий микроканала и параметров потока, в литературе нет четких критериев для построения карт режимов, позволяющих объединить экспериментальные данные, полученные различными авторами. Большая часть работ направлена на исследование газожидкостных течений, либо течений несмешивающихся жидкостей, в которых дисперсная фаза не смачивает стенки микроканала.

Снарядный и капельный режимы течения являются наиболее эффективными при проведении ряда химических реакций из-за крайне высокого отношения площади межфазной границы к объему жидкостей. В данных режимах тепло- и массоперенос обеспечивается конвекцией внутри снарядов [33–35] и диффузией через границу раздела жидкостей. Для адекватной работы микроканальных устройств в снарядном и капельном режимах требуется производить контроль над стабильностью отрыва снарядов и капель, скоростью движения снарядов, их длиной, циркуляцией внутри снарядов и перемычек. На вышеперечисленные параметры работы устройств влияет большое количество физических величин, таких как вязкость жидкостей, расходы фаз, отношение расходов, смачиваемость стенок микроканала и так далее. Таким образом, точное предсказание данных параметров является актуальной задачей.

Одной из первых работ, направленных на исследование формирования эмульсий в микроканалах Т-формы, является [36]. Авторы работы предположили, что динамика формирования капель определяется балансом между сдвиговыми

напряжениями и давлением Лапласа, аналогично модели образования эмульсий в сдвиговых течениях со свободными границами, предложенной Тейлором в 1934 году [37], так что диаметр капли является функцией капиллярного числа несущей фазы:

$$\frac{d}{D_h} \sim \frac{1}{Ca_c} \quad (1.8)$$

Ключевой работой по исследованию длины снарядов от параметров потока является работа P. Garstecki et al. [38]. Авторы работы определяют выдавливающий режим (squeezing regime) отрыва снарядов при низких капиллярных числах, когда силы межфазного натяжения преобладают над сдвиговыми силами и динамика отрыва снарядов определяется перепадом давления вдоль снаряда при его формировании. При этом длина снарядов определяется формулой:

$$\frac{L}{w} = 1 + \alpha * \frac{Q_d}{Q_c} \quad (1.9)$$

где α – константа порядка единицы, зависящая от геометрии Т-входа, w – ширина микроканала. Длина снарядов, определяемая по данной формуле, не зависит ни от вязкости фаз, ни от межфазного натяжения. Авторы работы указывают, что данный эффект является типичным для микроканалов с характерными размерами порядка 100 мкм и расходами фаз от 0,01 до 1 мкл/с – капиллярные числа в таком случае чаще всего оказываются малыми $Ca < 0.01$. В результате сдвиговые напряжения вдоль границы раздела фаз не достаточны для того чтобы оказывать какое-либо значительное влияние на форму капли. При этом капля занимает почти все сечение микроканала и заставляет течь несущую фазу в виде тонких пленок на стенках микроканала, что приводит к повышению давления вверх по потоку от формирующегося снаряда и к сдавливанию перешейка снаряда. Выдавливание снаряда происходит со скоростью, пропорциональной расходу несущей фазы, при этом сам снаряд наполняется жидкостью со скоростью, пропорциональной расходу дисперсной фазы. Объединение двух данных эффектов приводит к закону, описанному выше.

Дальнейшим развитием данной работы стало численное моделирование течения несмешивающихся жидкостей в срезающем потоке в микроканале Т-формы при различных параметрах: отношениях расходов фаз, отношениях вязкостей фаз и капиллярных числах несущей фазы [39]. Авторы работы установили три различных режима формирования снарядов и капель: выдавливающий (“squeezing”), капельный (“dripping”) и струйный (“jetting”), эволюция во времени которых показана на Рис. 9, при этом переход от выдавливающего к капельному режиму происходит при $Ca \approx 0.15$ для отношения вязкостей фаз около 1, и при немного более высоком Ca для более низких отношений вязкостей фаз. Для выдавливающего режима была подтверждена формула (1.9). Также авторы работы показали, что формула для длины снарядов (1.8), предложенная в работе [36], переоценивает размер снарядов на порядок, связав это дополнительными неучтенными силами, связанными с перепадом давления вдоль снаряда на его отрыв.

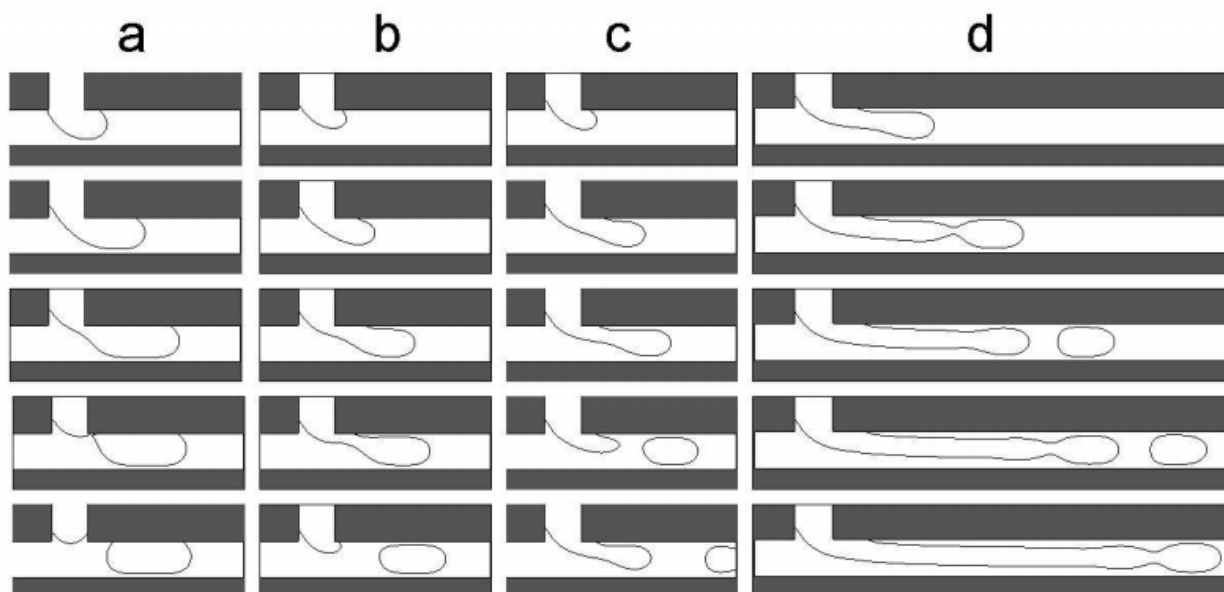


Рис. 9. Формирование снарядов в микроканале а) при низких Ca в выдавливающем (“squeezing”) режиме; б-с) при высоких Ca в капельном (“dripping”) режиме; д) – установление струйного (“jetting”) режима. Из работы М. Menech et al. [39].

В работе J. Xu et al. [40] экспериментально исследовано формирование капель в Т-канале при срезающем потоке. Капиллярное число несущей фазы варьировалось в диапазоне от 10^{-4} до 0,3. В эксперименте были получены следующие режимы течения: снарядный режим, при котором длина снаряда была больше двух ширин главного канала, капельный режим, при котором длина снарядов меньше ширины главного канала и переходной режим. Авторы работы обозначили три механизма формирования капель в зависимости от капиллярного числа. В выдавливающем режиме (“squeezing regime”) при капиллярном числе несущей фазы $Ca_c < 0,002$ сдвиговые силы, вызванные движением несущей фазы, гораздо меньше сил поверхностного натяжения и не могут оторвать капли. Поэтому несущая фаза движется в виде снарядов, динамика их отрыва определяется перепадом давления вдоль снаряда, длина снарядов хорошо описывается формулой P. Garstecki (1.9). При капиллярном числе несущей фазы $0,01 < Ca_c < 0,03$ осуществляется капельный режим «dripping regime», сдвиговые силы становятся достаточно большими по сравнению с силами поверхностного натяжения, дисперсная фаза формирует капли. При $0,002 < Ca_c < 0,01$ наблюдается переходной режим между этими двумя режимами. Авторы статьи сравнили данные, полученные по формуле (1.8) с экспериментальными данными по диаметру капель и установили, что формула верна при $Ca_c > 0,2$, в то время как при меньших $0,01 < Ca_c < 0,2$ рассчитанные диаметры капель выше экспериментальных. Основной причиной данного расхождения авторы определяют влияние растущей капли на скорость несущей фазы вдоль линии формирующейся капли, сравнимой с размерами микроканала. Авторы ввели модифицированное капиллярное число несущей фазы, учитывающей влияние размера капли на скорость несущей фазы за счет уменьшения сечения микроканала, так что диаметр капли описывается следующим уравнением:

$$\frac{d}{D_h} \sim \frac{1}{Ca_c} \left(1 - \frac{\pi d^2}{4wh}\right) \quad (1.10)$$

В переходном режиме ($0,002 < Ca_c < 0,01$) формирование снарядов описывается обоими механизмами – динамическим разрушением границы, на которое влияет

отношение расходов дисперсной и несущей фазы, и соотношением между сдвиговыми силами и силами поверхностного натяжения, которое определяется капиллярным числом несущей фазы. Таким образом, длина снарядов может быть описана следующим выражением:

$$\frac{l}{w} = \varepsilon + k * \left(\frac{Q_d}{Q_c}\right)^\alpha \left(\frac{1}{Ca_c}\right)^\beta \quad (1.11)$$

В работе указано, что в литературе крайне мало экспериментов с данными по длине снарядов в переходном режиме течения. Экспериментальные данные из предыдущих работ авторов [41–44] были аппроксимированы с помощью зависимости (1.11), получено достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

1.3 Бесконтактные оптические методы диагностики потоков на микромасштабах

1.3.1 Метод цифровой трассерной визуализации микронного разрешения (micro-PIV)

Основа метода

Метод Microscale Particle Image Velocimetry (micro-PIV), предложенный J. Santiago et. al [45], 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 последующей их обработке для расчета смещения частиц, что позволяет построить векторное поле скорости в потоке по смещению частиц.

Данная техника измерения полей скорости является расширением стандартного метода PIV (Particle Image Velocimetry) для измерения полей скорости на макромасштабах, предложенного во второй половине XX века. В методе PIV регистрируются два изображения трассерных частиц через определенное время Δt . Далее каждое изображение разбивается на расчетные

области и проводится кросс-корреляционный анализ для расчета смещения трассеров в данной области потока Δx . Локальный вектор скорости потока, \mathbf{u} , рассчитывается затем как:

$$\mathbf{u} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.12)$$

Однако в методе микро-PIV есть свои особенности. Рассмотрим типичную микро-PIV-систему (см. Рис. 10), которая состоит из микроскопа, CCD камеры и импульсного лазера. Исследуемым объектом является течение в оптически прозрачном канале субмиллиметрового гидравлического диаметра. Импульсный лазер состоит из двух Nd:YAG лазеров, лучи которых находятся на одной оптической оси, что позволяет получать время между вспышками лазера от 100 нс до нескольких секунд. Лазер освещает микроканальное устройство, проходя через оптический тракт микроскопа, предназначенного для работы в режиме обратного рассеяния (освещение через объектив). Микроканальное устройство должно иметь как минимум одну оптически прозрачную поверхность для возможности освещения потока и регистрации трассеров. Флуоресцентные трассеры в потоке дважды освещаются светом с длиной волны 532 нм (зеленый) и переизлучают свет на другой длине волны из красно-оранжевого диапазона. Переизлученный свет (красный) отделяется от рассеянного (зеленого) на светоделительном кубе, состоящем из оптических фильтров и дихроичного зеркала, и затем регистрируется на цифровую камеру. Время флуоресценции красителя составляет несколько наносекунд, поэтому изображения частиц считаются мгновенными.

Зная время между вспышками лазера Δt , и рассчитав смещение частиц по трассерным картинкам, можно определить скорость в сечении потока. Измерительной плоскостью является объем потока, в котором частицы находятся в зоне резкости объектива. Как правило, толщина такого сечения составляет десятки микрометров. При этом пространственное разрешение векторного поля может достигать одного вектора на единицы микрометров.

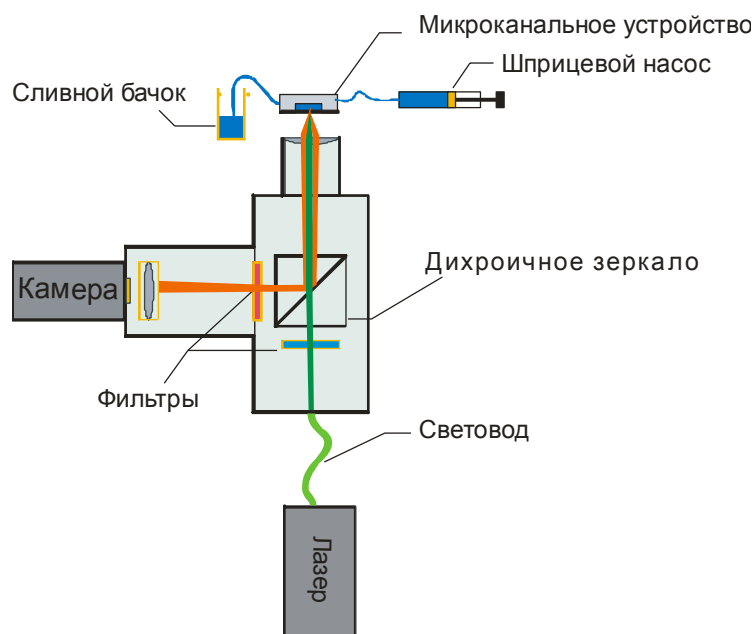


Рис. 10. Схема экспериментальной micro-PIV установки.

Объемное освещение и глубина корреляции

Одной из главных особенностей 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 [46].

Точное определение глубины корреляции для micro-PIV метода имеет большое значение для правильной интерпретации экспериментальных данных. Вследствие различных подходов, формула для глубины корреляции часто представлена в различных работах в немного разных формулировках, в

зависимости от того, какой подход применил автор. Учитывая дифракцию Фраунгофера на объективе, и аппроксимируя образ изображения частицы гауссовым распределением, М. Olsen и R. Adrian [47] впервые получили аналитическое выражение для глубины корреляции $2z_{corr}$:

$$2z_{corr} = 2 * \left[\frac{(1 - \sqrt{\varepsilon})}{\sqrt{\varepsilon}} \left(f^{\#2} d_p^2 + \frac{5,95(M + 1)^2 \lambda^2 f^{\#4}}{M^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.13)$$

где $f^{\#}$ – фокальное число объектива микроскопа, d_p – диаметр трассерных частиц, λ – длина волны света, излученного флуоресцентными частицами, M – увеличение объектива микроскопа, ε – пороговое значение, отношение весовой функции частицы, не вносящей вклад в корреляционную функцию к весовой функции частицы, находящейся в фокальной плоскости объектива, обычно равно 0,01. При выводе глубины корреляции образ изображения частицы представлялся в виде пятна с гауссовым распределением интенсивности. В параксиальном приближении фокальное число объектива микроскопа может быть выражено как $f^{\#} = \frac{1}{2NA}$, где NA – числовая апертура объектива. В работе [48] на основе синтетических и экспериментальных данных была проведена верификация формулы для глубины корреляции (1.13), при этом отклонение результатов численного и натурального эксперимента от аналитического выражения не превысила 1%.

На Рис. 11 показаны зависимости глубины корреляции, рассчитанные по формуле (1.13) от числовой апертуры и увеличения объектива микроскопа, а также от размера трассерных частиц. Видно, что увеличение микроскопа практически не влияет на глубину корреляции, тогда как основной вклад дает числовая апертура объектива, при этом значительный рост глубины корреляции наблюдается при $NA < 0.25$. Размер частиц слабо влияет на глубину корреляции при диаметре частиц меньше 2 мкм.

В ряде экспериментов при измерении полей скорости с помощью метода *micro-PIV* используются иммерсионные объективы. Для того чтобы учесть влияние иммерсионной среды на глубину корреляции, в работе C. Bourdon et al.

[49] было предложено заменить диафрагменное число объектива $f^\# = \frac{1}{2NA}$, используемое в формуле (1.13), на $\frac{n_0}{2NA}$ (здесь n_0 - показатель преломления иммерсионной среды).

С. Meinhart и S. Wereley [50] установили, что зависимость $f^\# = \frac{1}{2NA}$, предложенная в вышеуказанных работах в параксиальном приближении одиночной линзы не может быть применена для объективов с коррекцией на бесконечность, и предложили использовать зависимость $f^{\#\infty} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_0}{NA} \right)^2 - 1 \right]^{1/2}$ для расчета глубины корреляции в таких случаях.

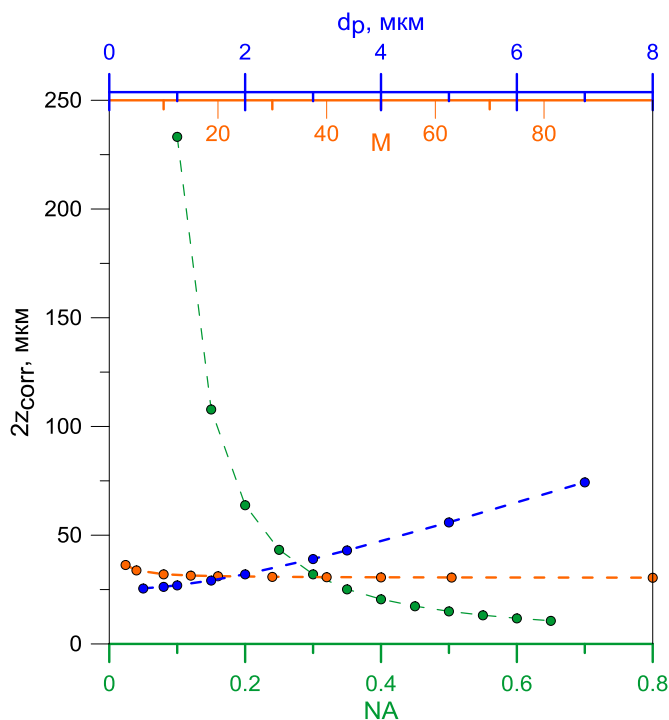


Рис. 11. Зависимость глубины корреляции, рассчитанная по формуле (1.13), от числовой апертуры (NA) при $d_p=2$ мкм и $M=10$, увеличения объектива микроскопа (M) при $NA=0,3$ и $d_p=2$ мкм и размера трассерных частиц (d_p) при $NA=0,3$ и $M=10$.

В работе [46] на основе формулы для глубины резкости объектива микроскопа предложено следующее выражение для глубины корреляции:

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16d_p}{\tan\theta} + d_p \quad (1.14)$$

где θ – апертурный угол объектива. Вывод данной формулы сделан из предположения, что частица не вносит вклад в корреляционную функцию, когда ее интенсивность в центре диска Эйри становится меньше 0,1 от интенсивности частиц, находящихся в фокальной плоскости. Стоит отметить, что разница значений глубины корреляции, рассчитанных по формулам (1.13) и (1.14), в большинстве случаев не превышает 10%.

Трассерные частицы для micro-PIV экспериментов

Фундаментальной проблемой, отличающей micro-PIV от традиционного PIV метода, является размер трассерных частиц. Частицы должны быть достаточно малы, чтобы беспрепятственно следовать за потоком и не загромождать микроканал. В то же время частицы должны быть достаточно большие, чтобы быть видимыми на изображении. Размер используемых трассерных частиц варьируется от 100 нм до 3 мкм. Таким образом, размер трассеров сравним с длиной волны освещающего света, и в то же время трассеры настолько малы, что подвергаются Броуновскому движению. Для того чтобы минимизировать дифракцию на частицах и регистрацию света, отраженного от стенок исследуемого участка, используют флуоресцентные трассеры (обычно частицы изготавливаются из полистирола с флуоресцентным маркером внутри).

Броуновское движение трассеров может вносить ошибку в измеренную скорость потока. Данная ошибка, рассчитанная J. Santiago et al. [1], выражается формулой:

$$\varepsilon_B = \frac{\langle s^2 \rangle^{1/2}}{\Delta x} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (1.15)$$

где $\langle s^2 \rangle^{1/2}$ - случайное среднеквадратичное смещение частицы по направлению оси x , u – локальная скорость потока, Δt – время между вспышками лазера. Коэффициент диффузии частиц D рассчитывается по формуле Эйнштейна:

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \quad (1.16)$$

здесь k_B - постоянная Больцмана, T - температура жидкости, μ – динамическая вязкость рабочей жидкости, d_p - диаметр частицы.

Ошибка, вызванная Броуновским движением, накладывает нижний предел на время между вспышками лазера Δt и диаметр частиц d_p (относительная ошибка увеличивается с уменьшением времени между вспышками лазера и диаметра трассерных частиц). Броуновское движение оказывает сильное влияние на измерения при скоростях потока порядка 10 мкм/с.

Фоновый шум в micro-PIV

В micro-PIV освещается весь исследуемый объем потока, а значит все частицы, вне зависимости от того, находятся они в фокальной плоскости или нет, излучают свет, который записывается на цифровую камеру. Частицы вне глубины корреляции поднимают уровень фонового шума, уменьшая при этом отношение полезного сигнала к шуму в корреляционной функции и увеличивая количество ошибочных векторов.

В работе [47] получено аналитическое выражение для видимости частиц в фокальной плоскости объектива – отношения пиковой яркости частиц в фокусе к интенсивности фонового шума:

$$V = \frac{4M^2\beta^2(s_0 - a)(s_0 - a + L)}{\pi CLS_0^2(M^2d_p^2 + 5,95(M + 1)^2\lambda^2f^{\#2})} \quad (1.17)$$

где C – концентрация засева потока трассерными частицами (количество частиц на мкм^3), s_0 – рабочее расстояние объектива микроскопа, a – расстояние от верхней стенки канала до фокальной плоскости, L – высота микроканала, $\beta^2 = 3,67$ – константа аппроксимации диска Эйри Гауссовым распределением.

Следуя формуле (1.17) существует несколько способов уменьшения фонового шума в micro-PIV при сохранении оптических параметров объектива микроскопа: уменьшение концентрации трассерных частиц, уменьшение высоты микроканала и уменьшение размера трассерных частиц [47]. Однако низкая концентрация трассеров требует увеличения размера расчетных областей, что уменьшает

пространственное разрешение метода, в противном случае уменьшает отношение сигнал/шум, приводя к большому количеству неверных векторов.

Другой техникой уменьшения фонового шума, а также уменьшения глубины корреляции является выборочный засев потока трассерами, предложенный М. Mielnik и L. Saetran [51]. Суть метода заключается в засеве тонкого слоя потока частицами, в то время как в остальной части потока частицы отсутствуют (см. Рис. 12 а). По аналогии с лазерным ножом в PIV эксперименте, засеянная плоскость частиц толщиной δz определяет глубину корреляции и положение измеряемой плоскости. Авторы работы [51] предложили использовать принцип гидродинамического фокусирования (Рис. 12 б) для создания тонкого слоя, содержащего трассерные частицы. Глубина корреляции в теории может достигать размера диаметра частиц. Однако на практике такая система трудно реализуется и накладывает ограничения на измеряемый поток. В частности, исследуемый режим течения должен быть строго ламинарным.

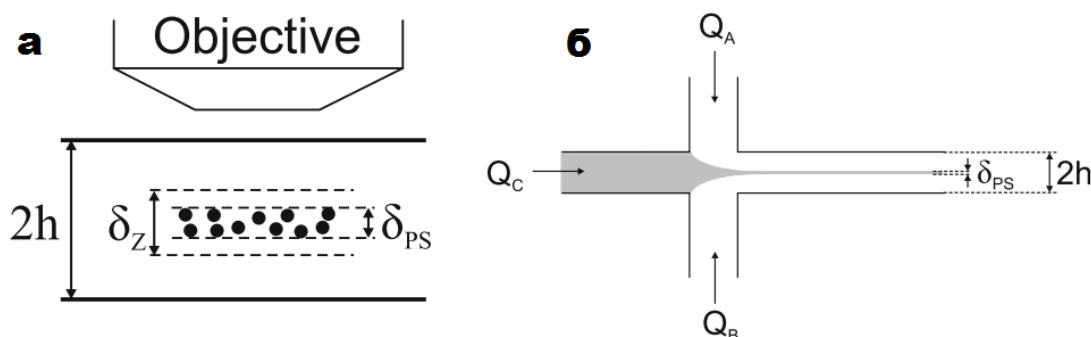


Рис. 12. Схема выборочного засева потока (а) и принцип гидродинамического фокусирования (б) [51].

Также существуют способы уменьшения фонового шума и глубины корреляции в micro-PIV посредством обработки трассерных изображений. Они будут описаны в следующем параграфе.

Обработка изображений в micro-PIV экспериментах

В ряде случаев для того чтобы избежать вклада броуновского движения частиц в результирующее поле скорости, а также при низкой концентрации

трассеров (низком отношении сигнал/шум) рассчитывают усредненные по ансамблю изображений поля скоростей.

Расчет усредненных полей скорости описан в [52]. Авторы данной статьи приводят три метода расчета средних полей скорости: метод усреднения векторов скорости, метод усреднения трассерных изображений и метод усреднения корреляционных функций. Расчет поля скорости методом PIV включает в себя три главных шага: получение изображения частиц, корреляция изображений частиц и определение пика корреляционной функции.

Для того чтобы усреднить поле скорости, необходимо применить линейный оператор усреднения после одного из трех шагов. Корреляция изображений и определение пика корреляционной функции – нелинейные операции, поэтому применение оператора усреднения после данных шагов может сильно изменить результирующее усредненное поле скорости. При расчете среднего поля методом усреднения векторов скорости мгновенные поля скорости должны быть достаточно точными. При малой плотности засева потока мгновенные поля скорости содержат большое количество неверных векторов, которые вносят ошибку в среднее поле скорости, поэтому использовать алгоритм усреднения векторов для расчета среднего поля нецелесообразно.

При расчете среднего поля скорости алгоритмом усреднения изображений усредняются N пар изображений. Таким образом, корреляционная функция для расчета среднего поля скорости вычисляется по формуле [52]:

$$R(\mathbf{S}) = \frac{1}{N^2} \iint \sum_{i=1}^N A_i(\mathbf{X}) * \sum_{j=1}^N B_j(\mathbf{X} + \mathbf{S}) d^2 \mathbf{X} \quad (1.18)$$

где A_i – интенсивность первого изображения i -ой пары, B_j – интенсивность второго изображения j -ой пары. В данном выражении только N диагональных членов вида $A_i B_i$ дают вклад в результирующий сигнал, остальные $N(N - 1)$ членов представляют собой случайную корреляцию частиц на изображениях из разных пар. При увеличении числа N количество данных членов растет как N^2 , в то время как количество членов, дающих вклад в сигнал, растет как N . Таким

образом, при достижении числа N определенного значения, отношение сигнала к шуму будет падать, а результирующее среднее поле скорости будет становиться менее точным.

При расчете среднего поля алгоритмом с усреднением корреляционных функций результирующая корреляционная функция выглядит следующим образом [52]:

$$R(\mathbf{S}) = \frac{1}{N^2} \iint \sum_{i=1}^N A_i(\mathbf{X}) * B_i(\mathbf{X} + \mathbf{S}) d^2\mathbf{X} \quad (1.19)$$

отсюда видно, что при усреднении корреляционных функций вклад дают только диагональные члены, то есть отношение сигнала к шуму намного выше, чем в предыдущих двух методах расчета средней скорости, при этом нет ограничения на максимальное количество пар изображений, взятых для расчета среднего поля скорости. Также в работе [52] проведено экспериментальное подтверждение данного факта. На Рис. 13 изображена сравнительная характеристика доли верных векторов полей средней скорости, рассчитанных тремя алгоритмами в зависимости от количества пар изображений, взятых для усреднения.

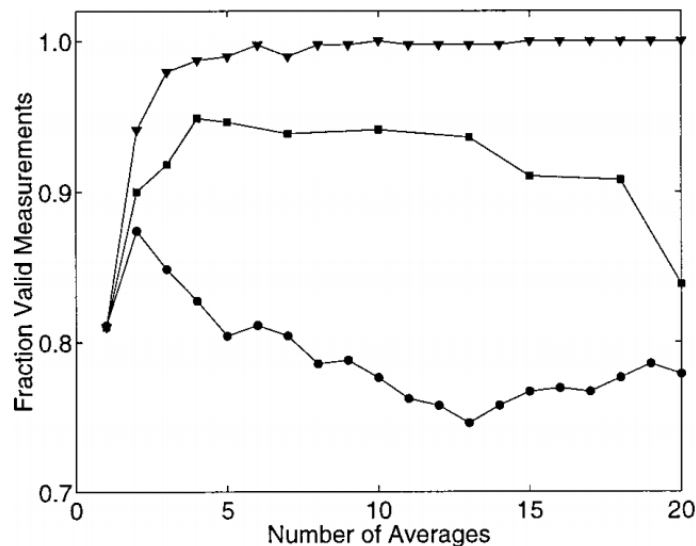


Рис. 13. Сравнение точности алгоритмов расчета средней скорости в зависимости от количества пар трассерных изображений: • - усреднение векторов скорости, ■ - усреднение изображений, ▼ - усреднение корреляционных функций [52].

Алгоритм усреднения корреляционной функции может быть применен в ситуациях, когда интенсивность сигнала недостаточна для стандартной кросскорреляционной техники, например, малое количество образов частиц в расчетной области или низкое качество изображений.

Еще одним методом для расчета среднего поля скорости является метод двухточечной корреляции (“Single pixel resolution ensemble correlation”), предложенный J. Westerweel et al. [53] для расчета средних полей скорости. Данный метод является расширением метода усреднения корреляционной функции, при этом рассчитывается попиксельная, а не оконная корреляция, таким образом, значительно повышается пространственное разрешение, что важно для высокоградиентных потоков. В дальнейшем S. Scharnowski et al. [54] предложили способ расчета напряжений Рейнольдса из формы корреляционного пика, рассчитанного с помощью данного алгоритма.

Одним из способов повышения точности micro-PIV измерений является уменьшение вклада фонового шума в измерения. L. Gui et al. [55] предложили использовать технику полосовой фильтрации для уменьшения случайного шума и низкочастотного фонового шума. Данная техника устраняет фоновый шум, созданный частицами вне фокуса, и основана на разнице между пространственными частотами частиц в фокусе и вне фокуса. Регулируя размер фильтра, полосовая фильтрация может устранить как случайный шум, так и шум от частиц вне фокуса.

Чтобы контролировать глубину корреляции в micro-PIV, L. Bitsch et al. [56] предложили использовать пороговую фильтрацию интенсивности серого для изображений трассерных картин. Данная техника основывается на том, что интенсивность частиц в фокусе на изображении выше, чем интенсивность частиц вне фокуса. Таким образом, подходящий пороговый фильтр может устранить шумовой сигнал от частиц вне фокуса. В работе [57] было предложено использовать гамма-коррекцию (степенной фильтр) для исходных micro-PIV изображений. Применение данного фильтра с коэффициентами при степени 0,63 и

2,0 позволило соответственно увеличить и уменьшить глубину корреляции в два раза.

Другим способом уменьшения шума от частиц вне фокуса является методика перекрытия изображений. Впервые эта методика была предложена S. Wereley et al. [58] для увеличения концентрации трассеров в стационарных потоках. В дальнейшем методика была проанализирована С. Nguyen et al. [59], и было показано, что она также может быть применена для уменьшения шума от частиц вне фокуса. Суть методики заключается в попиксельном поиске максимальной интенсивности на наборе изображений. Результирующим является изображение, у которого интенсивность серого в каждом пикселе равна [59]:

$$I_{\max}(i, j) = \max (I_k(i, j), k = 1, 2, 3, \dots, N_{pairs}) \quad (1.20)$$

где $I_k(i, j)$ – интенсивность пикселя (i, j) на k -м изображении, N_{pairs} - количество пар изображений, взятых для алгоритма перекрытия изображений. Так как интенсивность частиц изменяется с изменением расстояния от фокальной плоскости, частицы, находящиеся ближе к фокальной плоскости микроскопа, имеют более высокую интенсивность на изображении, в то время как частицы вне фокуса имеют низкую интенсивность на изображении. Поиск максимумов интенсивности по всем изображениям приводит к тому, что на результирующем изображении остаются только частицы в фокусе. Главным ограничением методики перекрытия изображений является невозможность исследования нестационарных потоков.

При исследовании нестационарных потоков в микроканалах требуется измерение мгновенных полей скорости. В данном случае требуется создание высокой плотности засева потока трассерными частицами. Обработка изображений происходит также, как и в стандартном PIV-методе – с помощью итерационного кросс-корреляционного алгоритма [60].

Погрешности метода micro-PIV

Полная погрешность измерения поля скорости с помощью метода micro-PIV равна квадратичной сумме случайной и систематическую ошибки.

Систематическая ошибка, как и стандартном PIV методе, представляет собой ошибку определения пика корреляционной функции, и может составлять от 0,01 до 0,1 пикселя, в зависимости от алгоритма подпиксельной интерполяции корреляционного максимума [60]. Эффективный размер трассерных частиц на изображении также влияет на точность определения положения пика корреляционной функции. На Рис. 14 показана зависимость ошибки определения пика корреляционной функции от размера трассерных частиц на изображении [61]. Увеличение размера расчетной ячейки уменьшает погрешность метода при постоянной концентрации частиц, таким образом существует обратная связь между пространственным разрешением метода и его точностью. Из графика видно, что оптимальный размер изображения трассерной частицы составляет 2-3 пикселя. Эффективный диаметр трассерных частиц на изображении в micro-PIV экспериментах определяется параметрами оптики объектива. Так, для объектива $NA = 0.25/M = 10$ эффективный размер частиц диаметром 3 мкм, рассчитанный по формуле:

$$d_e = [d_s^2 + M^2 d_p^2]^{1/2} \quad [62] \quad (1.21)$$

составляет 4,2 мкм. При использовании ПЗС матрицы с размером пикселя 7 мкм диаметр частицы составит 6 пикселей.

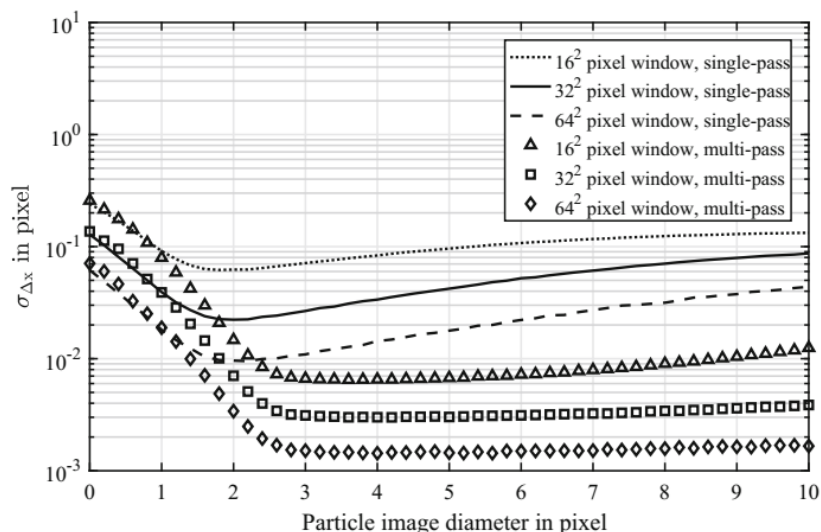


Рис. 14. Случайная ошибка PIV-измерений в зависимости от размера образа частиц в пикселях, представленная в [61]. Расчет произведен для различных размеров расчетных ячеек, используя однопроходную и многопроходную Гауссову интерполяцию.

Также уровень погрешности метода определяется качеством входных данных, а именно: качество системы регистрации изображений и освещения области измерения: качество оптики микроскопа (числовая апертура объектива, коэффициент увеличения), шум цифровой камеры, неравномерное распределение интенсивности освещения на изображении; помехи, создаваемые частицами вне глубины поля; качество засева измерительного объема частицами и характеристики потока (неоднородная и недостаточная концентрация частиц на изображениях).

В micro-PIV экспериментах с малыми скоростями потока Броуновское движение оказывает влияние на движение трассеров. Случайное отклонение трассерной частицы приводит к появлению случайной ошибки в измеренной скорости. Данная случайная ошибка уменьшается с увеличением количества частиц в расчетной области [63]. Полагая, что относительная случайная ошибка в измерениях, связанная с броуновским движением одной частицы, может быть рассчитана по формуле (1.15), М. Olsen et al. [63] предложили выражение для результирующей случайной ошибки ε_N от N частиц в расчетной области:

$$\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{N}} \quad (1.22)$$

Еще одним источником ошибки при малых скоростях потока может быть седиментация трассерных частиц. При разности плотностей рабочей жидкости и материала трассеров скорость осаждения (всплытия) рассчитывается из закона Стокса:

$$U = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g \quad (1.23)$$

Так как в micro-PIV экспериментах регистрируется ансамбль изображений, при высоких скоростях осаждения частицы могут выйти из фокальной плоскости объектива за время проведения измерений.

В работе [64] проведен эксперимент по измерению поля скорости в прямоугольном микроканале 30x300 мкм. На Рис. 15 показаны профили средней скорости в центральном сечении канала, полученные с помощью метода micro-PIV и аналитического решения. Отклонение аналитического и измеренного профилей скорости не превысило 2%.

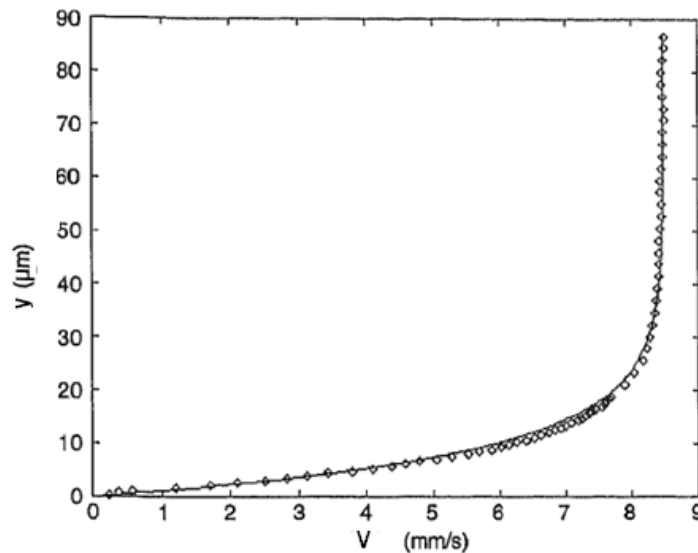


Рис. 15. Усредненный профиль скорости в микроканале [64]. Маркерами обозначены экспериментальные данные, полученные С. Meinhart et al. [64], сплошная линия – аналитическое решение в прямоугольном канале.

1.3.2 Метод лазерной индуцированной флуоресценции для измерения полей концентраций в микроканалах (micro-LIF)

Принцип метода micro-LIF

Метод лазерной индуцированной флуоресценции (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 на макромасштабах в исследуемый поток добавляют флуорофор, выбранное сечение освещают лазерным ножом, эмитированный красителем свет регистрируют цифровой камерой со светофильтром. Метод LIF успешно применяется совместно с методом PIV при исследовании турбулентных течений [65–67].

В работе D. Walker [68] показано, что интенсивность флуоресценции, регистрируемая в точке b , находящейся на пути возбуждающего света, может быть выражена следующим образом:

$$I_f(b) = I_0 A \varphi \varepsilon L C(b) \quad [68] \quad (1.24)$$

где I_0 - интенсивность возбуждающего света, A - доля света, регистрируемая на камеру, определяется числовой апертурой объектива, φ - квантовый выход, ε - молярный коэффициент поглощения флуоресцентного красителя, L - длина пути в рабочем объеме, пройденного возбуждающим светом, $C(b)$ - концентрация красителя. При выводе данной формулы пренебрегали поглощением возбуждающего света, т.е. должно было выполняться условие $\varepsilon b C_{av} \ll 1$, где C_{av} - средняя концентрация красителя вдоль пути возбуждающего света до точки b . Таким образом, максимальная концентрация, которая может быть использована в измерениях, определяется размерами рабочего участка.

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 пропорциональна 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.

На Рис. 16 показана оптическая схема micro-LIF, представленная в работе R. Matsumoto et al. [69]. Возбуждающий лазерный свет (обозначен зеленым цветом) проходит через объектив микроскопа вдоль оси z , при этом интенсивность возбуждающего света падает по мере прохождения вдоль глубины канала. Падение интенсивности возбуждающего света I_e связано с абсорбцией флуорофором, и описывается законом Ламберт-Бера:

$$dI_e = -I_e C \varepsilon dz \quad [69] \quad (1.25)$$

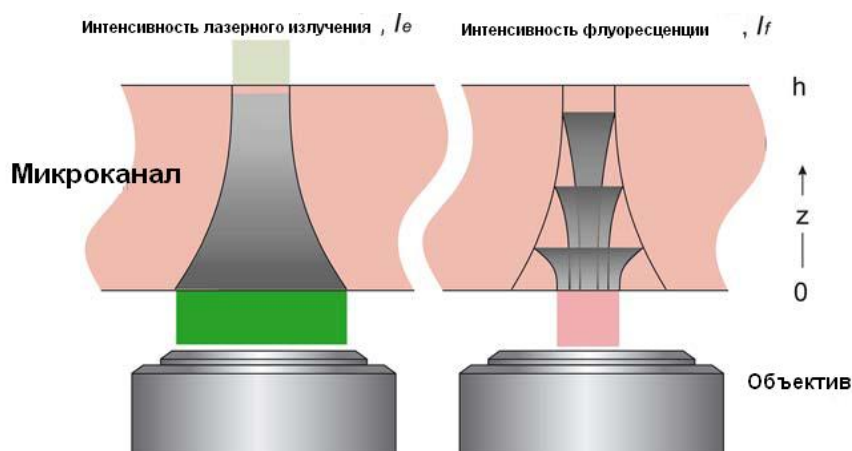


Рис. 16. Принцип метода micro-LIF [69].

Если концентрация флуоресцентного красителя C постоянна по глубине канала, тогда выражение для интенсивности возбуждающего света:

$$I_e(z) = I_0 \exp(-\varepsilon C z) \quad [69] \quad (1.26)$$

Флуоресцентный свет I_f также поглощается вдоль глубины канала:

$$dI_f = I_f C \varepsilon_f dz \quad [69] \quad (1.27)$$

здесь ε_f – молярный коэффициент поглощения флуоресцентного света.

Из выражений (1.25) – (1.27) следует, что интенсивность флуоресцентного света, приходящего в точку $z = 0$ равна:

$$I_{f_0} = I_0 \varphi \varepsilon C \exp(-[\varepsilon + \varepsilon_f] Cz) \quad [69] \quad (1.28)$$

Так как в точку $z = 0$ флуоресцентный свет приходит со всей глубины канала h , суммарная интенсивность флуоресцентного света I_{total} в точке $z = 0$ равна:

$$I_{total} = \int_0^h I_{f_0} dz = I_0 \varphi \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \varepsilon_f} [1 - \exp(-hC(\varepsilon + \varepsilon_f))] \quad [69] \quad (1.29)$$

Поскольку в экспериментах не удается точно восстановить значения величин, необходимых для расчета интенсивности по представленной зависимости (1.29), то, 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.

Из (1.29) очевидно, что если концентрация флуоресцентного красителя вдоль глубины канала неоднородна, восстановление флуктуации концентрации методом *micro-LIF* не является возможным. Для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных требуется четкое понимание схемы осреднения метода *micro-LIF* по глубине канала.

Необходимо понимать, что слоистое течение поперек глубины микроканала при измерении методом *micro-LIF* будет определено как полностью перемешанное. Для решения данной проблемы в работе М. Munson и Р. Yager [70] был предложен следующий метод для определения перемешивания в микроканалах. В поток добавлялся флуоресцентный краситель, интенсивность

флуоресценции которого чувствительна к уровню рН. При определенном уровне рН краситель переходил из моноионной формы в двухионную, при которой интенсивность флуоресценции значительно выше. В один из входных каналов микромиксера подавался краситель с низким рН, при котором большая часть молекул находится в моноионной форме, в другой канал подавался краситель с высоким рН, при котором 99,7% молекул находятся в двухионной форме. При перемешивании растворов в микромиксере уровень рН становится таковым, что 97,8% всех молекул находилась в двухионной форме, и уровень флуоресценции поднимался в два раза. Используя данное свойство, авторы работы определяли эффективность перемешивания микромиксера.

В работе [71] использовался нефлуоресцентный комплекс, который при перемешивании с другим комплексом становился флуоресцентным. Данный факт позволил авторам работы визуализировать только область перемешивания жидкостей.

Альтернативой методу micro-LIF с использованием оптического эпифлуоресцентного микроскопа является использование конфигурации с конфокальным лазерным сканирующим микроскопом. Глубина резкости в такой конфигурации составляет несколько сотен нанометров, что позволяет измерять поле концентрации в очень тонком слое, а также сканировать поток по глубине канала и восстанавливать поле концентрации в объеме [12]. Недостатком конфокального микроскопа является невозможность регистрации мгновенных изображений и очень высокая стоимость.

Погрешности метода

Обработка данных в micro-LIF измерениях основана на предположениях постоянного распределения возбуждающего света в плоскости (x,y) и неизменных характеристик оптического тракта на пути переизлученного света и регистрирующей аппаратуры. Рассмотрим факторы, влияющие на погрешность измерений.

Существенный вклад в погрешность измерений вносит нестабильность энергии импульса лазера. Для импульсного Nd:YAG лазера различия в энергии импульсов может достигать 5%. Кроме того, часто модовый состав луча лазера не является постоянным, что приводит к характерным полосам на изображении, меняющим свое положение от импульса к импульсу. Таким образом, интенсивность освещающего света не является постоянной и равна $I_0(x, y)$.

Шум чтения камеры также влияет на точность измерений. Рекомендуется использовать камеры с высокой чувствительностью и малым уровнем шума, а также подбирать параметры эксперимента таким образом, чтобы заполнить по возможности больший диапазон яркостей точек на изображении.

Таким образом, при использовании экспериментальной калибровки ошибка измерения microLIF метода складывается из ошибки, связанной с шумом камеры и нестабильностью возбуждающего излучения. Вклад шума камеры можно оценить по паспортным данным камеры с учетом «наклона» калибровочной зависимости $C(I_{total}, x, y)$. Вклад в погрешность за счет нестабильности возбуждающего излучения можно оценить как по паспортным данным источника излучения (лазера, ртутной лампы), так и в результате несложного анализа изображений, полученных при фиксированной и равномерной в объеме концентрации красителя.

Оценка эффективности перемешивания по micro-LIF данным

В ряде случаев измерения полей концентрации в микромиксерах и мирореакторах проводятся с целью оценки эффективности перемешивания данных устройств. Таким образом, необходимы алгоритмы для расчета эффективности перемешивания по полям концентраций, полученных с помощью метода micro-LIF . Вещество называется перемешанным, если в каждой его точке свойство данного вещества (температура, концентрация и т.д.) имеет одно и то же значение.

Р. Danckwerts в 1952 году на основе подходов статистической физики предложил для оценки перемешивания использовать интенсивность сегрегации, определяемую как:

$$I = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \quad [7] \quad (1.30)$$

где $\sigma^2 = \frac{1}{|V|} \int_V (C - \bar{C})^2 dV$ – среднеквадратичное отклонение концентрации вещества от среднего значения концентрации \bar{C} в объеме, $\sigma_0^2 = \bar{C}(C_{max} - \bar{C})$ – максимально возможное среднеквадратичное отклонение для смешения жидкостей с концентрациями 0 и C_{max} .

В работе [72] на основе подхода Р. Dankwerts для оценки эффективности перемешивания по результатам численного моделирования использовали формулу:

$$I_M = 1 - \sqrt{I} \quad [72] \quad (1.31)$$

Так, если I_M равно 1, то жидкость полностью перемешанная, если I_M равно 0, жидкость является полностью сегрегированной.

Для расчета эффективности перемешивания по экспериментальным данным (измеренным полям концентраций) также используется выражение для интенсивности сегрегации. В работе М. Hoffmann et al. [73] при конфокальном измерении полей концентрации в нескольких плоскостях потока по глубине канала были восстановлены поля концентрации в поперечном сечении потока (см. Рис. 17). Далее, применяя формулу (1.31), была рассчитана эффективность перемешивания в данном сечении.

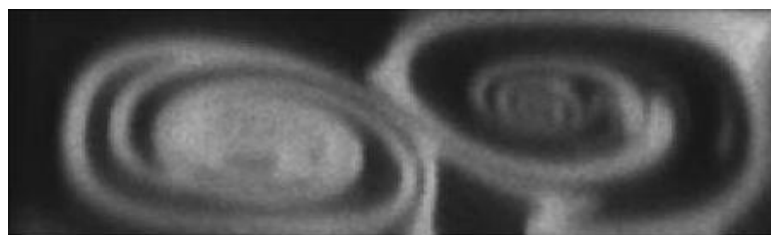


Рис. 17. Восстановленное поле концентрации в поперечном сечении Т-канала из работы [73].

При расчете эффективности перемешивания необходимо рассчитывать среднеквадратичное отклонение концентрации вещества от ее среднего значения. Данный вопрос был внимательно рассмотрен в работе К. Sommer [74]. Пусть распределение концентрации в пространстве определяется функцией $\zeta(r)$. Среднее значение функции распределения $\zeta(r)$:

$$E(\zeta) = \frac{1}{R} \int_0^R \zeta(r) dr \quad [74] \quad (1.32)$$

Авторы работы [74] вводят теоретическую дисперсию функции распределения $\zeta(r)$ с бесконечно малым разбиением объема вещества:

$$\sigma^2 = \frac{1}{R} \int_0^R (E(\zeta) - \zeta(r))^2 dr \quad [74] \quad (1.33)$$

Бесконечно малое разбиение объема вещества здесь означает, что свойство вещества известно в каждой точке объема. Теоретическая дисперсия дает одинаковые результаты для различных функций распределений с разными частотами. Так, например, для синусоидальных распределений концентраций с различными периодами и амплитудой Δp (Рис. 18) теоретическая дисперсия, рассчитанная по формуле (1.33), равна $\sigma^2 = \frac{\Delta p^2}{2}$, что является нелогичным, потому что очевидно, что распределение с большей частотой синусоиды представляет лучшее перемешивание. Данный факт связан с выбором бесконечно малого разбиения объема вещества.

На практике измерение свойства вещества в бесконечно малом объеме невозможно. Таким образом, весь объем потока разделен на N измеряемых объемов конечного размера и дисперсия функции распределения имеет вид:

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{N} \sum_i (E(\zeta) - \zeta_i) \quad [74] \quad (1.34)$$

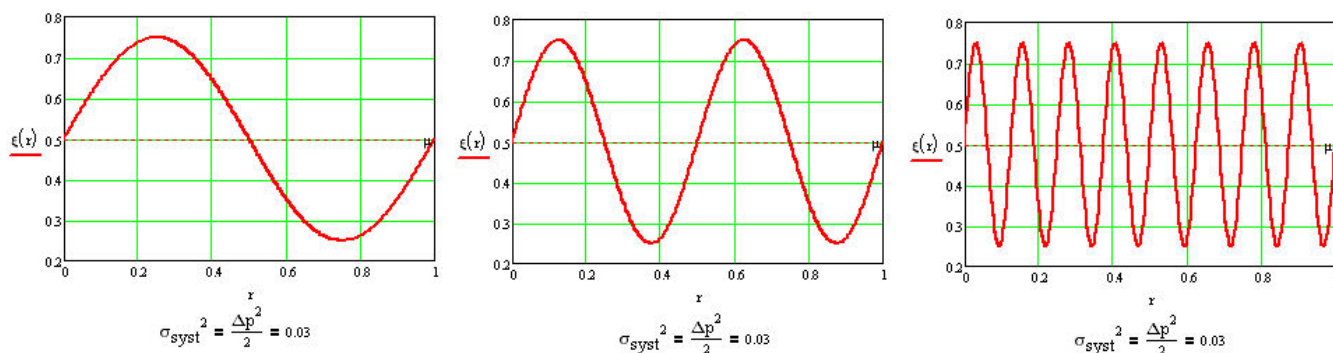


Рис. 18. Примеры синусоидальной распределений концентрации с различными периодами [74].

Значение дисперсии для конечного числа разбиений объема вещества зависит от числа N , а именно от отношения размера элементарного объема разбиения к периоду функции распределения. На Рис. 19 представлена зависимость отношения дисперсий $\frac{\sigma_N^2}{\sigma}$ от размера элементарного объема разбиения, выраженного в периодах синусоидальной функции распределения. На графике видно, что при отношении размера элементарного объема разбиения к периоду функции распределения $1/10$ отношение дисперсий близко к единице. При увеличении элементарного объема разбиения дисперсия σ_N^2 уменьшается, и «смешанность» улучшается. Информация о распределении свойства вещества внутри элементарного объема разбиения теряется, и вещество становится полностью перемешанным, когда размер объема разбиения равен периоду флуктуации функции распределения (Рис. 20).

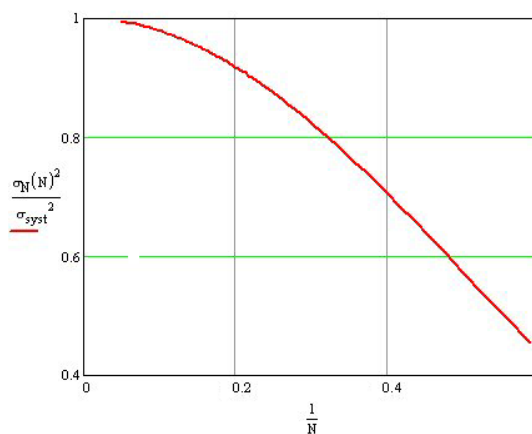


Рис. 19. Зависимость отношения от размера элементарного объема разбиения [74].

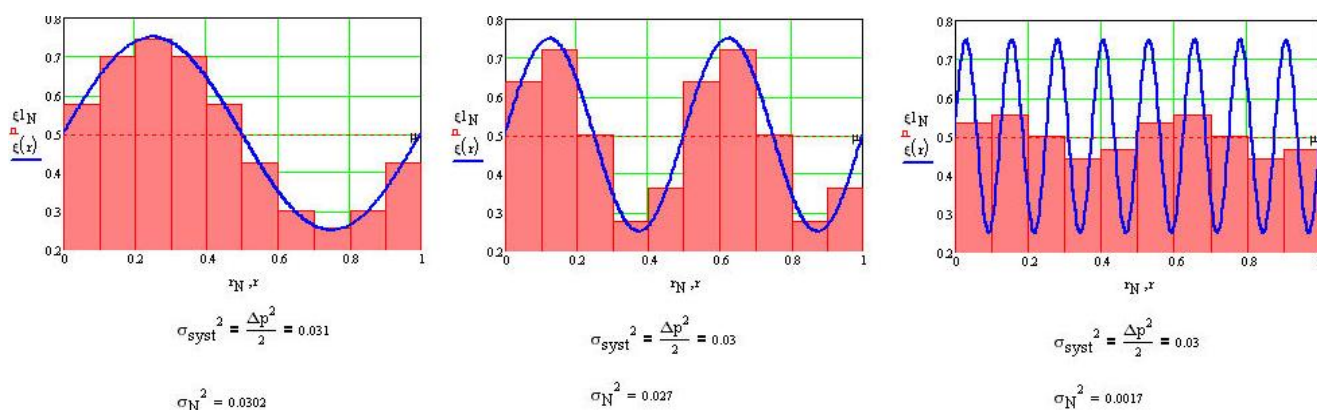


Рис. 20. Сравнение расчета дисперсий для синусоидальных распределений концентрации [74].

Размер элементарного объема разбиения для расчета степени смешанности вещества должен быть выбран таким образом, чтобы неоднородность распределения внутри элементарного объема не влияла значительно на результат расчетов. Чаще всего метод измерения концентрации вещества определяет размер элементарного объема разбиения. Очевидно, что сравнение эффективности перемешивания различных устройств может проводиться только при одинаковом размере элементарного объема разбиения.

1.4 Выводы по главе 1

Анализ литературы по теме исследования позволил сделать следующие выводы:

- Микроканальные устройства представляют большой интерес в качестве микромиксеров и микрореакторов в качестве альтернативы стандартным химическим реакторам с макросмесителями. При этом микроканалы Т-типа являются наиболее простой в изготовлении и эксплуатации формой каналов.

- Ряд работ по численному моделированию течения в микромиксерах Т-типа показал возникновение нескольких режимов течения, в том числе несимметричного режима с возникновением S-образной структуры, при этом эффективность перемешивания возрастает в десятки раз. Для валидации данных численного моделирования требуются комплексные экспериментальные данные по полям скорости и концентрации в Т-образных микроканалах.

– Течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах характеризуются большим диапазоном реализующихся режимов течения. Разработка и оптимизация микроканальных устройств с течением несмешивающихся жидкостей требует комплексных данных о режимах течения в микроканальных устройствах в зависимости от физических свойств жидкостей и параметров потока. Большинство исследовательских работ направлено на изучение течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах, когда одна из фаз не смачивает стенки канала. Работ по исследованию течений жидкостей, смачивающих стенки микроканала, недостаточно. В литературе отсутствует универсальный критерий, позволяющий построить карту режимов, учитывающую физические свойства несущей и дисперсной фазы.

– Полевые методы *micro-PIV* и *micro-LIF* являются надежным инструментарием для исследования потоков на микромасштабах, позволяют получить информацию о гидродинамике потока и концентрации с разрешением, достаточным для получения экспериментальных данных для верификации численных кодов.

Глава 2. Разработка и развитие оптических методов для измерения полей скорости и концентраций на микромасштабах

2.1 Разработка методики micro-PIV

2.1.1 Аппаратная часть micro-PIV системы

Была создана экспериментальная установка для измерения полей скорости и концентраций в микроканалах. Рассмотрим подробным образом экспериментальную установку для проведения micro-PIV экспериментов. Фотография установки представлена на Рис. 21. Система формирования изображения (под номером 1) состояла из эпифлуоресцентного инвертированного микроскопа (Carl Zeiss AxioObserver.Z1) с набором объективов с увеличением M от 5х до 63х и числовой апертурой NA от 0,12 до 0,75.



Рис. 21. Фотография экспериментальной установки для проведения micro-PIV измерений.

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 до 70 мДж и частотой повторения импульсов 15 Гц, свет от которого заводился в микроскоп через оптическое волокно (под номером 2). Кросскорреляционная

цифровая камера, регистрировала изображения с разрешением 2048x2048 пикселей, которые затем передавались в персональный компьютер для дальнейшей обработки. Синхронизация работы системы осуществлялась при помощи программируемого процессора. Управление экспериментом и обработка данных осуществлялись с использованием пакета программного обеспечения ActualFlow. Данное программное обеспечение предназначено для управления измерительным комплексом на основе цифровой трассерной визуализации и совмещает в себе функции автоматизации процесса проведения эксперимента, обработки и визуализации данных, организации управления и хранения полученных данных на физическом носителе. Модуль управления экспериментом позволяет настраивать и управлять необходимым оборудованием (лазер, камера). Модуль обработки программного пакета ActualFlow позволяет проводить обработку данных алгоритмами, зарегистрированными в программном обеспечении [75].

Таблица 1. Сравнительная таблица глубины корреляции и видимости частиц для различных объективов.

M	NA	d_p , мкм	$2z_{corr}$, мкм	V
5x	0,12	2	178	19
		3,2	189	70
10x	0,25	2	43	75
		3,2	53	208
20x	0,3	2	31	101
		3,2	40	251
40x	0,5	2	15	164
		3,2	21	328
63x	0,75	2	9	201
		3,2	13	361

Управление движением жидкости осуществлялось с помощью двухшприцевого насоса с регулируемым расходом жидкости (номер 5), точность задания расхода составляла $\pm 0,3\%$. Поток жидкости засеивался флуоресцентными трассерами фирмы FluoroMax или DukeScientific. Частицы состояли из полистирола либо меламиновой смолы, маркированных флуоресцентным красителем Родамин Б, при этом плотность частиц составляла 1,05 и 1,5 г/см³,

соответственно. Средний диаметр трассерных частиц равнялся 2 или 3,2 мкм, стандартное отклонение 0,04 мкм. В Таблица 1 представлены значения глубины корреляции и видимости частиц диаметром 2 и 3,2 мкм, рассчитанные по формулам (1.13) и (1.17). При расчете видимости частиц высота микроканала бралась равной 200 мкм, положение плоскости измерения – центральное сечение микроканала, объемная концентрация частиц – 0,1%.

Для регистрации света, излученного частицами, и фильтрации отраженного от канала света использовался светофильтр. Спектральная характеристика данного светофильтра представлена на Рис. 22. Синим цветом показана полоса пропускания возбуждающего света. Красным цветом обозначена полоса пропускания флуоресцентного света. Синими линиями показаны полосы поглощения и излучения флуорофора Родамин Б.

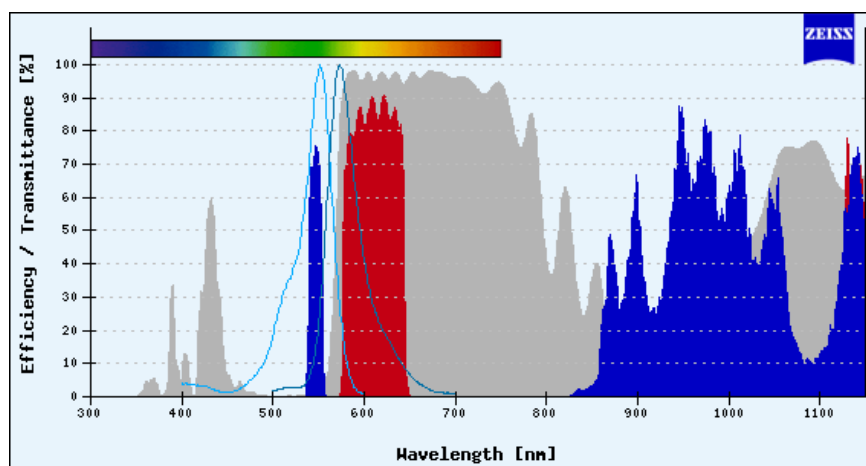


Рис. 22. Полосы пропускания возбуждения и регистрации флуоресценции (синий и красный, соответственно), а также полосы поглощения и излучения флуорофора Родамин Б (синяя линия).

2.1.2 Реализация алгоритмов обработки микро-PIV изображений

Рассмотрим подробно алгоритм расчета средней скорости с усреднением корреляционной функции. На вход алгоритма подается N пар изображений ($N \geq 1$) образов частиц. При этом каждая пара образов получена в два последовательных момента времени с известной задержкой между ними.

Принципиальная схема алгоритма изображена слева на Рис. 23. Необходимо получить поле скорости, соответствующее усредненной скорости потока в измерительной области. Для этого для каждой из пар изображений вся измерительная область разбивается на элементарные ячейки - расчетные области (см. Рис. 23 справа), таким образом, чтобы в каждую расчетную область попало несколько частиц. Смещение частиц между первым и вторым кадром изображения может быть найдено путём вычисления функции пространственной корреляции.

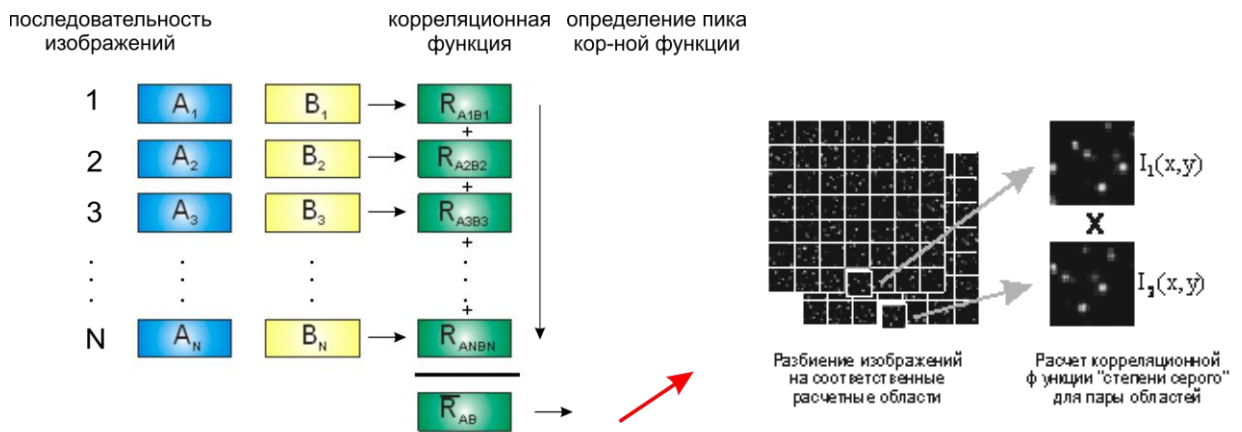


Рис. 23. Слева: диаграмма расчета средней скорости алгоритмом с усреднением корреляционной функции, справа: разбиение изображений на расчетные области.

Пространственная корреляция может быть записана как сумма среднего по ансамблю $\langle C(s,t) \rangle$ и флуктуации $C'(s,t)$ по отношению к среднему: $C(s,t) = \langle C(s,t) \rangle + C'(s,t) = R_D(s,t) + R_C(s,t) + R_F(s,t) + C'(s,t)$, где $R_D(s,t)$ так называемый корреляционный пик смещения, $R_C(s,t)$ постоянный фоновый корреляционный член и $R_F(s,t)$ представляет корреляцию между средней и флуктуационной составляющими интенсивности изображения. Члены $R_C(s,t)$ и $R_F(s,t)$ могут быть устранены путём вычитания средних интенсивностей из интенсивностей областей изображения обоих кадров. Принимая во внимание тот факт, что в численной обработке изображений сигналы являются дискретными, запишем формулу для расчёта корреляционной функции в элементарной области:

$$C(s,t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I'[i,j] - \bar{I}') (I''[i+s,j+t] - \bar{I}'')$$
 . Это выражение представляет собой

свёртку двух функций. Метод вычисления свёртки зависит от конкретной реализации алгоритма обработки. Обычно применяют корреляционную теорему $f * g = \mathfrak{Z}^{-1}[\mathfrak{Z}[f]\mathfrak{Z}[g]^*]$ (где \mathfrak{Z} и \mathfrak{Z}^{-1} - прямое и обратное преобразование Фурье соответственно), либо используют непосредственное вычисление сумм. Иногда применяется и смешанный тип вычислений.

Проведя данный шаг для всех пар поступивших на вход изображений, имеем N корреляционных функций. Следующим шагом алгоритма является нахождение среднего арифметического всех корреляционных функций (Рис. 24).

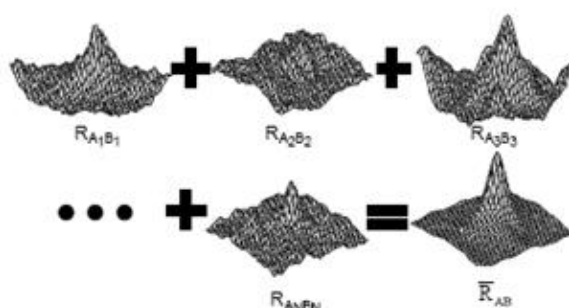


Рис. 24. Усреднение корреляционных функций.

Далее после вычисления средней корреляционной функции производится поиск максимального корреляционного пика, отвечающего наиболее вероятному смещению частиц в области. Поскольку изображение представляется в виде конечного числа элементов, найденное положение максимума будет иметь целочисленные координаты в пикселях. Для того чтобы определить смещение частиц точнее одного пикселя, используют интерполяцию корреляционного максимума кривой (по одной координате) или поверхностью некоторой известной формы, и затем определяют положение максимума численно с подпиксельной точностью.

Зная временную задержку между вспышками лазера Δt и рассчитав наиболее вероятное перемещение частиц D в данной элементарной области, можно посчитать скорость $V = \frac{SD}{\Delta t}$, где S – масштабный коэффициент, Δt – временной интервал между изображениями в паре.

Подобная операция, произведенная для каждой элементарной области, на которые разбито все поле течения, позволяет рассчитать усредненное поле скорости. Обычно используется регулярное разбиение, с определенной степенью перекрытия ячеек.

Алгоритм расчета среднего поля скорости с помощью усреднения корреляционных функций реализован на языке C++ на основе стандартного корреляционного алгоритма, входящего в библиотеку программного обеспечения ActualFlow, в качестве подгружаемой DLL-компоненты для программы ActualFlow.

Разработанная система micro-PIV стала одной из составных компонент измерительного комплекса «ПОЛИС», разработанного в Институте Теплофизики СО РАН (www.polis-instruments.ru).

2.1.3 Результаты тестирования и апробация методики micro-PIV

Тестирование методики micro-PIV

Методика micro-PIV и алгоритм усреднения корреляционной функции были протестированы при измерении поля скорости в прямом микроканале прямоугольного сечения. В рамках тестирования предполагалось получение усредненных полей скорости в канале субмиллиметровых размеров и сравнение ламинарных профилей потока с теоретическим решением. Сечение канала составляло 200x50 мкм, длина канала 4 см. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Поток жидкости засеивался флуоресцентными трассерами $d = 2$ мкм, плотность засева равнялась 0,06%. В работе были произведены измерения поля скорости при нескольких значениях расхода жидкости. Для визуализации потока использовался объектив микроскопа с увеличением 63x и числовой апертурой $NA = 0,75$.

В результате micro-PIV измерений были получены поля скорости в ламинарном режиме течения в прямоугольном канале при числах Рейнольдса,

равных 7,2, 14,5 и 21,7. Числа Рейнольдса для данных режимов рассчитывались по формуле

$$Re = \frac{Q D_h}{S \nu} \quad (2.1)$$

где Q – расход жидкости, S – площадь сечения канала, D_h – гидравлический диаметр канала, ν – кинематическая вязкость жидкости.

Гидравлический диаметр канала рассчитывался по формуле

$$D_h = \frac{4S}{P} \quad (2.2)$$

где P – смачиваемый периметр микроканала, и был равен 80 мкм.

Micro-PIV измерения были сделаны на расстоянии $L = 2$ см от входа в канал, где можно считать, что поток уже установился. Измерения проводились в центральном сечении канала на расстоянии 25 мкм от нижней и верхней стенок. Задержка между вспышками лазера равнялась 13 мкс. Расчет поля скорости проводился с помощью алгоритма с усреднением корреляционных функций по 1000 парам изображений. Размер элементарной области равнялся 64x256 пикселей в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Расчет проводился с 50% перекрытием ячеек.

На графике на Рис. 25 красными метками показан нормированный на максимальную скорость профиль скорости для $Re = 21,7$, построенный в центральном сечении измерительной области. Зелеными метками показаны экспериментальные данные, полученные Н. Li и М. Olsen [76] для прямоугольного канала с соотношением ширины к глубине 4:1. Сплошной линией обозначено аналитическое решение для данного типа канала [77]. Максимальное отклонение экспериментальных данных от аналитического решения составляет 3%.

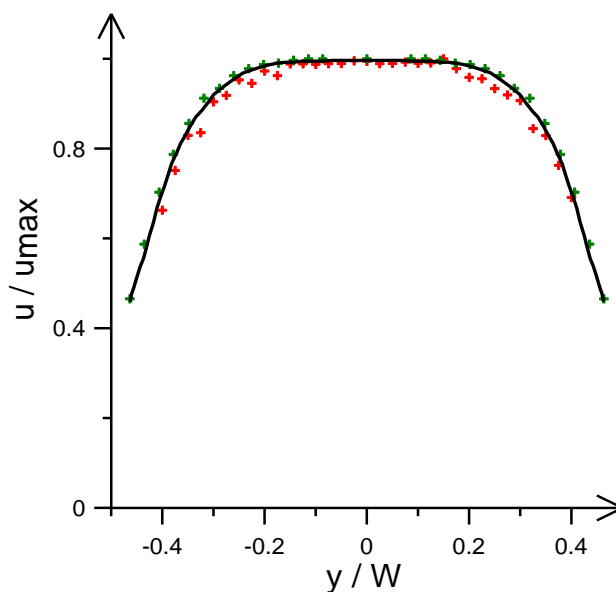


Рис. 25. Измеренный профиль скорости (красным цветом) в центральном сечении микроканала в сравнении с данными Н.Ли [28] (зеленым цветом) и аналитическим решением для данного типа канала – сплошная линия (F. White, [29]).

Применение метода micro-PIV к измерению полей скорости в потоках со свободной поверхностью

Разработанный метод micro-PIV был применен для измерения полей скорости в испаряющихся каплях, «сидящих» на прозрачной подложке. Интерес к исследованию капель связан с их применением в различных научных и технологических процессах, таких как визуализация молекул ДНК, струйные принтеры, спрейное охлаждение и т.д. [78]. Структура течения внутри испаряющейся капли может в значительной степени влиять на процессы тепло- и массообмена, оседание частиц на подложке.

Для исследования структуры потока внутри испаряющейся капли использовалась дистиллированная вода, содержащая флуоресцентные частицы диаметром 3,2 мкм и плотностью 1,05 г/см³. Объемная концентрация частиц в воде равнялась 0,1%. Капля воды с трассерами помещалась на прозрачную подложку с помощью микропипетки (ThermoFisher). Средний объем капли был равен 1 мкл, средний диаметр капли равнялся 2 мм. Эксперименты проводились на двух подложках с различными контактными углами оттекания (RCA) и

гистерезисом контактного угла (CAH): подложка, покрытая монослоем октадецихлорсилана (OTS), и подложка, покрытая слоем фоторезиста SU-8. Свойства поверхностей подложек представлены в Таблица 2.

Таблица 2. Свойства подложек.

Подложка	RCA	CAH
OTS	$95^{\circ} \pm 5^{\circ}$	10-15°
SU-8	$65^{\circ} \pm 5^{\circ}$	30°-35 °

Для визуализации течения в капле использовался объектив 10x/0,25, глубина корреляции составила 55 мкм. Так как визуализация капли велась снизу через ровную поверхность стеклянной подложки, в изображения частиц не вносились искажения, связанные с кривизной капли. Временной интервал между кадрами равнялся 430 мс, частота съемки кадров равнялась 1 Гц. Измерения полей скорости проводились в девяти сечениях капли, параллельных подложке на расстоянии от 13 до 465 мкм. Для каждого измерения было зафиксировано время между началом испарения капли и началом съемки изображений. Изображения снимались вплоть до полного испарения капли.

Обработка данных состояла из следующих этапов. Сначала к изображениям применялся алгоритм маскирования. Таким образом, области вне капли не участвовали в дальнейшей обработке данных. Затем, по каждым 20 изображениям был рассчитан минимум интенсивности, который вычитался из каждого из изображений. Это позволило устранить фоновые шумы и уменьшить влияние частиц, находящихся вне глубины резкости объектива, и, таким образом, увеличить отношение сигнал/шум для расчета полей скорости (см. Рис. 27).

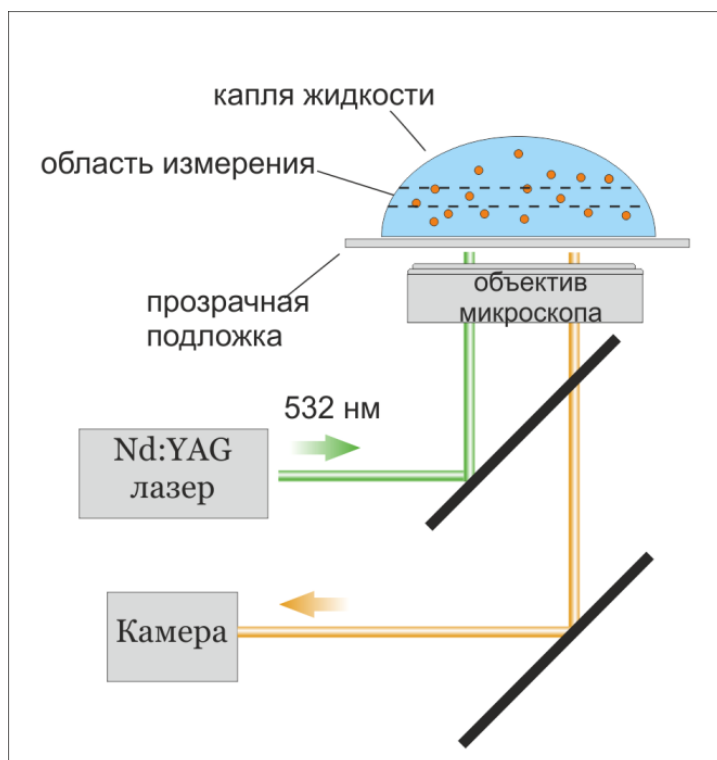


Рис. 26. Схема проведения измерений полей скорости в испаряющейся капле.

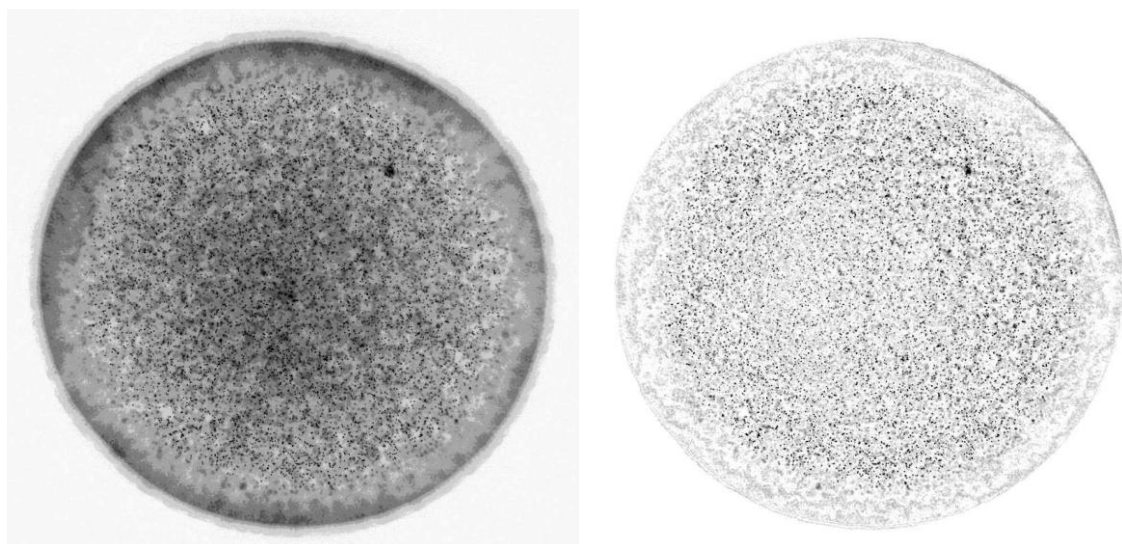


Рис. 27. Слева: исходная фотография изображений частиц в капле на расстоянии 135 мкм от подложки. Справа: изображение, обработанное для расчета поля скорости (градиация серого инвертирована).

Расчет полей скорости проводился с помощью итерационного кросс-корреляционного алгоритма. Размер расчетной ячейки равнялся 128x128

пикселей, с 50% перекрытием и деформацией расчетных областей. При расчете векторов скорости использовался отсев неверных векторов, выбранных по методу медианного среднего. В результате были получены мгновенные поля скорости с разрешением 30 мкм/вектор. На Рис. 28 представлены мгновенные поля скорости на расстоянии 93 мкм от подложки SU-8 в различные интервалы времени с начала испарения капли. Видно, что в начале испарения поле скорости не является радиальным, а представляет собой два симметричных вихря, появление которых, предположительно, связано с депиннигом контактной линии. Максимальная скорость потока вблизи краев капли составила 6 мкм/с. По мере испарения при уменьшении высоты капли поток становится радиально направленным, при этом скорость потока уменьшается значительно до 1,5 мкм/с. Анализ полей скорости в различные интервалы времени показал схожее поведение потока и для подложки OTS (Рис. 29). Результаты проведенных экспериментов опубликованы в [5,25] из списка опубликованных работ.

Ошибка, связанная с Броуновским движением частиц, рассчитанная по формуле (1.22), не превышала 10%.

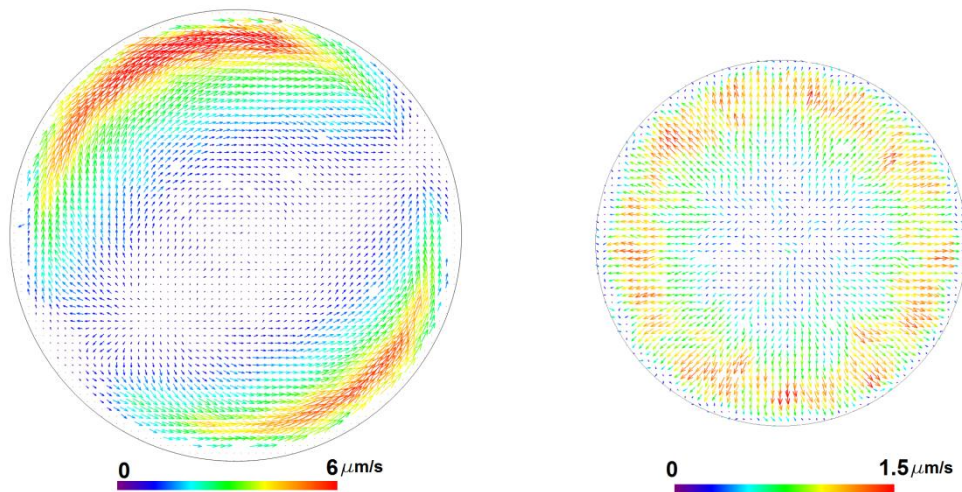


Рис. 28. Мгновенные поля скорости в сечении капли на расстоянии 93 мкм от подложки SU-8. Слева: 78 с после начала испарения. Справа: 220 с после начала испарения. Полное время испарения составило 558 с.

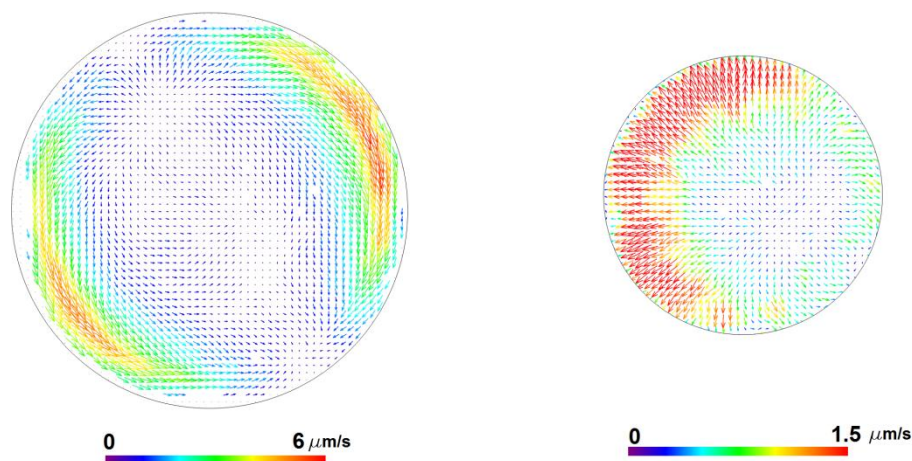


Рис. 29. Мгновенные поля скорости в сечении капли на расстоянии 93 мкм от подложки OTS. Слева: 78 с после начала испарения. Справа: 220 с после начала испарения. Полное время испарения составило 418 с.

Применение метода micro-PIV к измерению полей скорости в пульсирующих потоках

Изучение пульсирующих течений на микромасштабах является актуальной задачей на сегодняшний день в связи с множеством потенциальных приложений данного типа течений в микроканальных устройствах. Численное моделирование, проведенное в работе [79] показало, что сочетание пульсирующего и электроосмотического течения позволяет добиться полного перемешивания жидкостей в микроканалах. В работе M. Steinke и S. Kandlikar [80] было показано, что пульсирующие течения в микроканалах позволяют интенсифицировать теплообмен в однофазном течении. Таким образом, приложения микроканальных устройств, применяющих пульсирующие течения, охватывает различные области от микрореакторов и микромиксеров (в химии и биологии) до микротеплообменников для охлаждения электроники. Еще одно, не менее важное, применение нашли пульсирующие течения в микроканалах в области биомедицины. В последнее время стали разрабатываться микроканальные устройства для проведения доклинических исследований фармацевтических

препаратов, изучения безопасности и эффективности косметических средств, а также для использования в сфере биомедицинских научных исследований. Применение такого рода устройств позволяет создать реалистичные физиологические условия и более точно смоделировать необходимую тестируемую систему *in vivo* [81,82]. В фармацевтической индустрии используют клетки органов человека, находящиеся в суспензии или же культивируемые на коллагеновой подложке. Так, например, для тестирования большинства лекарств могут применяться гепатоциты человека, которые являются наиболее важными показателями интоксикации организма при доклиническом тестировании лекарственных препаратов. Так как для каждого типа клеток существуют комфортные сдвиговые напряжения, при проектировании микроканальных устройств, моделирующих *in vivo* окружающую среду для клеток, необходимо знать важные параметры системы, такие как сдвиговые напряжения и скорости внутри устройства. В то же время, необходимо оптимизировать перемешивание внутри устройства. Для моделирования кровотока в устройстве создается пульсирующее течение.

Разработанная методика *micro-PIV* была применена для исследования пульсирующих течений в микрочипе, моделирующем органы человека, в рамках выполнения НИР по заказу НТЦ «Биокликум». Рабочий участок представлял собой микроканал с ответвлением, выполненный из материала PDMS, схема которого представлена на Рис. 30. Высота канала равнялась 100 мкм, ширина канала 400 мкм. Измерения полей скорости проводились в области «Точка 1». Пульсации потока создавались посредством пульсирующего насоса.

В исследуемый поток (дистиллированная вода) добавлялись флуоресцентные трассеры средним диаметром 3,2 мкм и плотностью 1,05 г/см³. Плотность засева потока равнялась 0,15% по объему. В измерениях использовался объектив 20x/0,3. Глубина корреляции (толщина области измерения) для данных параметров равнялась около 40 мкм. Измерение полей скорости в микроканале с пульсирующим потоком были проведены методом фазового усреднения. Пульсирующий насос подавал сигнал на синхронизирующий процессор, таким

образом, измерения полей скорости проводились в различные моменты времени работы насоса (различные фазы) для одного из пиков на графике мгновенного расхода жидкости: 25 мс, 30 мс, 35 мс, 43 мс, 50 мс, 60 мс, 80 мс, 120 мс. При этом пульсации насоса представляли собой пять пиков, в одном из которых жидкость двигалась в обратную сторону. Измерения полей скорости проводились в трех режимах работы насоса: частота и давление на мембранах $f = 2$ Гц $p = \pm 40$ кПа, $f = 5$ Гц $p = \pm 40$ кПа и $f = 5$ Гц $p = \pm 10$ кПа. Для режима $f = 5$ Гц измерения также были проведены для пика, когда жидкость движется в обратную сторону ($t = 1030$ мс, $t = 1043$ мс, $t = 1050$ мс, $t = 1060$ мс). Для каждой фазы измерения в режимах $f = 5$ Гц регистрировалось 300 пар изображений, в режиме $f = 2$ Гц - 200 пар изображений.

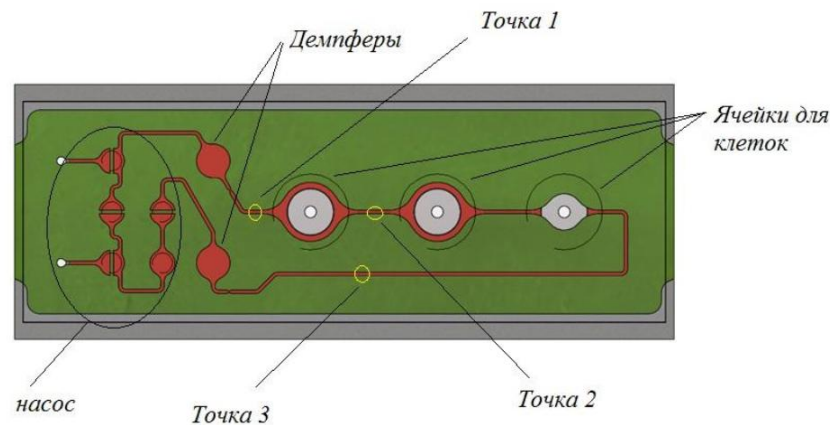


Рис. 30. Общая схема микроканала и областей измерения.

Расчет средних полей скорости проводился методом усреднения корреляционных функций. Сравнение профилей скорости в центральном сечении канала показало, что алгоритм усреднения корреляционных функций дает наилучшие результаты, так как в случае усреднения мгновенных полей скорости неверные вектора, которые не отсеялись на этапе фильтрации и интерполяции, также дают вклад в результирующее среднее поле скорости. На Рис. 31 показаны профили средней скорости, построенные в центральном сечении канала, в различные моменты времени, в режиме $f = 5$ Гц, $p = \pm 40$ кПа. Полученные экспериментальные данные были использованы в НТЦ «Биоклиникум» для оптимизации биочипа, моделирующего органы человека.

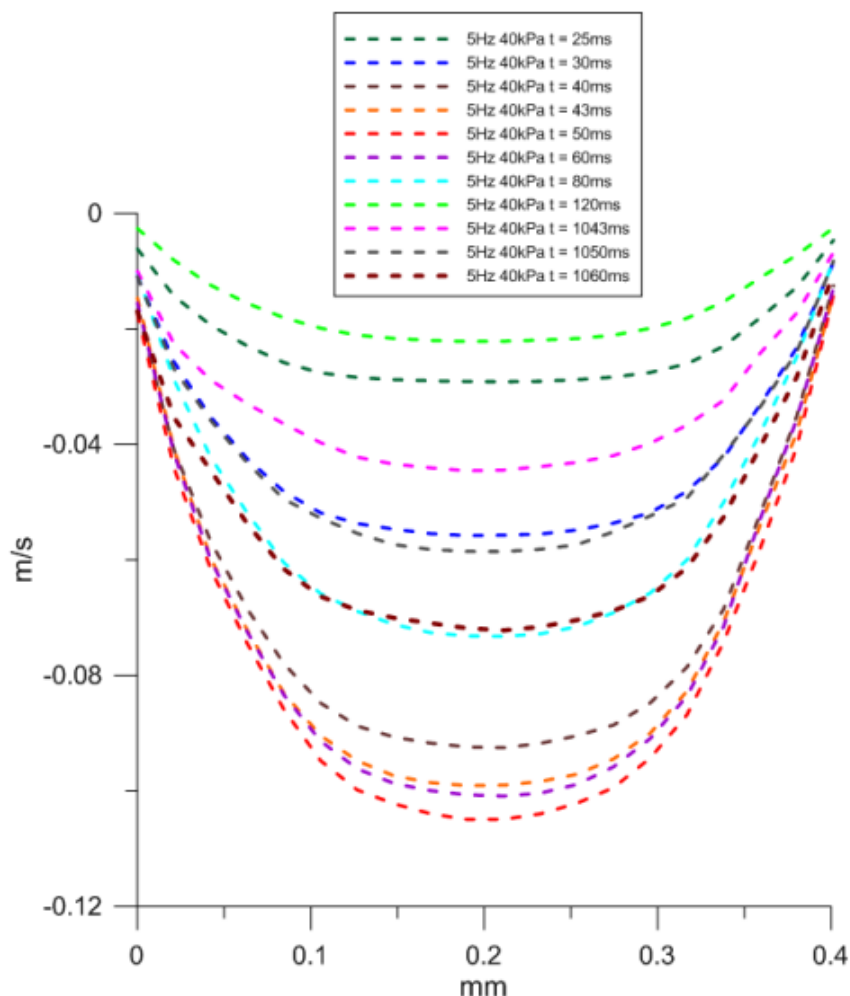


Рис. 31. Профили скорости в центральном сечении канала для различных фаз работы насоса. Режим $f = 5$ Гц $p = \pm 40$ кПа.

2.2 Разработка методики micro-LIF

2.2.1 Установка для проведения micro-LIF экспериментов

Метод micro-LIF был реализован на базе экспериментальной установки для проведения micro-PIV измерений (Рис. 21). Для измерения полей концентраций с помощью метода micro-LIF в качестве осветителя использовалась ртутная лампа (номер 3 на Рис. 21). Данный тип излучения постоянен во времени и позволяет избежать погрешности, связанной с нестабильностью энергии импульса, в случае применения лазера в качестве источника освещения. Спектр излучения ртутной лампы представлен на Рис. 32. С помощью полосового зеленого светофильтра

(максимум пропускания 546 нм, полуширина полосы пропускания 12 нм) из спектра излучения ртутной лампы вырезалась зеленая длина волны для освещения потока, далее он попадал на дихроичное зеркало и, отражаясь, попадал в микроканал. Спектр пропускания дихроичного зеркала показан серым цветом. В качестве флуоресцентного красителя использовался Родамин 6Ж. Интенсивность эмиссии данного флуорофора практически не зависит от температуры, а значит, позволяет устранить ошибки измерений, связанные с нагревом исследуемого объекта возбуждающим излучением. Спектры излучения и поглощения Родамина 6Ж в воде, а также диаграммы пропускания используемых светофильтров, представлены на Рис. 33. Свет, эмитированный флуоресцентным красителем, проходил через дихроичное зеркало и попадал на полосовой светофильтр, диаграмма пропускания которого показана розовым цветом. Зеленой заливкой показана «полезная» часть спектра возбуждения флуорофора. Оранжевой заливкой показана часть спектра эмиссии флуорофора, регистрируемая оптикой. Остальные элементы экспериментальной установки (микроскоп, камера, насос) описаны в разделе 2.1.1.

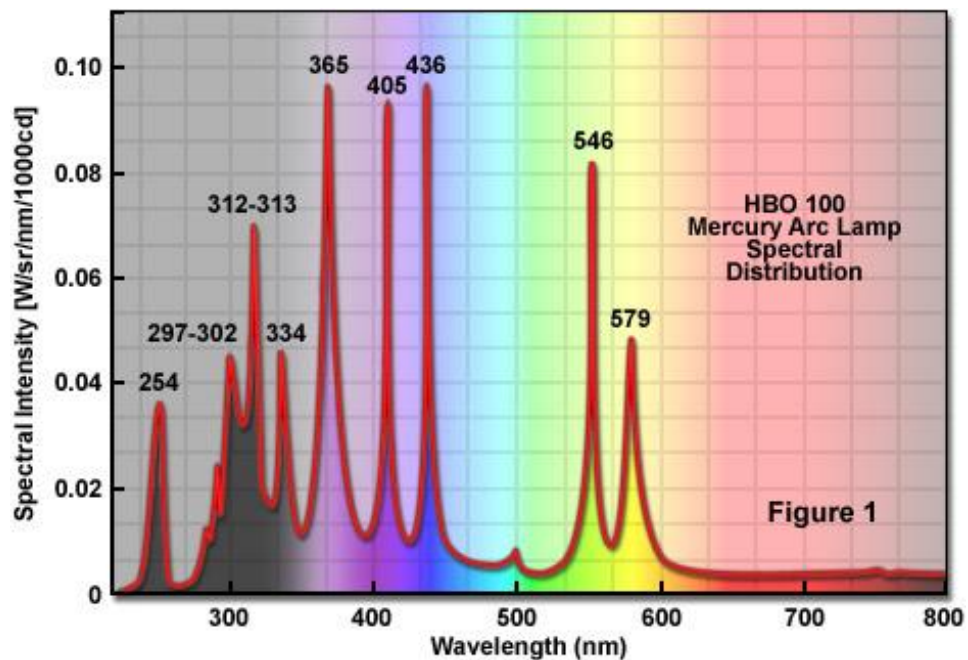


Рис. 32. Спектр излучения ртутной лампы [83].

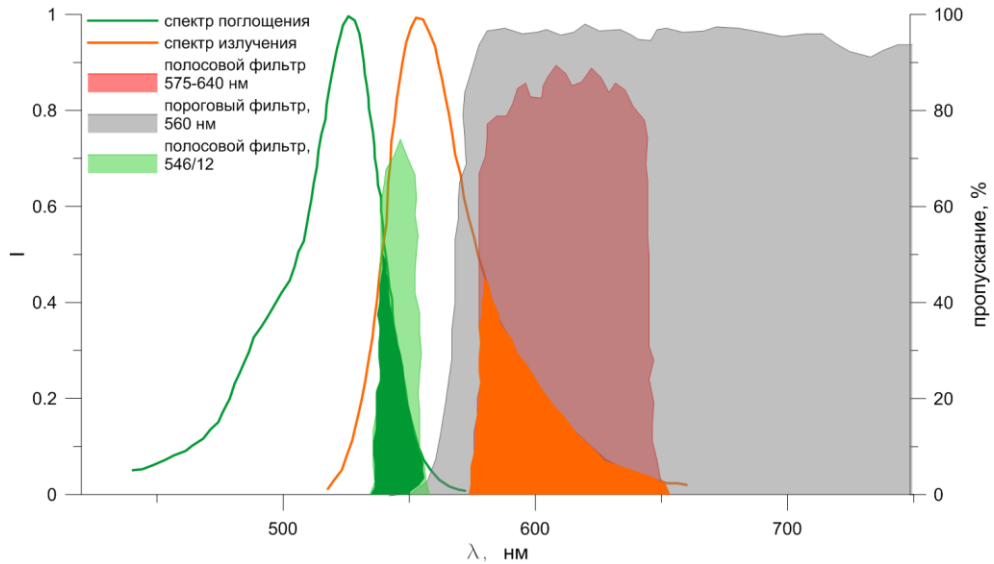


Рис. 33. Спектры поглощения и излучения родамина 6Ж в воде [84]; диаграммы пропускания используемых светофильтров [85].

2.2.2 Расчет пространственного разрешения метода micro-LIF

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

Рассмотрим геометрию оптики, использованную в методе micro-LIF (см. Рис. 34). Пусть s_0 – рабочая дистанция объектива микроскопа, NA – числовая апертура, M – увеличение объектива, D_a – диаметр апертуры линзы, λ – длина волны излучения флуорофора.

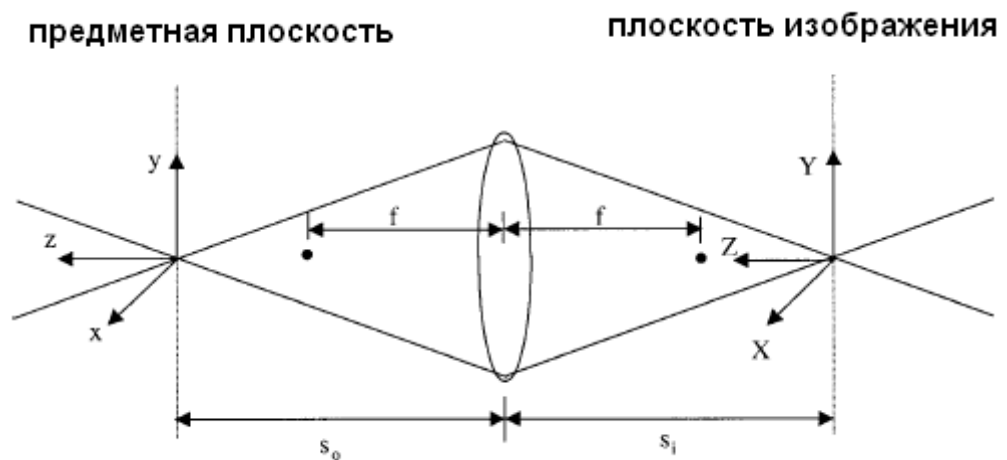


Рис. 34. Оптическая схема в micro-LIF измерениях.

При рассмотрении в микроскоп точечного источника света его проекция на плоскость изображения, называемая функцией рассеяния точки, в связи с дифракцией Фраунгофера на круглом объективе представляет собой распределение Эйри, математический вывод которого был представлен в работе профессора Г. В. Airy в 1834 году [86]. Центральный максимум функции рассеяния точки содержит около 84% всей энергии и называется диском Эйри (Рис. 35).

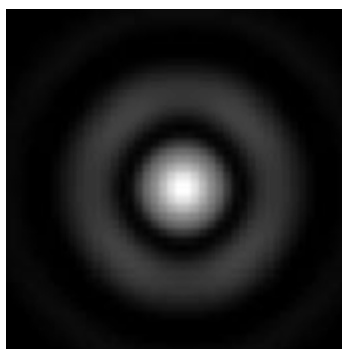


Рис. 35. Картина Эйри.

Диаметр диска Эйри в координатах объекта вычисляется по формуле:

$$d_s = \frac{1,22(M+1)\lambda}{MNA} \quad [87] \quad (2.3)$$

Если точечный источник света находится на расстоянии z от фокальной плоскости, диаметр функции рассеяния точки при аппроксимации распределения Эйри функцией Гаусса вычисляется по формуле:

$$d_s(z) = \left(d_s^2 + \frac{D_a^2 z^2}{(s_0 + z)^2} \right)^{1/2} \quad [47] \quad (2.4)$$

Количество света от точечного источника, попадающее на плоскость изображения, зависит от пространственного угла, который соответствует объективу микроскопа. Поток света от точечного источника, находящегося на расстоянии z от фокальной плоскости, попадающий на плоскость изображения, может быть выражен как:

$$J(z) = \frac{J_0 D_a^2}{16(s_0 + z)^2} \quad [47] \quad (2.5)$$

где J_0 - поток света, испущенный точечным источником.

Таким образом, интенсивность излучения точечного источника равна

$$I(z) = \frac{J_0 D_a^2}{4\pi d_s^2(z)(s_0+z)^2} \quad (2.6)$$

Принимая во внимание, что во всех объективах $s_0 \gg z$, расстоянием z в знаменателе формул (2.4) и (2.6) можно пренебречь. Тогда получим, что интенсивность излучения точечного источника на расстоянии z от фокальной плоскости вычисляется по формуле:

$$I(z) = \frac{J_0 D_a^2}{4\pi(d_s^2 + \frac{D_a^2}{s_0^2} z^2) s_0^2} \quad (2.7)$$

Так как в методе micro-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 и пропорциональным концентрации красителя в данной области, т.е. $J_o(x, y, z) = K(x, y) * C(x, y, z)$, где K – коэффициент, зависящий только от плоских пространственных координат. На Рис. 36 схематично показано распределение интенсивности излучения в первом диске распределения Эйри в зависимости от удаленности точечного источника от предметной плоскости, здесь H – глубина канала.

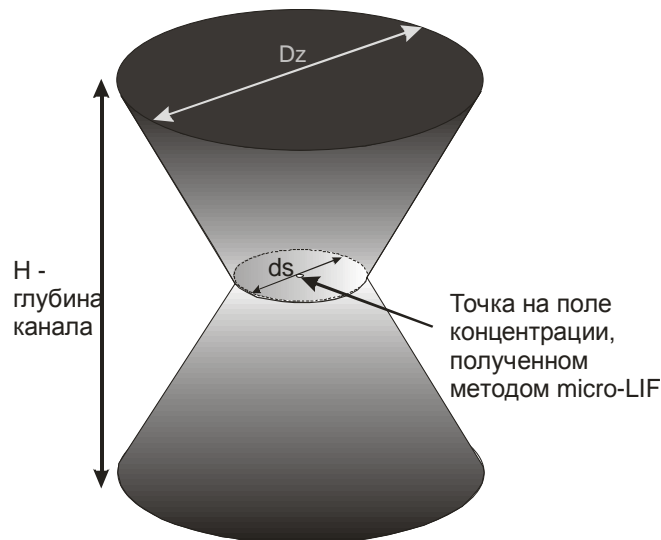


Рис. 36. Схема распределения интенсивности излучения в первом диске распределения Эйри в зависимости от расстояния от предметной плоскости.

Расстояние между молекулами Родамина в растворе по сравнению с диаметром функции рассеяния точки очень мало. Таким образом, можно считать, что суммарный поток света в каждой точке (x_0, y_0) «в слое» micro-LIF изображения на расстоянии z от фокальной плоскости есть интеграл потока света по области диаметром $d_e(z)$ по площади данной области.

$$\begin{aligned} I(x_0, y_0, z) &= \iint_{S(d_s(z))} \frac{J_0(x' - x, y' - y, z) D_a^2}{4\pi d_s^2(z) s_0^2} dx' dy' \\ &= \frac{K D_a^2}{4\pi d_s^2(z) s_0^2} \iint_{S(d_s(z))} C(x - x_0, y - y_0) dx dy \end{aligned} \quad (2.8)$$

Полная зарегистрированная интенсивность на камеру в точке (x_0, y_0) при условии, что фокальная плоскость имеет координату z_0 , равна

$$\begin{aligned} I_0(x_0, y_0, z_0) &= \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} I(x_0, y_0, z - z_0) dz \\ &= \frac{K D_a^2}{4\pi H s_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{C(x_0, y_0, z - z_0)}{d_s^2(z)} dz \\ &= \frac{K D_a^2}{4\pi H s_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{d_s^2(z)} \iint_{S(d_e(x_0, y_0, z))} C(x - x_0, y - y_0, z - z_0) dS dz \end{aligned} \quad (2.9)$$

Отсюда, средний диаметр пространственного усреднения метода D_{avg} равен среднему диаметру функции рассеяния точки по глубине канала, т.е.:

$$D_{avg} = \frac{2}{H} \int_0^{H/2} d_s(z) dz \quad (2.10)$$

Так, для объектива $M = 5$, $NA = 0,12$, $s_0 = 9900$ мкм, $D_a = 11000$ мкм, при длине волны флуоресценции $\lambda = 0,6$ мкм и глубине микроканала $H = 200$ мкм средний диаметр пространственного усреднения метода micro-LIF равен 56,5 мкм.

Рассмотрим случай, когда микроканал полностью заполнен флуорофором с постоянной концентрацией C , т.е. $J_0(x, y, z) = const$. Тогда получим:

$$I_0(x_0, y_0, z_0) = \frac{D_a^2}{4\pi H S_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{d_s^2(z)} J_0 \frac{\pi d_s^2(z)}{4} dz = \frac{J_0 D_a^2}{16 S_0^2} \quad (2.11)$$

Т.е. зарегистрированная концентрация краски не зависит от положения фокальной плоскости по глубине канала. Для проверки данного факта был проведен эксперимент по измерению полей концентраций в микроканале Т-типа высотой 200 мкм. Канал полностью заполнялся водным раствором Родамина 6Ж в концентрации 50 мг/л. Была зарегистрирована интенсивность свечения флуорофора на различных расстояниях от центра канала по глубине канала (-100 мкм, -70 мкм, 0 мкм, 35 мкм и 100 мкм). На графике представлены средние интенсивности свечения флуорофора на изображениях. Относительное стандартное отклонение составило 0,13%.

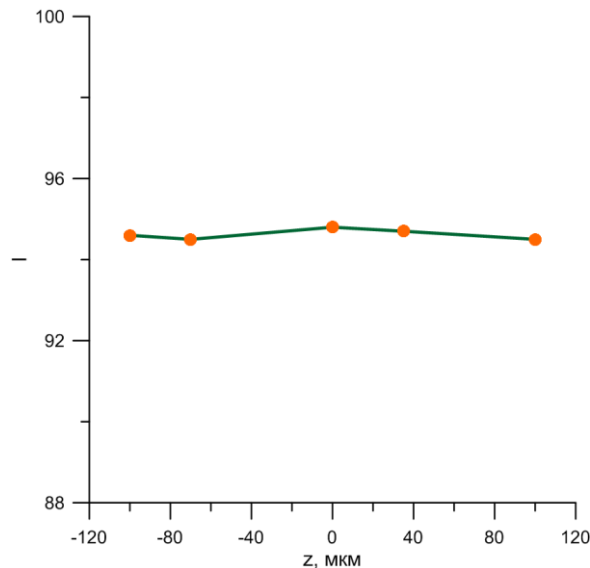


Рис. 37. Значение средних зарегистрированных интенсивностей свечения флуорофора (в градациях серого) на различных расстояниях от центрального сечения по глубине канала.

Пусть в канале два ламинарных потока с концентрациями 1 и 0 движутся параллельно друг другу. Рассчитаем профиль распределения концентрации в центральной плоскости канала вдоль линии, перпендикулярной каналу. Тогда координата x_0 варьируется от $-\frac{W}{2}$ до $\frac{W}{2}$, где W – ширина микроканала. Представим функцию распределения концентрации в канале в виде функции

Хевисайда $\Theta(x)$. Следуя формуле (2.9), зарегистрированная интенсивность флуоресценции равна:

$$I_0(x_0, y_0, 0) = \frac{D_a^2}{4\pi H S_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{d_s^2(z)} \iint_{S(d_s(z))} \Theta(x + x_0) dS dz \quad (2.12)$$

Зарегистрированная интенсивность в середине канала равна:

$$I_0(0,0,0) = \frac{D_a^2}{4\pi H S_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{d_e^2(z)} \iint_{S(d_e(0,0,z))} \Theta(x) dS dz = \frac{D_a^2}{32s_0^2} \quad (2.13)$$

т.е. половине максимальной зарегистрированной интенсивности при равномерно заполненном микроканале раствором концентрации 1.

Для верификации модели пространственного осреднения метода micro-LIF был проведен следующий эксперимент. В один из подводящих каналов Т-образного микроканала шириной 400 мкм и глубиной 200 мкм подавалась дистиллированная вода, в другой – водный раствор Родамина 6Ж в концентрации 60 мг/л. Предварительно была получена калибровочная кривая зависимости зарегистрированной интенсивности на камеру от концентрации флуорофора при различных концентрациях (подробное описание калибровки представлено в Глава 3). Число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру смешивающего микроканала 266 мкм, было равным 30. При данном Re режим течения строго ламинарный и потоки не смешиваются друг с другом (число Пекле $Pe = Re \cdot Sc > 10^5$). На Рис. 38 зелеными маркерами представлен профиль концентрации поперек микроканала, полученный в результате измерений методом micro-LIF с объективом $5x/NA = 0,12$. Красной линией показано численное решение интеграла (2.12) в пакете Mathematica. Из графика видно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных (среднее отклонение составило не более 5%), таким образом, можно сделать вывод, что предложенную модель пространственного усреднения метода допустимо использовать для интерпретации экспериментальных данных, полученных методом micro-LIF.

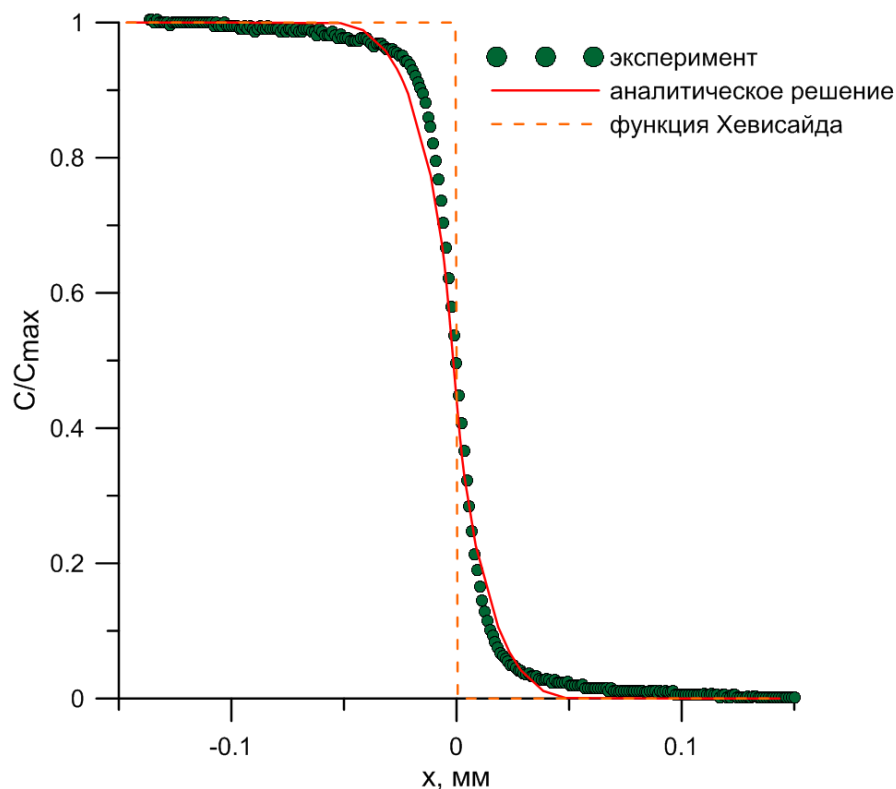


Рис. 38. Профиль концентрации поперек микроканала. Эксперимент и аналитический расчет по формуле (2.12).

2.2.3 Алгоритм расчета эффективности перемешивания по полям концентраций

Для оптимизации микромиксеров требуются алгоритмы для расчета эффективности перемешивания по полям концентраций, полученных с помощью метода *micro-LIF*.

При объемном измерении полей концентрации в Т-канале восстановить поле концентрации в поперечном сечении невозможно. Поэтому в данной работе расчет эффективности перемешивания проводился по профилю концентрации. На Рис. 39 представлены пример поля концентрации в Т-канале и график нормированной концентрации вдоль обозначенного профиля.

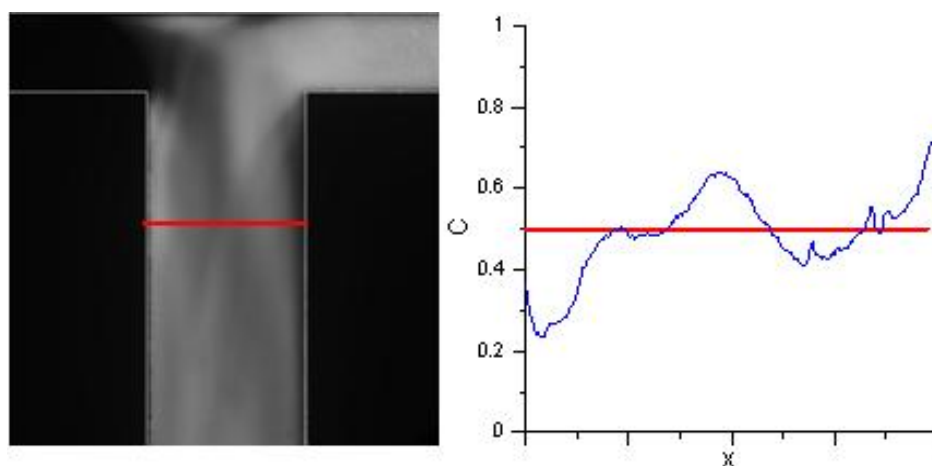


Рис. 39. Пример поля концентрации в Т-миксере и нормированный профиль концентрации.

Алгоритм расчета эффективности перемешивания по интенсивности сегрегации был реализован на языке C++ и создан для расчета эффективности перемешивания по заданным профилям концентраций, полученных с помощью метода micro-LIF.

2.3 Выводы по главе 2

– Разработана методика micro-PIV. Реализован алгоритм для расчета средних полей скорости посредством усреднения корреляционных функций. Проведено тестирование методики при измерении поля скорости в прямом прямоугольном канале в ламинарном режиме.

– Разработанная методика micro-PIV апробирована для измерения полей скорости в открытых потоках – испаряющихся каплях, сидящих на подложке, и пульсирующих течениях в биочипе.

– Разработана методика micro-LIF. Предложена модель пространственного усреднения метода, полученная модель протестирована на экспериментальных данных. Реализован алгоритм расчета эффективности перемешивания по измеренным полям концентраций.

– Разработанная система μ PIV стала одной из составных компонент измерительного комплекса «ПОЛИС», разработанного в Институте Теплофизики СО РАН.

Результаты, описанные в главе, опубликованы в работах [4-5], [9-11], 13, 16, 25 из списка публикаций.

Глава 3. Исследование гидродинамики течений и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа

3.1 Измерение полей скорости в Т-миксере

3.1.1 Описание эксперимента

В работе были проведены измерения полей скорости в микромиксере Т-типа с помощью метода *micro-PIV*. В качестве рабочего участка использовался микромиксер Т-типа (см. Рис. 1). Поперечное сечение входных каналов 200x200 мкм, поперечное сечение выходного канала 200x400 мкм. Длина входных и выходного канала 5 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Жидкость засеивалась флуоресцентными микротрассерами средним диаметром 2 мкм, плотностью 1,05 г/см³. Плотность засева потока равнялась 0,06%. Поток жидкости создавался с помощью шприцевого насоса с одинаковыми расходами в каждом из входных каналов.

Для визуализации потока использовался объектив 20x, NA = 0,3. Изображения трассеров записывались на цифровую камеру с разрешением 1024x1024 пикселей. Динамический диапазон камеры 8 бит. Эксперимент проводился в нескольких сечениях по глубине канала при различных числах Рейнольдса в трех областях канала. Число Рейнольдса рассчитывалось следующим образом:

$$Re = \frac{2QD_h}{Sv} \quad (3.1)$$

где Q – расход жидкости в каждом из входных каналов, D_h – гидравлический диаметр выходного канала, $S = 2d^2$ – площадь поперечного сечения выходного канала.

Гидравлический диаметр выходного канала рассчитывался по формуле:

$$D_h = \frac{4S}{P} = \frac{4d^2}{3} \quad (3.2)$$

и был равен 267 мкм.

В Таблица 3 представлены числа Рейнольдса и соответствующие им расходы жидкостей, при которых измерялись поля скорости в пяти сечениях канала по высоте: в центральном сечении, на расстоянии ± 33 мкм от центрального сечения и на расстоянии ± 66 мкм от центрального сечения. Также были проведены измерения полей скорости в центральном сечении канала при числах Рейнольдса от 10 до 300 с шагом 30.

Таблица 3. Исследуемые числа Рейнольдса и соответствующие им расходы жидкостей во входных каналах.

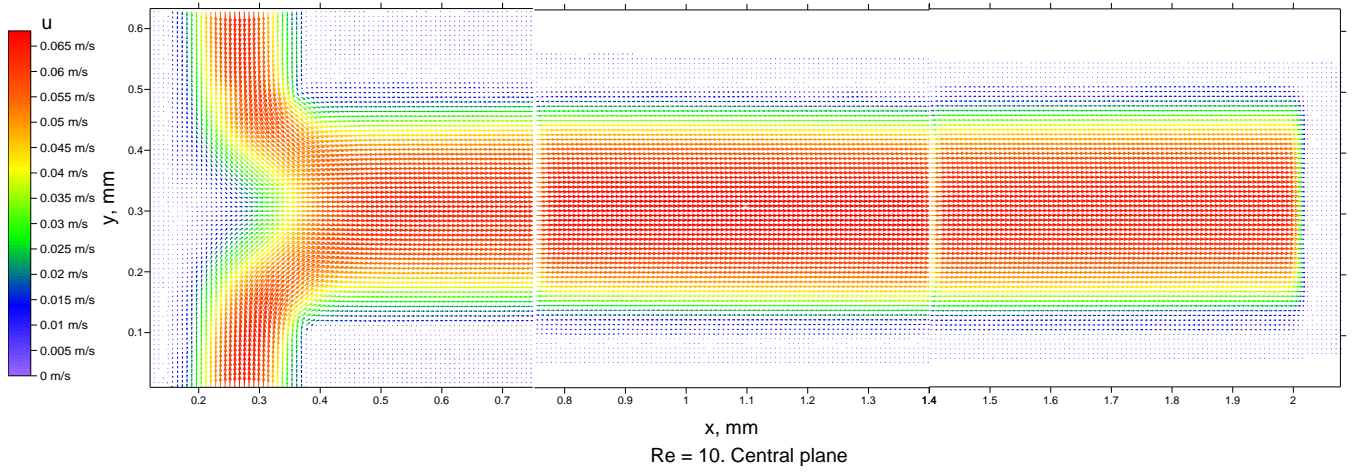
Re	Q, мл/час
10	5,4
120	65
185	100
300	160

Измерения проводились в трех различных областях выходного канала, таким образом, были проведены измерения на расстоянии 7 калибров от торца микромиксера. Для каждой серии измерений было заснято 500 пар изображений. Время между кадрами варьировалось от 5 мкс до 150 мкс.

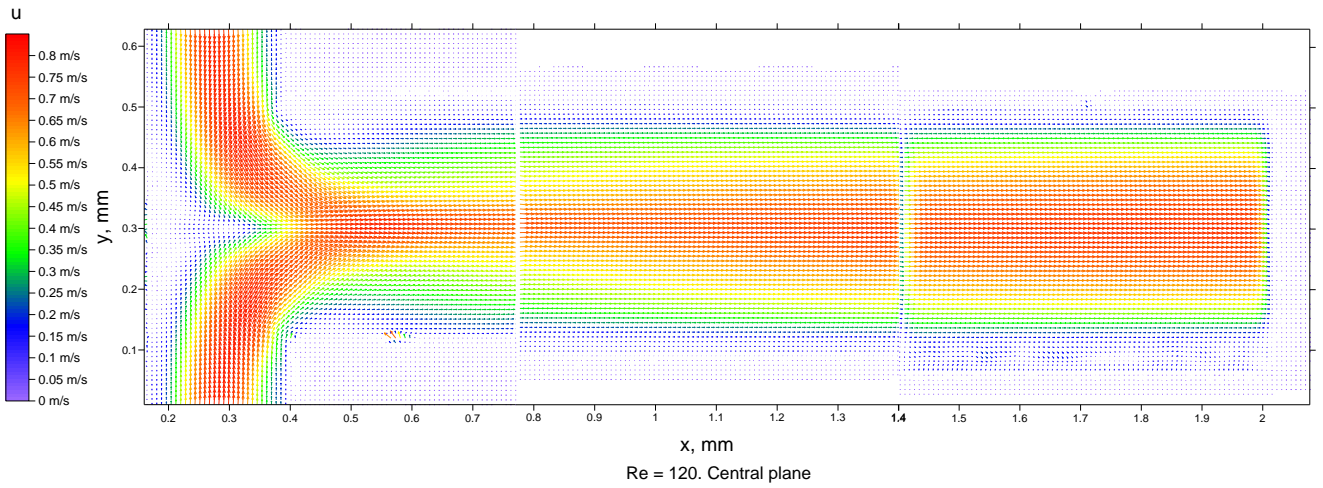
3.1.2 Результаты micro-PIV измерений в T-канале

По предварительно обработанным изображениям, полученным в micro-PIV эксперименте, рассчитывались мгновенные поля скорости с помощью итерационного кросс-корреляционного алгоритма. Предобработка изображений заключалась в наложении маски по периметру микроканала, а также вычитанию фона. Пространственное разрешение полей скорости составило 16 пикселей/вектор или 10 мкм/вектор. Далее по 500 мгновенным полям скорости, отфильтрованным с помощью медианного фильтра, рассчитывалось среднее поле скорости.

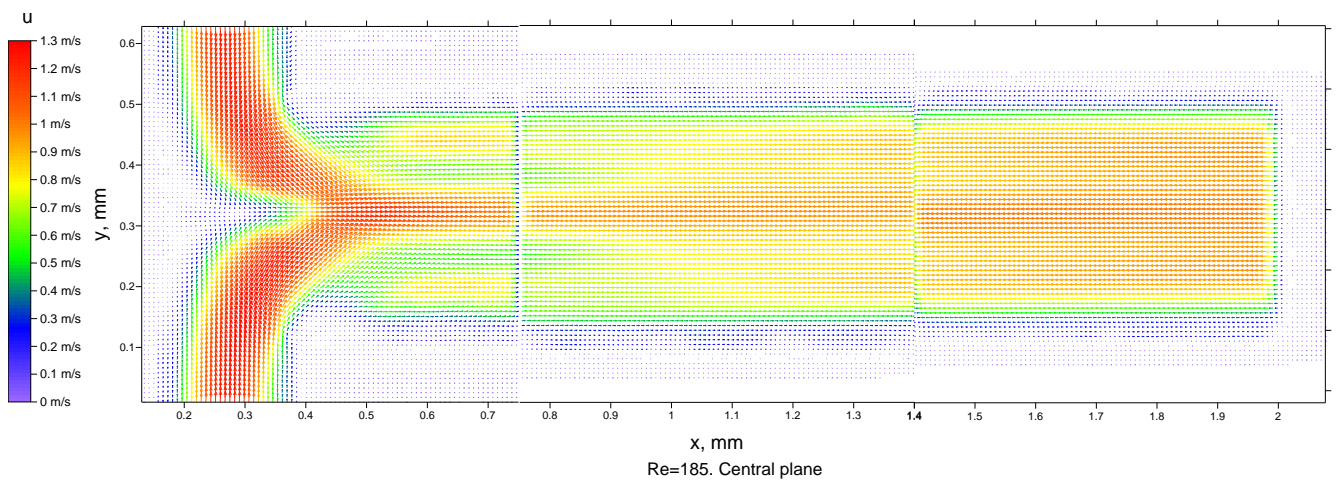
На Рис. 40 представлены средние поля скорости в трех областях микроканала для чисел Рейнольдса 10, 120, 186 и 300.



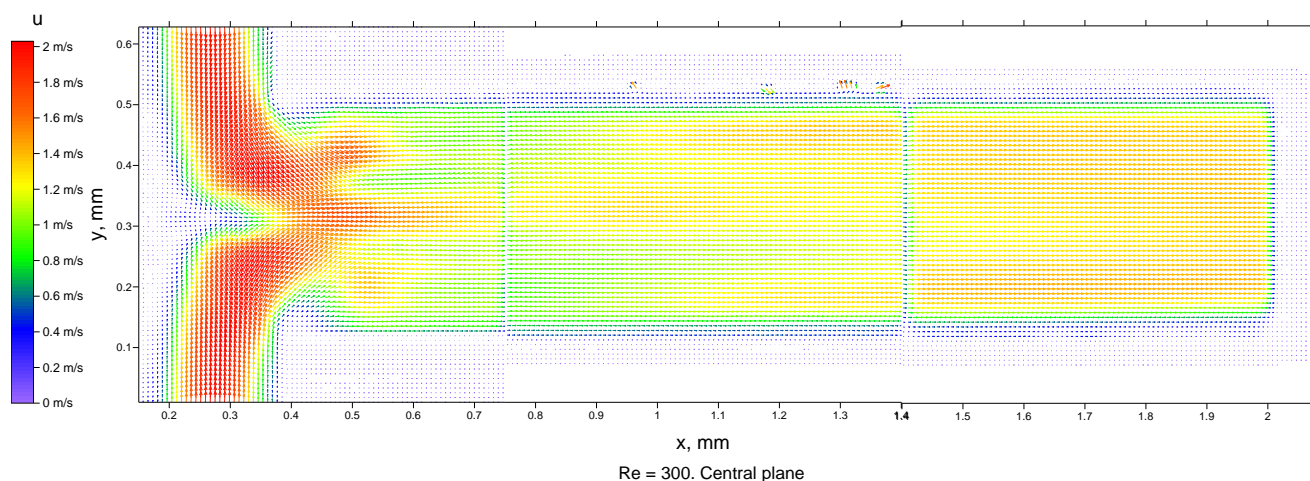
(a)



(b)



(B)



(г)

Рис. 40. Средние поля скорости в центральном сечении Т-канала. а) $Re = 10$ б) $Re = 120$ в) $Re = 185$ г) $Re = 300$.

На Рис. 41 представлены нормированные на среднерасходную скорость профили скорости в центральном сечении канала на расстоянии 3,5 калибра от торца Т-канала. На графике видно, что при $Re \geq 150$ профиль скорости в канале меняется, появляются перегибы (вторая производная равна нулю), течение из вихревого переходит в «захватывающий» режим. Таким образом, так как измерения были сделаны с шагом $Re = 30$, можно сделать вывод, что переход в захватывающий режим происходит в интервале $120 < Re \leq 150$. Данное значение критического числа Рейнольдса согласуется с рассчитанным по формуле (1.17) $Re_{cr} = 143$.

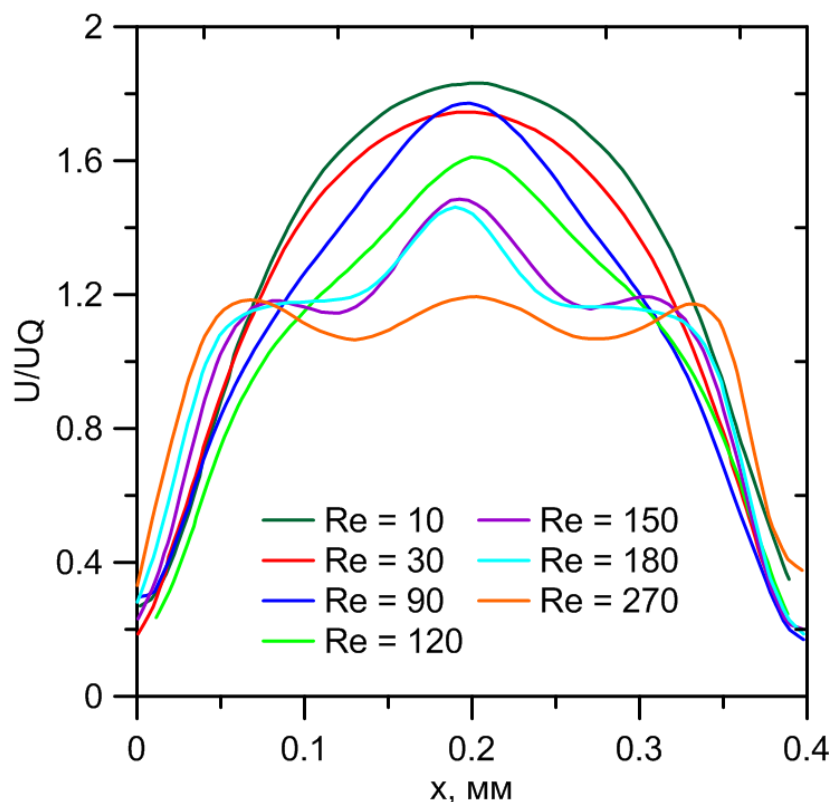
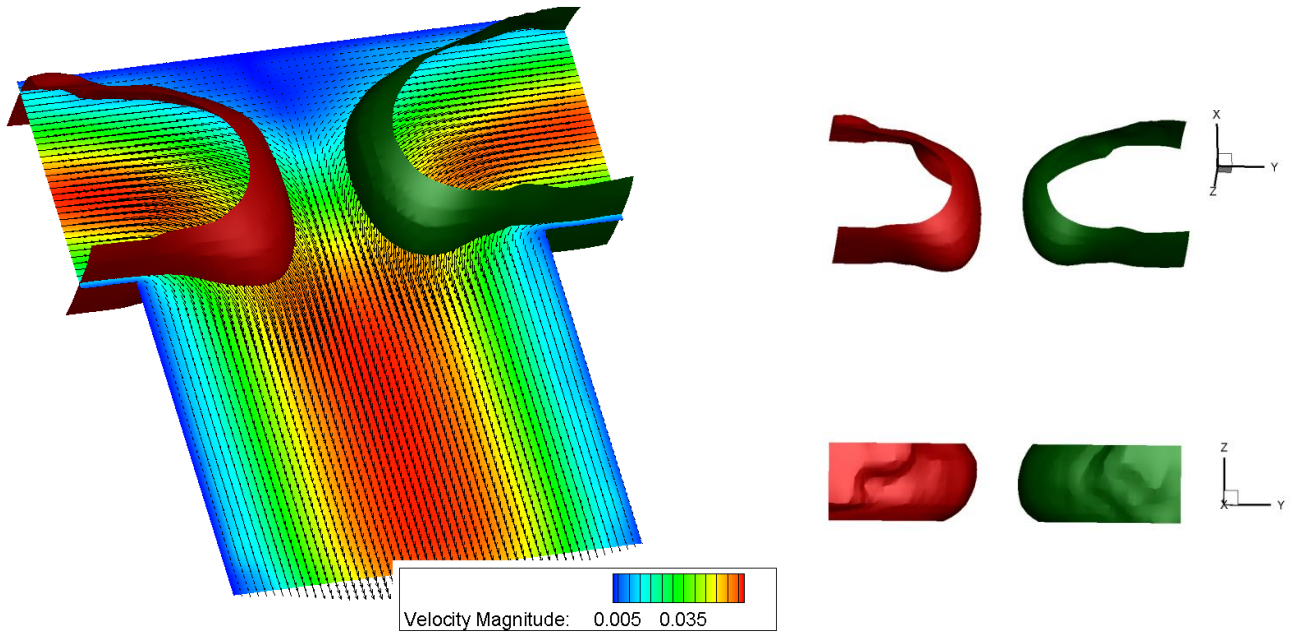


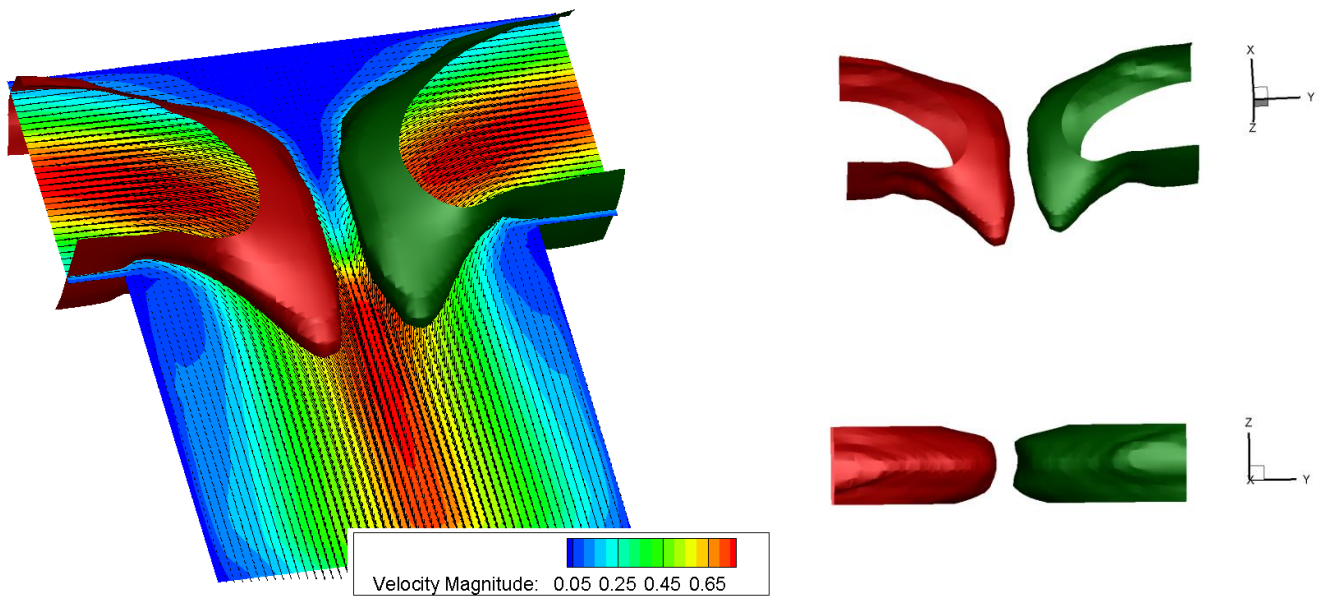
Рис. 41. Нормированные на среднерасходную скорость профили скорости в центральном сечении Т-канала при различных числах Re . Расстояние от торца канала $l = 3,5 D_H$.

Анализ полей скорости, измеренных в различных сечениях микроканала по высоте, также показывает возникновение S-образной структуры. На Рис. 42 показаны средние поля скорости в центральном сечении микроканала и изоповерхности средней поперечной скорости, полученные по полям скорости в пяти сечениях микроканала, при различных числах Рейнольдса от 10 до 300. Изоповерхности постоянной поперечной скорости обозначены красным ($V = 0,4 \frac{Q}{S}$) и зеленым цветом ($V = -0,4 \frac{Q}{S}$). Видно, что при $Re = 10$ течение является строго параллельным, поперечная компонента скорости исчезает сразу при входе в смешивающий канал. При $Re = 120$ наблюдается распространение изоповерхностей в смешивающий микроканал, связанное с возникновением вихрей Дина, однако течение также является симметричным относительно оси канала. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса наблюдается несимметричность изоповерхностей поперечной скорости относительно оси канала, что свидетельствует о возникновении S-образной структуры.

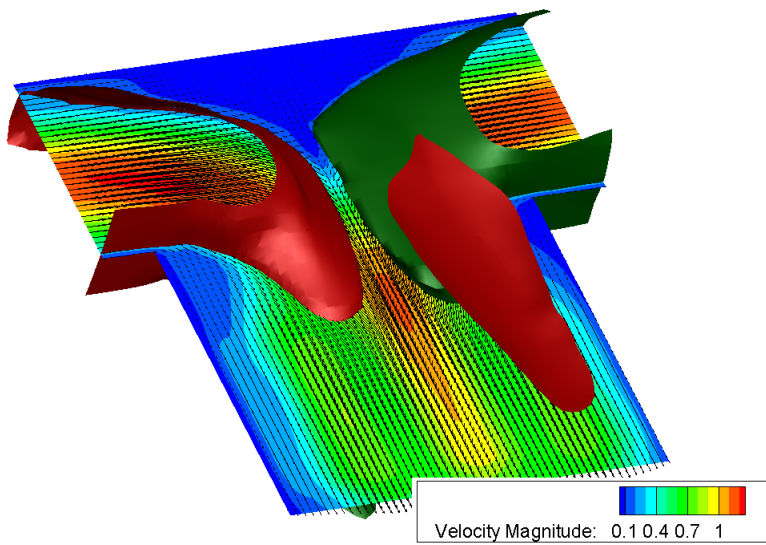
a



b



В



Г

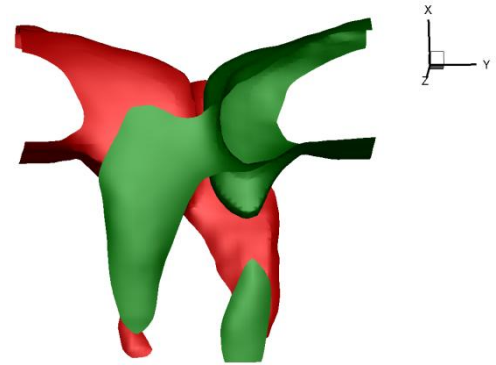
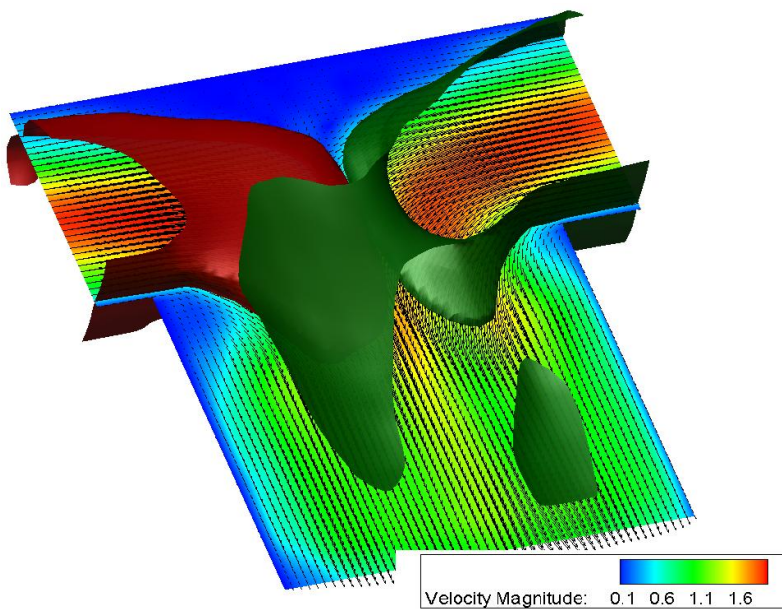


Рис. 42. Средние поля скорости в центральном сечении Т-канала и изоповерхности средней поперечной скорости, построенные по полям скорости, измеренным в пяти сечениях микроканала при различных числах Рейнольдса: а) $Re = 10$, б) $Re = 120$, в) $Re = 186$, г) $Re = 300$.

3.2 Измерение полей концентраций в Т-канале

В рамках диссертации были проведены исследования смешения жидкостей в микромиксере Т-типа с помощью метода *micro-LIF*. Эксперимент по измерению полей концентраций в Т-канале проводился следующим образом.

В качестве осветителя использовалась ртутная лампа, для визуализации потока использовался объектив микроскопа с увеличением 5х и числовой апертурой $NA = 0,12$. Свет, излученный флуорофором, регистрировался на цифровую камеру Видеоскан с разрешением 2048x2048 пикселей и динамическим диапазоном 12 бит. Масштабный коэффициент составил 1,25 пикселей/мкм.

Был определен диапазон концентраций, при котором интенсивность свечения флуорофора имеет линейную зависимость от концентрации. Для этого в Т-канал подавались водные растворы Родамин 6Ж в следующих концентрациях: 0 мг/л, 10 мг/л, 25 мг/л, 40 мг/л, 50 мг/л, 62,5 мг/л и 75 мг/л. Для каждой концентрации флуорофора регистрировалось изображение канала. На Рис. 43 показан график зависимости усредненной по изображению степени серого от концентрации флуорофора. Видно, что при концентрации меньше 62,5 мг/л зависимость интенсивности свечения флуорофора от концентрации линейная, при увеличении концентрации флуорофора интенсивность свечения падает, происходит самогашение флуоресценции.

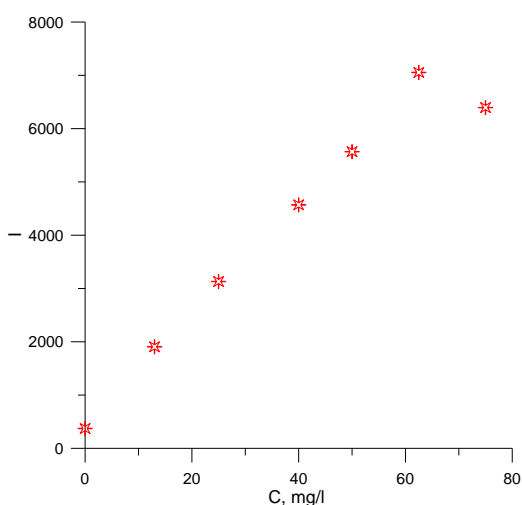


Рис. 43. Средняя степень серого на изображении в зависимости от концентрации флуорофора.

Далее для калибровки системы были выбраны растворы флуорофора в концентрациях меньше 62,5 мг/л. Для каждого из растворов регистрировалось 100 изображений канала. Также регистрация изображений проводилась без источника освещения (шум камеры). Серия каждых изображений усреднялась, из них вычиталось среднее шумовое изображение. Таким образом, были получены изображения для калибровки за вычетом среднего шума камеры. Калибровка проводилась с помощью алгоритма калибровки в программном обеспечении ActualFlow с попиксельной коррекцией. Это позволило устранить пространственную неоднородность освещения в канале. Калибровочная кривая для всего изображения представлена на Рис. 44.

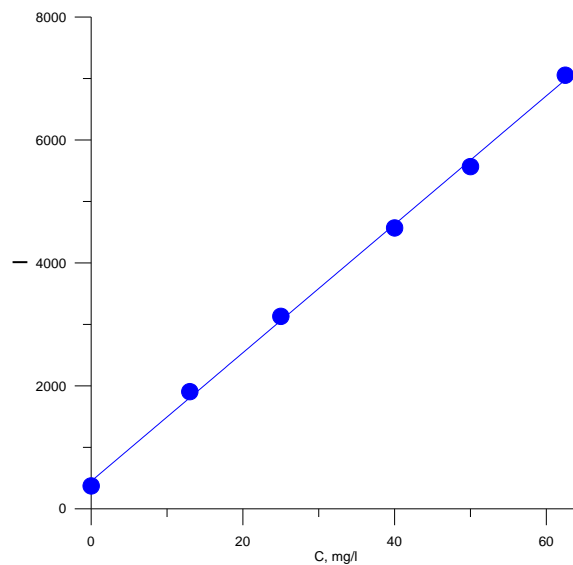


Рис. 44. Калибровочная кривая микро-LIF измерений.

При измерении 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. Число Шмидта для данного красителя равнялось 2156. В эксперименте исследовались режимы течения при Re от 10 до 300 с шагом 30. Для каждого режима было снято 500 изображений. На Рис. 45 представлены примеры изображений потока при $Re = 10$ и $Re = 150$. Затем изображения усреднялись, из среднего вычитался шум камеры. Поля концентрации восстанавливались с помощью алгоритма реконструкции в

программном пакете ActualFlow. На Рис. 46 представлены поля концентраций при различных числах Рейнольдса.

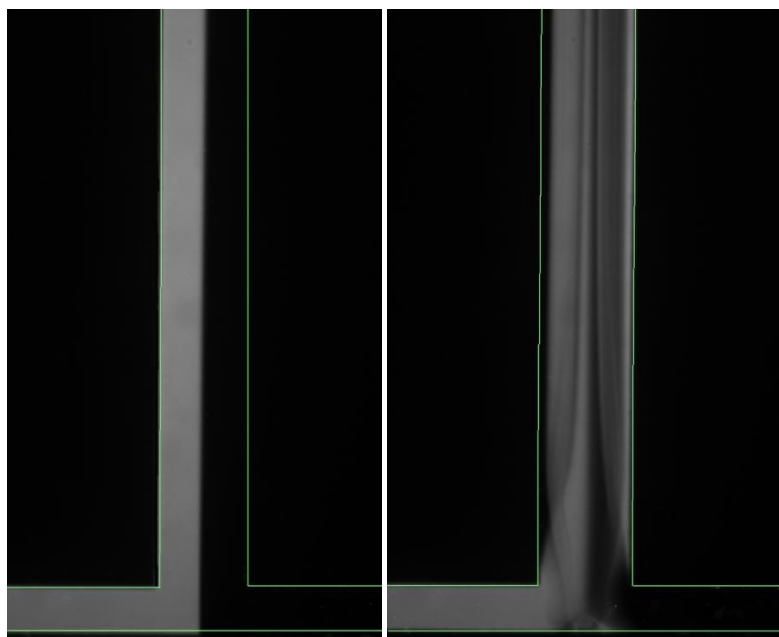


Рис. 45. Интенсивность свечения флуорофора. Слева: $Re = 10$. Справа: $Re = 150$.

По средним полям концентраций, полученных методом *micro-LIF*, с помощью алгоритма, описанного в 2.2.3, была рассчитана эффективность перемешивания в Т-канале при различных числах Рейнольдса и на различных расстояниях от входа в смешивающий канал. На Рис. 46 представлены профили концентрации на расстоянии пяти калибров от входа в смешивающий канал для чисел Рейнольдса 10, 150 и 300.

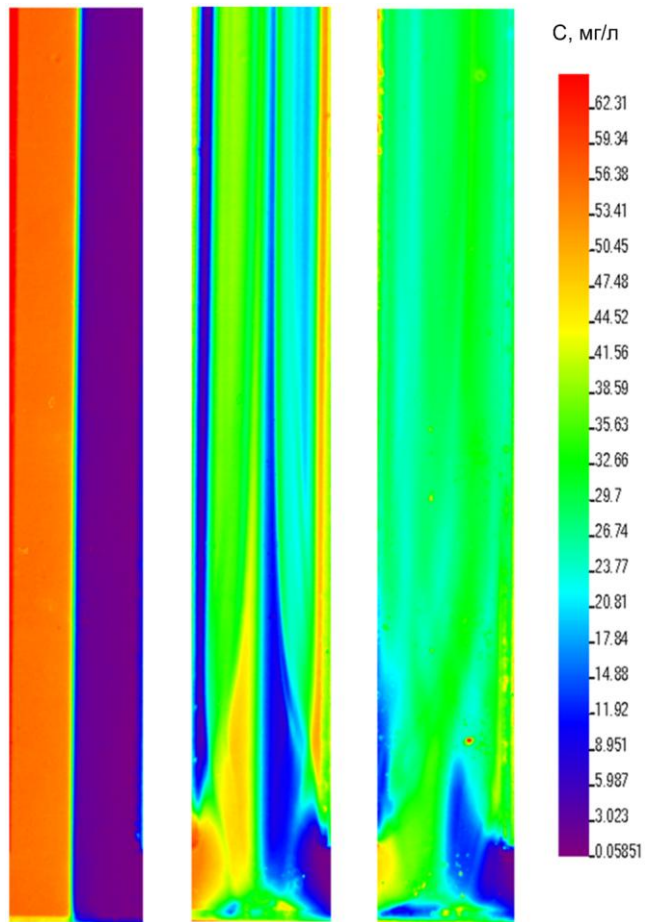


Рис. 46. Поля концентрации в выходном канале Т-миксера. Слева: $Re = 10$, в центре: $Re = 150$, справа: $Re = 300$.

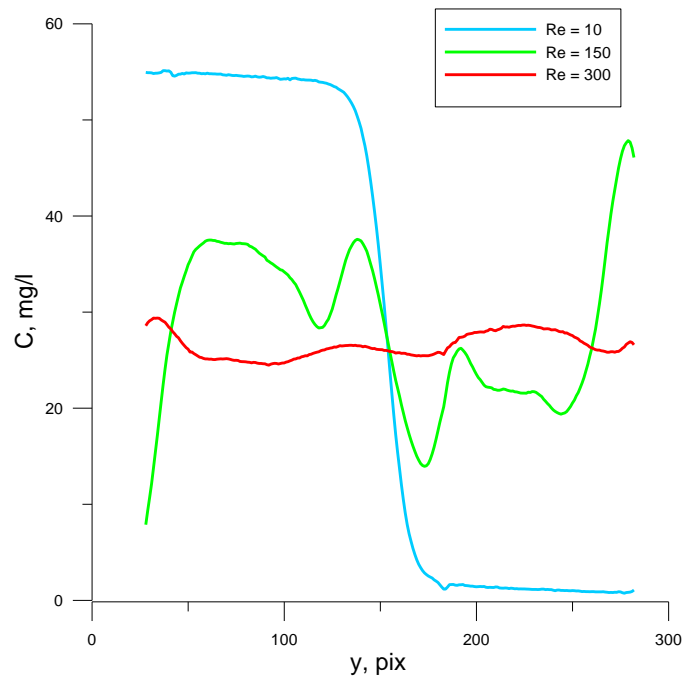


Рис. 47. Профили концентрации на расстоянии пяти калибров от входа в смешивающий канал для различных чисел Рейнольдса.

На Рис. 48 представлены графики зависимости эффективности перемешивания в Т-канале от расстояния от входа в смешивающий канал при числах Рейнольдса 10, 120, 150 и 300. Видно, что при достижении $Re = 150$ («захватывающий» режим) эффективность перемешивания в канале резко возрастает. При $Re = 300$ эффективность перемешивания на 9 калибрах канала достигает 0,9. Стоит отметить, что существует некоторая переоценка количественной характеристики эффективности перемешивания при $Re > 150$, так как метод *micro-LIF* позволяет проводить регистрацию только осредненных по глубине канала полей концентраций.

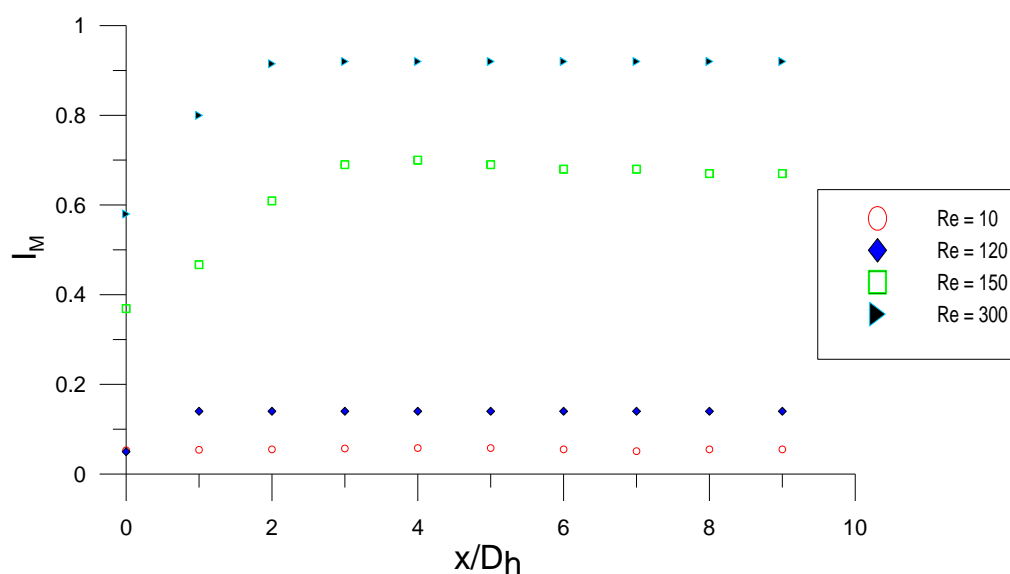


Рис. 48. Эффективность перемешивания в зависимости от расстояния от входа в смешивающий канал при различных числах Рейнольдса.

3.3 Сравнение экспериментальных *micro-PIV* и *micro-LIF* данных с результатами численного моделирования

Результаты *micro-PIV* измерений в Т-канале были сравнены с результатами численного моделирования А. Минаков и др. [88]. На Рис. 49 представлены нормированные на максимальную скорость профили скорости в центральном сечении канала на расстоянии 3,5 калибров от торца Т-канала, полученные в результате эксперимента и численного моделирования. Видно, что при

ламинарном и вихревом режиме течения профили скорости совпадают, при переходе в «захватывающий» режим профили скорости немного отличаются (в пределах 7%), что может быть объяснено существенно трехмерной структурой потока в данном режиме течения и глубиной усреднения метода micro-PIV (в данном эксперименте глубина корреляции составила 30 мкм).

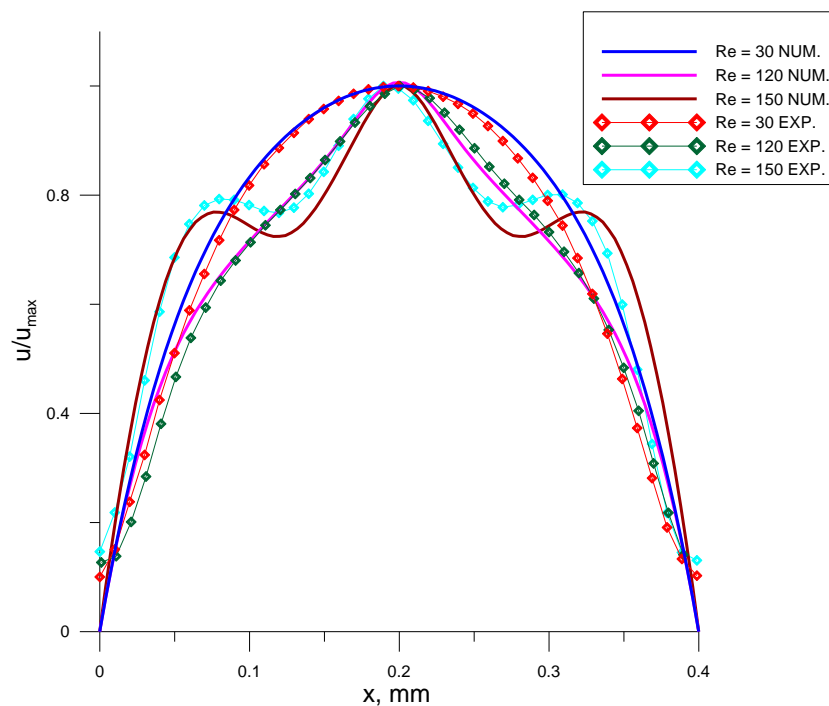


Рис. 49. Сравнение нормированных на максимальную скорость профилей скорости в центральном сечении канала на расстоянии 3,5 калибра от торца Т-канала при различных числах Рейнольдса. Эксперимент и численное моделирование Минаков и др.[88].

На Рис. 50 представлено качественное сравнение экспериментальных и полученных с помощью численного моделирования полей скорости в центральном сечении Т-канала при числах Рейнольдса 300 и 120.

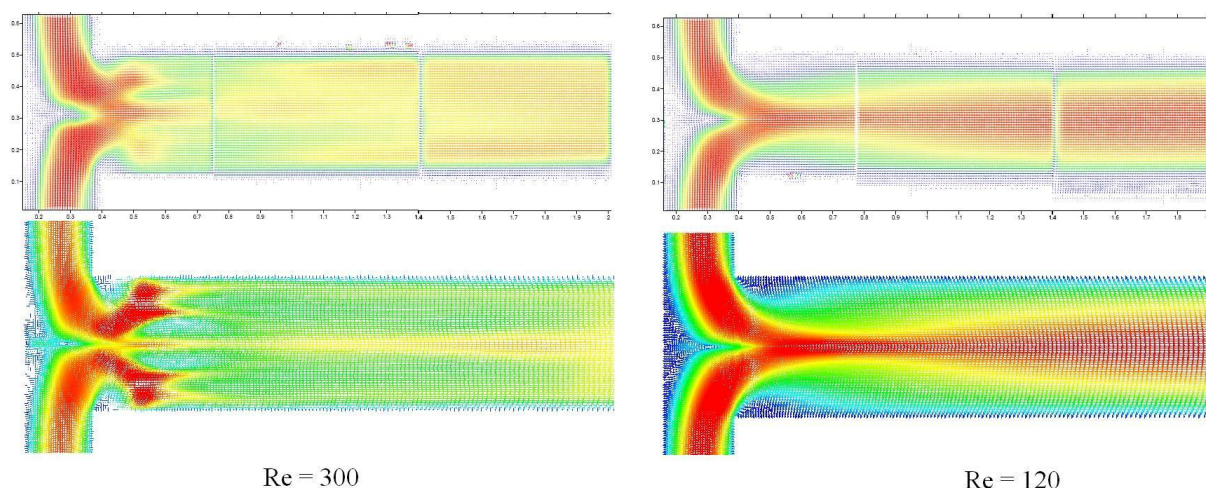


Рис. 50. Качественное сравнение полей скорости в центральном сечении Т-миксера. Вверху: экспериментальные данные, внизу: численное моделирование Минаков и др. [88].

Для того чтобы провести сравнение полей концентраций, полученных в результате численного моделирования и эксперимента, было проведено пространственное осреднение результатов численного моделирования по глубине Т-миксера в соответствии с моделью пространственного усреднения метода *micro-LIF*, предложенной в 2.2.2. Для осреднения были взяты поля концентраций в плоскости XY в 11 сечениях по глубине канала симметрично относительно центра Т-миксера. Поля концентраций для каждого сечения пространственно усреднялись с помощью фильтра «бегущее среднее» с круглым окном с диаметром, равным диаметру функции рассеяния точки в данном сечении. Результирующее поле концентрации рассчитывалось как среднее арифметическое по 11 рассчитанным сечениям. Для верификации данного метода сравнения экспериментальных и расчетных данных был построен профиль концентрации поперек смешивающего канала при $Re = 30$. Из Рис. 51 видно достаточно хорошее совпадение экспериментальных и усредненных численных данных.

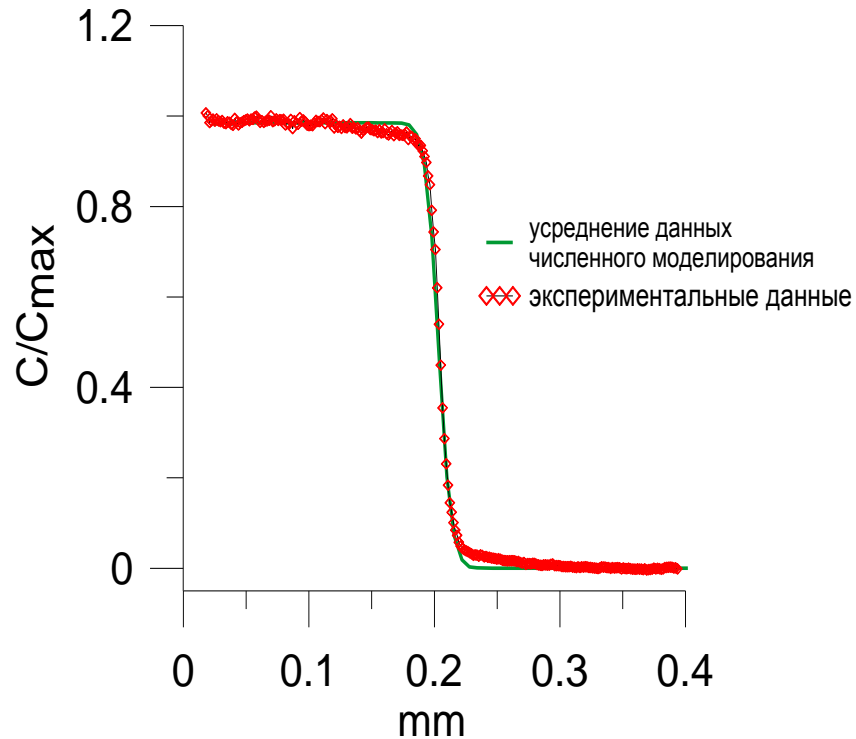


Рис. 51. Нормированные профили концентрации поперек смешивающего канала для $Re = 30$. Экспериментальные и усредненные численные результаты.

Полученные с помощью численного моделирования исходные поля концентрации в центральном сечении Т-миксера, рассчитанные усредненные поля концентрации и поля концентрации, полученные в эксперименте, для различных чисел Рейнольдса показаны на Рис. 52. Видно, что поле концентрации в центральном сечении канала, полученное в результате численного моделирования, абсолютно не соответствует результатам, полученным в эксперименте, тогда как усредненные поля концентрации демонстрируют хорошее совпадение с экспериментом.

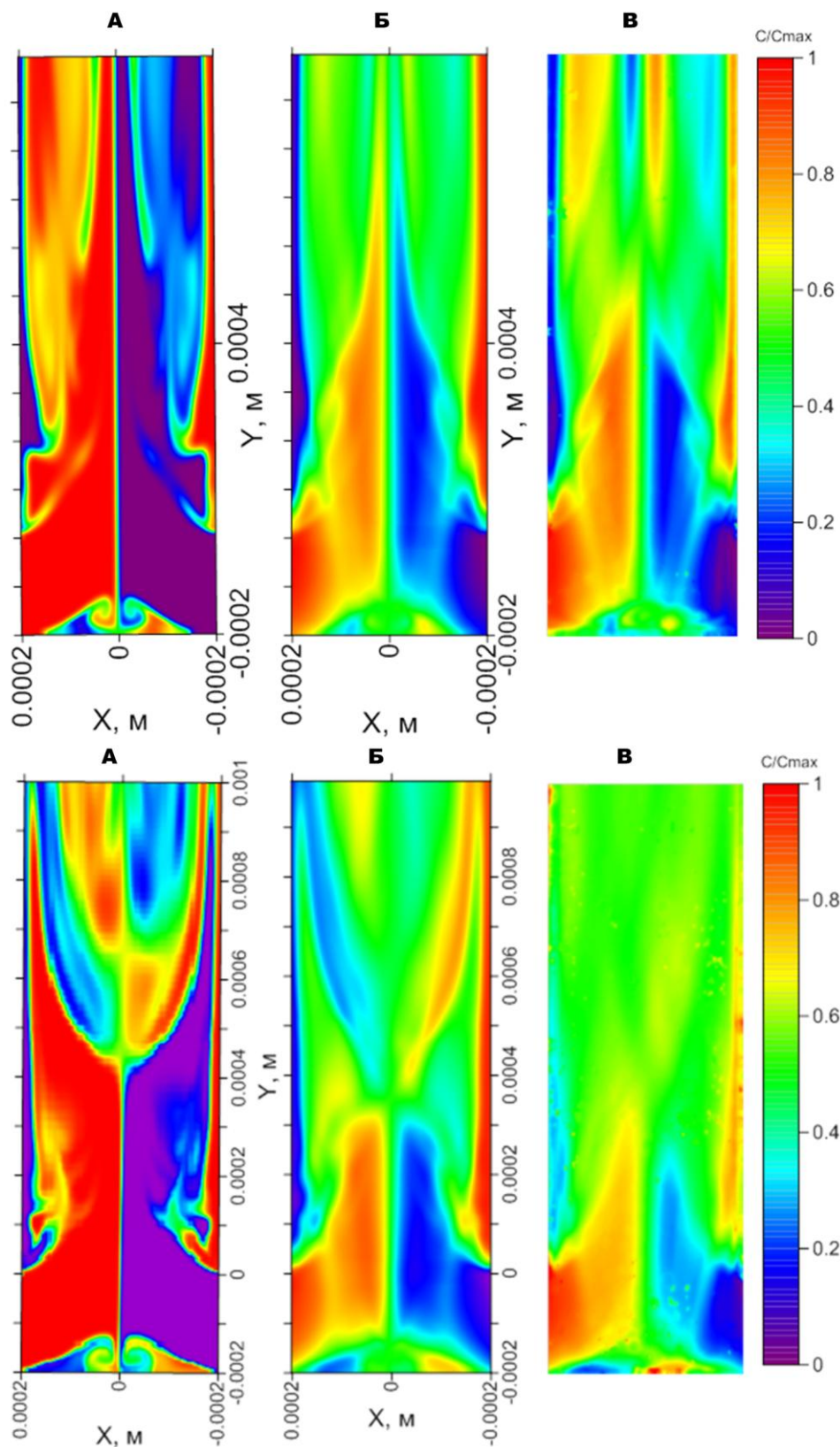


Рис. 52. Сверху: $Re = 186$, снизу: $Re = 300$. А – поле концентрации в центральном сечении Т-канала, полученное с помощью численного моделирования [88], Б – усредненные в соответствии с моделью пространственного осреднения результаты численного моделирования, В – экспериментальные данные, полученные методом micro-LIF.

3.4 Выводы по главе 3

– С помощью методов micro-PIV и micro-LIF были проведены комплексные экспериментальные исследования режимов течения и процессов смешения в микромиксере Т-типа. Измерение полей скорости показало, что при числе Рейнольдса от 120 до 150 происходит переход от симметричного режима течения в несимметричный вихревой с возникновением S-образной структуры. При этом распределение скорости в канале существенно изменяется. Критическое число Рейнольдса, при котором происходит переход к несимметричному вихревому режиму с S-образной структурой, совпадает с данными других авторов.

– Предложен алгоритм для обработки данных трехмерного моделирования смешения жидкостей в микроканале, позволяющий провести сравнение измеренных и рассчитанных полей концентраций. Сравнение экспериментальных данных по полям скорости и концентрации с результатами численного моделирования показало удовлетворительное совпадение распределений скорости и концентраций в канале.

– Оценка эффективности перемешивания по micro-LIF данным показала, что при переходе в несимметричный вихревой режим течения ($Re > 150$) эффективность перемешивания в Т-канале резко возрастает.

Результаты, описанные в главе, опубликованы в работах [1-3], 12, 14, 15, 17 из списка публикаций.

Глава 4. Экспериментальное исследование течений несмешивающихся жидкостей в Т-образных микроканалах

4.1 Описание экспериментов

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование течения несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа. Эксперименты проведены для трех наборов несмешивающихся жидкостей: керосин – вода, парафиновое масло – вода и парафиновое масло – касторовое масло. Физические свойства жидкостей представлены в Таблица 4.

Для измерения вязкости воды и керосина использовался капиллярный вискозиметр, для измерения вязкости масел – ротационный вискозиметр. Относительная погрешность измерений составила 1% и 3%, соответственно. Плотность жидкостей измерялась посредством взвешивания известного объема. Поверхностное натяжение и контактный угол измерялись на приборе DSA-100 (KRUSS) магистрантом НГУ Ковалевым А. В. Поверхностное и межфазное натяжение были измерены методом висючей капли, погрешность измерения составила 2%. Межфазное натяжение касторовое масло – парафиновое масло было рассчитано по правилу Антонова, так как прямые измерения были невозможны в связи с малым значением измеряемой величины: межфазовое натяжение на границе двух несмешивающихся жидкостей равно разности поверхностных натяжений этих жидкостей на границе с воздухом. Контактные углы смачивания подложки из материала микроканала измерялись методом лежащей капли. В Таблица 4 представлены контактные углы материал подложки–жидкость–воздух. Контактные углы жидкость–жидкость–подложка измерялись при смачивании подложки одной из рабочей жидкостей. При этом контактный угол отмерялся в сторону внешней жидкости. Значения данных контактных углов представлены в Таблица 5.

Выбор жидкостей не является случайным. Каждая пара жидкостей отличается по таким основным параметрам, как вязкость и контактный угол смачивания. Для системы керосин – вода вязкость обеих жидкостей мала (0,820 мПа·с для

керосина, 0,894 мПа·с для воды). При этом обе жидкости примерно одинаково смачивают канал (контактный угол 130° для воды в керосине и 98° для керосина в воде). Набор вода – парафиновое масло является набором, где смачивание стенок примерно такое же, как для пары керосин – вода, но вязкость масла на два порядка выше (110 м·Пас). Набор парафиновое масло – касторовое масло обладает высокой вязкостью, и при этом касторовое масло очень хорошо смачивает канал (контактный угол 25°), тогда как парафиновое масло практически не смачивает канал (контактный угол 152°).

Таблица 4. Физические свойства жидкостей.

	Керосин	Вода	Парафиновое масло	Касторовое масло
ρ , кг м ⁻³	745	997	845	935
μ , мПа с	0,820	0,894	110	650
σ_s , мН м ⁻¹	24,3	68,6	24,8	41,9
θ , °	5±2	79±1.2	9,9±1.2	20,5±1.2

Таблица 5. Физические свойства наборов жидкостей.

	керосин – вода	парафиновое масло – вода	Парафиновое масло – касторовое масло
σ , мН м ⁻¹	46,2	45,2	17
θ (жидкость – жидкость – подложка), °	130 ± 4 (капля воды)	121 ± 2 (капля воды)	25 ± 2 (капля касторового масла)

98 ± 3	115 ± 3	152 ± 4
(капля керосина)	(капля парафинового масла)	(капля парафинового масла)

Рабочий участок представлял собой микроканал Т-типа с прямоугольным сечением (производства компании microLIQUID, Испания), схема которого показана на Рис. 1, фотографии микроканала и держателя с подводящими трубками показаны на Рис. 53. Все стенки микроканала были выполнены из полимерного материала SU-8. Детальный процесс изготовления микроканала описан в работе [89]. Шероховатость стенок микроканала не превышала 1 мкм. В экспериментах специальной обработки стенок микроканала не проводилось. Размер поперечного сечения входных каналов составил 200x200 мкм, размер выходного микроканала 200x400 мкм, гидравлический диаметр выходного микроканала равен $d_h = 267$ мкм. Длина входных каналов равнялась 11,5 мм, длина выходного – 22,5 мм, что составило 84 гидравлических диаметра. Для чистоты экспериментов для каждого из наборов жидкости использовался отдельный микроканал.

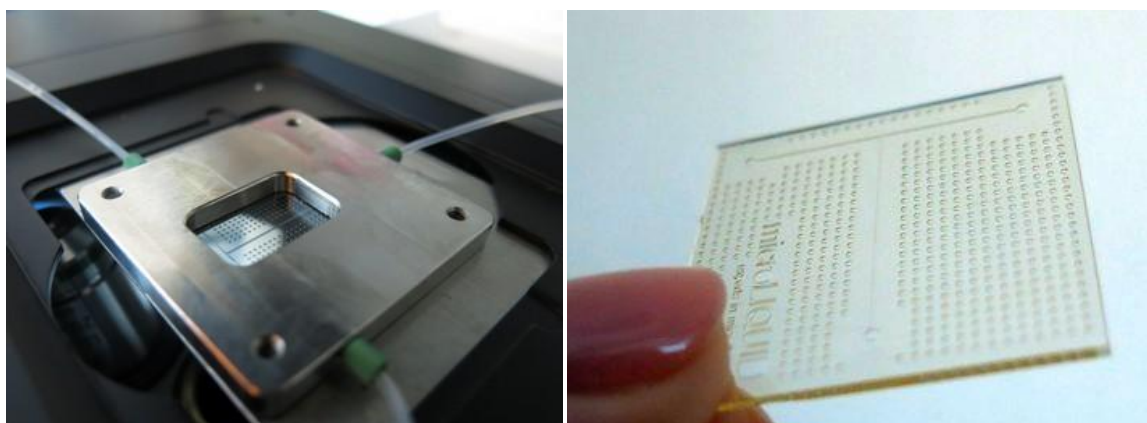


Рис. 53. Слева: держатель для микроканалов с подводящими каналами. Справа: микроканал Т-типа.

Для визуализации режимов течения использовалась скоростная камера pco.1200hs с КМОП матрицей 1,3 Мпикс и инвертированный микроскоп Zeiss Axio Observer.Z1 с объективом 5x/0,12. Частота съемки варьировалась от 5 до 1000 Гц. Для освещения потока применялась галогенная лампа, освещение

производилось в проходящем свете. Для создания потока использовался двойной шприцевой насос KDS Gemini 88. Схема экспериментальной установки показана на Рис. 54. Визуализация режимов течения проводилась в двух областях микроканала: в Т-области и в конце канала расстоянии 56 калибров вниз по потоку от Т-области. Область регистрации режимов течения выбиралась таким образом, чтобы уменьшить влияние входных и выходных эффектов.

Эксперименты проводились в широком диапазоне чисел Рейнольдса, чисел Вебера и капиллярного числа жидкостей. Их значения для каждого набора жидкостей представлены в Таблица 6.

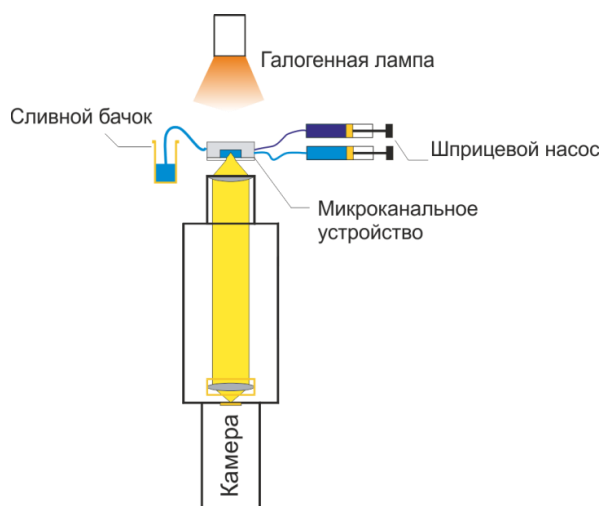


Рис. 54. Схема (слева) и фотография (справа) экспериментальной установки для визуализации режимов течения несмешивающихся жидкостей.

Таблица 6. Экспериментальные параметры.

Параметр	Керосин – вода	Парафиновое масло – вода	Парафиновое масло – касторовое масло
	$Re_i^{in} = \rho_i u_i^{in} d_h \mu_i^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1} < Re_k^{in} < 3,8 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^{-2} < Re_w^{in} < 5,6 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^{-4} < Re_{po}^{in} < 1,5 \cdot 10^{-1}$ $3 \cdot 10^{-2} < Re_w^{in} < 2,9 \cdot 10^2$
$Re_i = \rho_i u_i d_h \mu_i^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1} < Re_k < 2,5 \cdot 10^2$ $2 \cdot 10^{-2} < Re_w < 3,7 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^{-4} < Re_{po} < 1 \cdot 10^{-1}$ $2 \cdot 10^{-2} < Re_w < 1,9 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^{-5} < Re_{po} < 1 \cdot 10^{-1}$ $4 \cdot 10^{-6} < Re_{co} < 1 \cdot 10^{-2}$

$We_i = u_i^2 d_h \rho_i \sigma^{-1}$	$7,7 \cdot 10^{-7} < We_k < 4,8$	$1,8 \cdot 10^{-8} < We_{po} < 1 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-9} < We_{po} < 1 \cdot 10^{-2}$
	$2,2 \cdot 10^{-8} < We_w < 6,4$	$2,2 \cdot 10^{-8} < We_w < 2,2$	$2 \cdot 10^{-9} < We_{co} < 1 \cdot 10^{-2}$
$Ca_i = \mu_i u_i \sigma^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-6} < Ca_k < 2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-4} < Ca_{po} < 1 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-5} < Ca_{po} < 1 \cdot 10^{-1}$
	$1,2 \cdot 10^{-6} < Ca_w < 2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-6} < Ca_w < 1 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-4} < Ca_{co} < 1,16$
$Oh_i = \mu_i (\rho_i \sigma d_h)^{-1/2}$	$Oh_k = 8,6 \cdot 10^{-3}$	$Oh_{po} = 1,1$	$Oh_{po} = 1,8$
	$Oh_w = 8,1 \cdot 10^{-3}$	$Oh_w = 8,2 \cdot 10^{-3}$	$Oh_{co} = 10$
u_i / u_j	$4 \cdot 10^{-3} < u_w / u_k < 5 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^{-2} < u_w / u_{po} < 1,6 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^{-2} < u_{po} / u_{co} < 1,3 \cdot 10^3$

4.2 Результаты визуализации режимов течения

4.2.1 Визуализация течения керосин – вода

В системе жидкостей керосин – вода обе жидкости обладают относительно малой вязкостью. При этом керосин смачивает стенки микроканала лучше, чем вода: контактный угол керосина – вода–подложка равен 98° для керосина и 130° для воды. Характерные режимы течения, полученные при визуализации течения керосин–вода, представлены на Рис. 55. Для малых чисел Вебера по керосину $10^{-6} < We_k < 10^{-2}$ и по воде $10^{-8} < We_w < 10^{-3}$ характерен снарядный режим течения (снаряды воды в несущей фазе - керосине). При увеличении расхода воды реализуется скользяще-снарядный режим течения (скользящие снаряды керосина в несущей фазе - воде). Скользяще-снарядный режим отличается от снарядного тем, что смачивает не все стенки микроканала и имеет асимметричную форму. Динамика образования снарядов и скользящих снарядов показана на Рис. 56. Параллельный режим течения существует в широком диапазоне чисел Вебера $10^{-4} < We_k < 1$ и по воде $10^{-4} < We_w < 1$. При большом расходе керосина и малом расходе воды реализуется дисперсный (капельный) режим течения с малой концентрацией полидисперсных капель воды. При $We_w < 10^{-5}$ наблюдался периодический отрыв пары капель воды. Ривулетный режим течения существует при больших числах

Вебера одной из жидкостей. Причем ривулет (ручеек) может быть как керосиновый, так и водяной, при этом он является стационарным. Данный режим течения реализуется в области существования кольцевого режима течения, который не наблюдался в экспериментах, поскольку обе жидкости смачивают канал. Кольцевой режим течения реализуется в системах жидкостей, когда одна из них не смачивает стенки микроканала, как, например, в работе Zhao et al. [29]. Наличие ривулетного течения вместо кольцевого является одной из особенностей данных экспериментов.

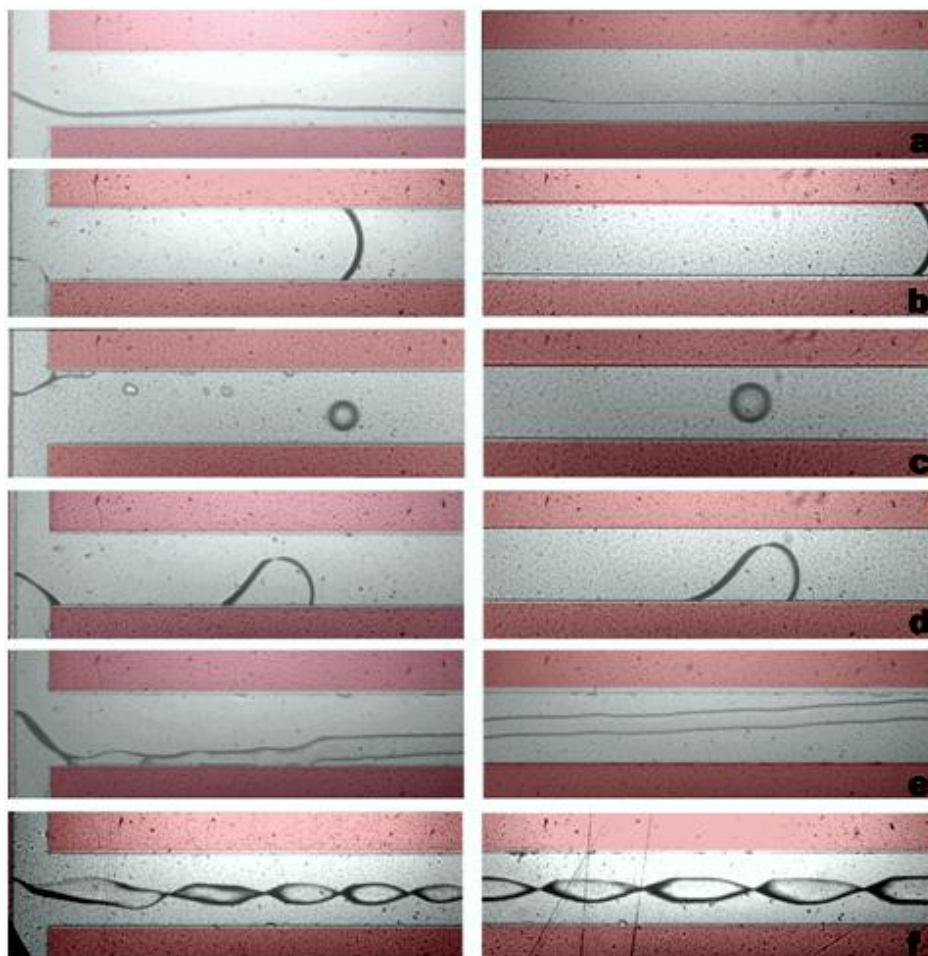


Рис. 55. Режимы течения керосин – вода в Т-области (слева) и в конце канала (справа). а) параллельный режим ($We_k = 1,1 \cdot 10^{-2}$, $We_w = 2,4 \cdot 10^{-6}$) б) снарядный режим ($We_k = 1,1 \cdot 10^{-4}$, $We_w = 4 \cdot 10^{-7}$) в) скользяще-снарядный режим ($We_k = 1,1 \cdot 10^{-4}$, $We_w = 0,43$) д) капельный режим ($We_k = 1,1$, $We_w = 2,6 \cdot 10^{-5}$) е) ривулетный режим ($We_k = 1,1 \cdot 10^{-2}$, $We_w = 4,1$) ф) серпантинный режим ($We_k = 3,1$, $We_w = 4,1$).

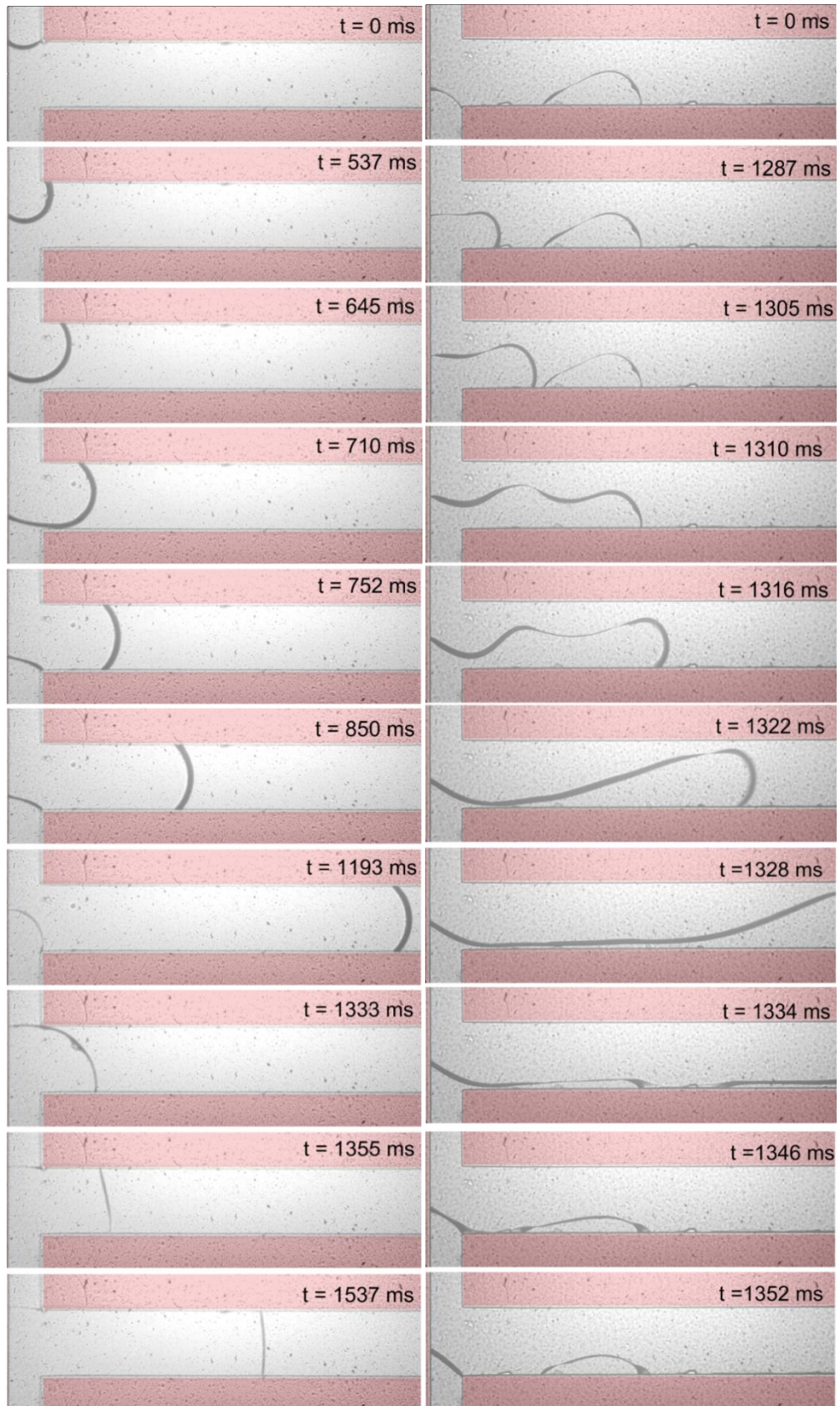


Рис. 56. Динамика образования снарядов воды в керосине $We_k=10^{-4}$, $We_w=4 \cdot 10^{-6}$ (слева) и скользящих снарядов керосина в воде $We_k=7,48 \cdot 10^{-7}$, $We_w=0,25$ (справа).

При числах Вебера $We_k \sim We_w \sim 1$ был обнаружен новый режим параллельного

течения, при котором форма межфазной границы имеет периодическую волновую структуру. Данный режим был назван «серпантинным режимом». При этом интересным фактом является то, что межфазная граница является стационарной не только в области натекания жидкостей, но и в конце канала. Форма межфазной границы показана на Рис. 57. Данный режим сохраняет стационарность вплоть до $We_w < 6$. При дальнейшем увеличении расходов жидкости течение теряет устойчивость, и в T-области возникают хаотические струйки, подобные представленным в работе Zhao et al [29]. Возможным объяснением возникновения такой серпантинной структуры может быть закрутка потока из-за точки неустойчивости, подобно S-образной структуре из главы 3, и адгезия жидкости к стенкам микроканала.

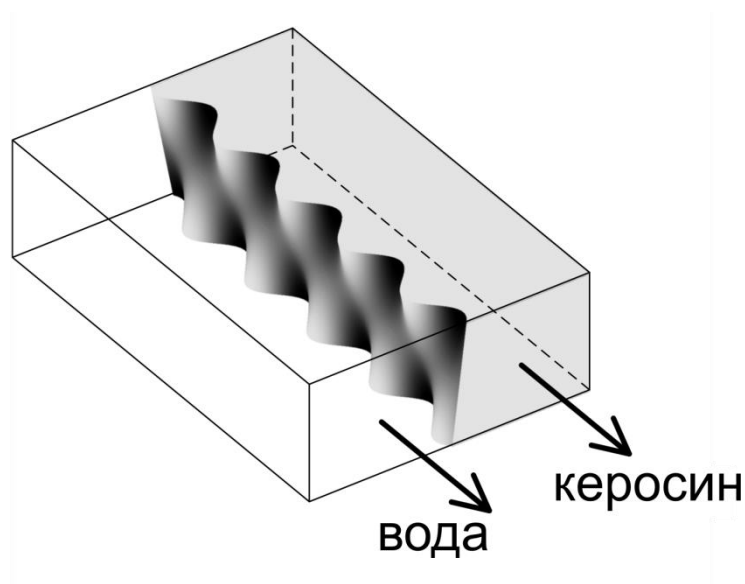


Рис. 57. Трехмерная структура межфазной границы в серпантинном режиме течения.

4.2.2 Визуализация течения парафиновое масло – вода

Система жидкостей парафиновое масло – вода отличается высоким отношением вязкостей фаз $\frac{\mu_{po}}{\mu_w} > 10^2$. Смачиваемость стенок микроканала данными жидкостями почти одинакова, близка к системе жидкостей керосин – вода. Межфазное натяжение также почти не отличается от системы керосин – вода. В результате визуализации были получены следующие режимы течения:

параллельный режим, ривулетный режим, снарядный режим (снаряды воды в масле), скользяще-снарядный режим (снаряды масла в воде) и капельный режим (капли воды в масле). Максимальные числа Вебера для данных жидкостей были ограничены максимальным давлением, создаваемым насосом (6 атм.).

Снаряды воды в масле наблюдались при числах Вебера $10^{-8} < We_{po} < 10^{-4}$ для парафинового масла и $10^{-8} < We_w < 10^{-6}$ для воды. При увеличении числа Вебера парафинового масла реализовывался капельный режим (капли воды в масле). При некоторых режимах наблюдалось объединение капель и их прилипание к стенкам микроканала, что приводило к увеличению диаметра капель вниз по потоку. Параллельный поток жидкостей был зафиксирован при $10^{-8} < We_{po} < 10^{-2}$ и $10^{-6} < We_w < 1$. Для данного набора жидкостей ривулетный режим не был зафиксирован, что, вероятно, связано с ограничением максимального расхода масла шприцевым насосом. Скользяще-снарядный режим (снаряды масла в воде) был зафиксирован при $8,67 \cdot 10^{-7} < We_{po} < 7,8 \cdot 10^{-6}$ и $0,26 < We_w < 1$.

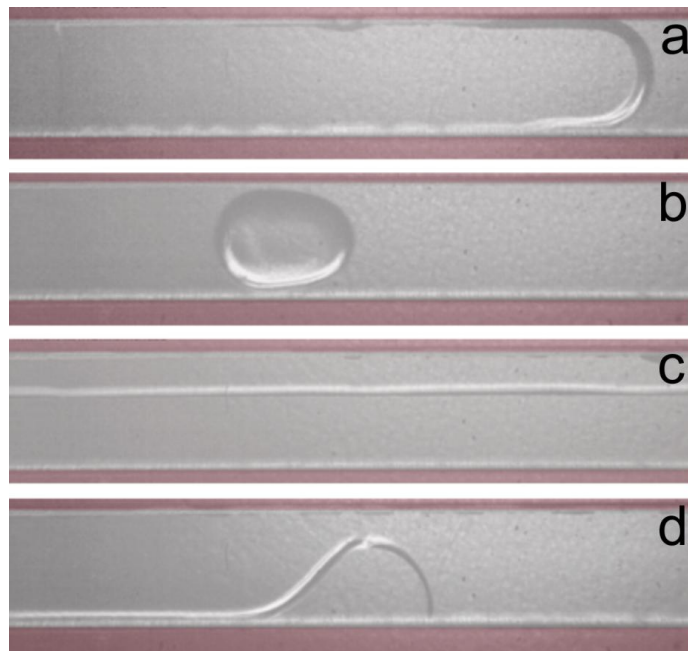


Рис. 58. Режимы течения парафиновое масло – вода в конце канала: а) снарядный режим ($We_{po} = 7,8 \cdot 10^{-6}$, $We_w = 2,3 \cdot 10^{-8}$) б) капельный режим ($We_{po} = 8,8 \cdot 10^{-4}$, $We_w = 2,3 \cdot 10^{-6}$) в) параллельный режим ($We_{po} = 8,8 \cdot 10^{-4}$, $We_w = 0,14$) д) скользяще-снарядный режим ($We_{po} = 8,67 \cdot 10^{-7}$, $We_w = 0,31$).

4.2.3 Визуализация течения парафиновое масло – касторовое масло

Отношение вязкостей в данной системе жидкостей $\frac{\mu_{co}}{\mu_{po}} = 5,9$, при этом вязкость обеих жидкостей высока, по сравнению с системой керосин – вода. Парафиновое масло являлось дисперсной фазой из-за большого контактного угла смачивания в системе парафиновое масло – касторовое масло – подложка. Максимальное число Вебера, как и в предыдущем разделе, было ограничено максимальным давлением шприцевого насоса, и не превышало 10^{-2} . Были обнаружены следующие режимы течения: снарядный, скользяще-снарядный, капельный, ривулетный и параллельный режимы (см. Рис. 59).

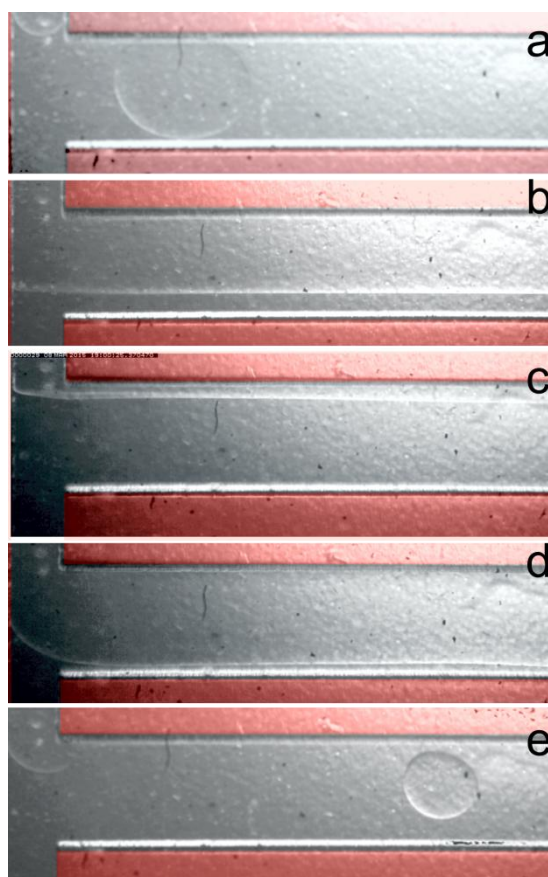


Рис. 59. Режимы течения несмешивающихся жидкостей парафиновое масло – касторовое масло: а) снарядный режим ($We_{po} = 1,4 \cdot 10^{-9}$, $We_{co} = 2,5 \cdot 10^{-8}$) б) параллельный режим ($We_{po} = 8,2 \cdot 10^{-3}$, $We_{co} = 9,1 \cdot 10^{-5}$) в) ривулетный режим ($We_{po} = 2,1 \cdot 10^{-5}$, $We_{co} = 1,5 \cdot 10^{-3}$) г) скользяще-снарядный режим ($We_{po} = 2,3 \cdot 10^{-6}$, $We_{co} = 6,4 \cdot 10^{-9}$) д) капельный режим ($We_{po} = 1,4 \cdot 10^{-9}$, $We_{co} = 4,1 \cdot 10^{-7}$).

4.3 Карты режимов течения несмешивающихся жидкостей

По результатам визуализации течения трех наборов жидкостей были построены карты режимов. По аналогии с другими авторами для построения карт были выбраны числа Вебера, при этом по оси абсцисс располагались числа Вебера для жидкости, которая лучше смачивала стенки микроканала. Отсутствие произвола в выборе чисел Вебера для осей абсцисс и ординат может означать, что даже если обе жидкости смачивают канал, в конкретной их комбинации одна из жидкостей проявляет свойства дисперсной фазы (отложенная по оси ординат), а вторая – несущей (ось абсцисс). В частности это может приводить к тому, что такие режимы, как капельный и скользяще-снарядный могут существовать только для одной из жидкостей в паре. Именно для этих режимов силы поверхностного натяжения являются доминирующими. Напротив, для параллельного или ривулетного режима течений, где силы поверхностного натяжения не являются определяющими, ни одна из фаз не может быть названа дисперсной. Например, для течения керосин-вода ривулетный режим течения существует для обеих фаз.

Анализ карт режимов (Рис. 60) показал, что относительное расположение режимов течения на карте для каждого из наборов жидкостей сохраняется, однако границы режимов сдвинуты влево на два порядка для системы парафиновое масло – вода и на три порядка для системы парафиновое масло – касторовое масло по сравнению с системой керосин – вода. То есть, чем более высокой вязкостью обладает жидкость, тем более сдвинута карта режимов. Карты режимов, построенные в одних осях по числам Вебера для трех наборов жидкостей, представлены на Рис. 61 а. Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что карты, построенные по числам Вебера, не являются универсальными, так как не учитывают вязкость жидкостей.

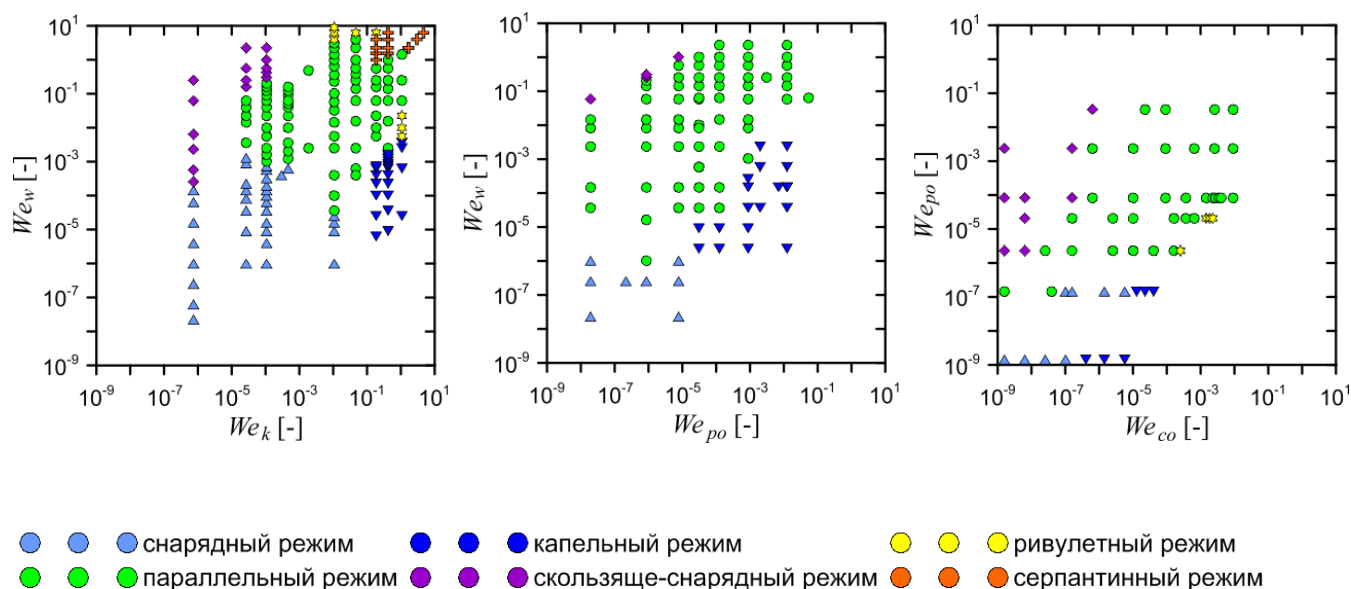


Рис. 60. Карты режимов течения несмешивающихся жидкостей. Слева направо: керосин – вода, парафиновое масло – вода, парафиновое масло – касторовое масло.

Для обобщения полученных результатов был проведен анализ размерностей физических величин, влияющих на режимы течения. Перечислим основные параметры, влияющие на режим течения: гидравлический диаметр канала, вязкость, межфазное натяжение и плотность жидкостей, приведенная скорость. В Таблица 7 приведены размерности данных величин в терминах основных величин: L – длины, M – массы, T – времени.

Таблица 7. Размерности физических величин, влияющих на режим течения несмешивающихся жидкостей.

d_h , м	L
μ , Па·с	$ML^{-1}T^{-1}$
σ , Н/м	MT^{-2}
ρ , кг/м ³	ML^{-3}
u , м/с	LT^{-1}

Полагаем, что существует безразмерный параметр, определяющий режим течения несмешивающихся жидкостей, выраженный степенной функцией всех физических величин, входящих в Таблица 7 [90]. Данный параметр Π , имеющий размерность $M^0 L^0 T^0$:

$$\Pi = a d_h^\alpha \mu^\beta \sigma^\gamma \rho^\delta u^\varepsilon \quad (4.1)$$

Заменим размерности соответствующих физических величин и приравняем степени при основных величинах слева и справа.

Уравнение для степеней при массе M :

$$\beta + \gamma + \delta = 0 \quad (4.2)$$

Уравнение для степеней при длине L :

$$\alpha - \beta - 3\delta + \varepsilon = 0 \quad (4.3)$$

Уравнение для степеней при времени T :

$$-\beta - 2\gamma - \varepsilon = 0 \quad (4.4)$$

Если бы уравнений было столько же, сколько переменных, каждая из них могла быть строго определена. В данном случае этого добиться нельзя. Однако можно выразить степени α , γ и δ в терминах степеней ε и β :

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\beta}{2} \\ \gamma &= -\frac{\varepsilon}{2} - \frac{\beta}{2} \\ \delta &= \frac{\varepsilon}{2} - \frac{\beta}{2} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Тогда параметр Π принимает следующий вид:

$$\Pi = d_h^{\frac{\varepsilon-\beta}{2}} \mu^\beta \sigma^{\frac{-\varepsilon-\beta}{2}} \rho^{\frac{\varepsilon-\beta}{2}} u^\varepsilon \quad (4.6)$$

Скомбинируем физические величины при одинаковых экспонентах:

$$\Pi = \left(\frac{d_h \rho u^2}{\sigma} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \cdot \left(\frac{\mu^2}{d_h \sigma \rho} \right)^{\frac{\beta}{2}} = (We)^{\frac{\varepsilon}{2}} \cdot (Oh)^\beta \quad (4.7)$$

где $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{d_h \sigma \rho}}$ – число Онезорге, определяющее отношение вязкой диссипации к силам поверхностного натяжения.

Физический смысл числа Онезорге можно получить, умножив его числитель и знаменатель на квадрат гидравлического диаметра канала и приведенную скорость:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{d_h \sigma \rho}} = \frac{\mu u d_h^2}{\sqrt{d_h^3 \sigma \rho u^2}} = \frac{\mu \frac{u}{d_h} d_h^2 * d_h}{\sqrt{(\rho u^2 d_h^3) * (\sigma d_h^2)}} \quad (4.8)$$

В числителе стоит диссипация энергии за счет вязкостных сил, в знаменателе – геометрическое среднее кинетической энергии системы и поверхностной энергии. Чем меньше число Онезорге, тем слабее потери на трение из-за сил вязкости, т.е. большая часть энергии переходит в энергию создания новой поверхности за счет сил поверхностного натяжения, и формируется капля. При высоких значениях числа Онезорге вся энергия системы диссипирует за счет вязкостных сил, и капли не формируются.

Объединение карт режимов для трех наборов жидкостей показало, что значение параметров $\varepsilon = 2$ and $\beta = 1$ позволяет получить безразмерный параметр для построения универсальной карты режимов для проведенных экспериментов. Универсальная карта режимов, построенная в координатах $We \cdot Oh$, представлена на Рис. 61. Центральную область карты режимов занимает параллельный режим течения, который реализуется при $10^{-7} < We_{cp} \cdot Oh_{cp} < 10^{-2}$ для несущей фазы и $10^{-7} < We_{dp} \cdot Oh_{dp} < 10^{-2}$ для дисперсной фазы. Уменьшение данного параметра для дисперсной фазы приводит к переходу к капельному и снарядному режимам течения. Параллельный поток переходит в ривулетный при увеличении $We \cdot Oh$ для дисперсной или несущей фаз. Из Рис. 61 в видно, что режимы потока для различных наборов жидкостей хорошо накладываются друг на друга. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенный безразмерный параметр является более универсальным при построении карт режимов, чем число Вебера.

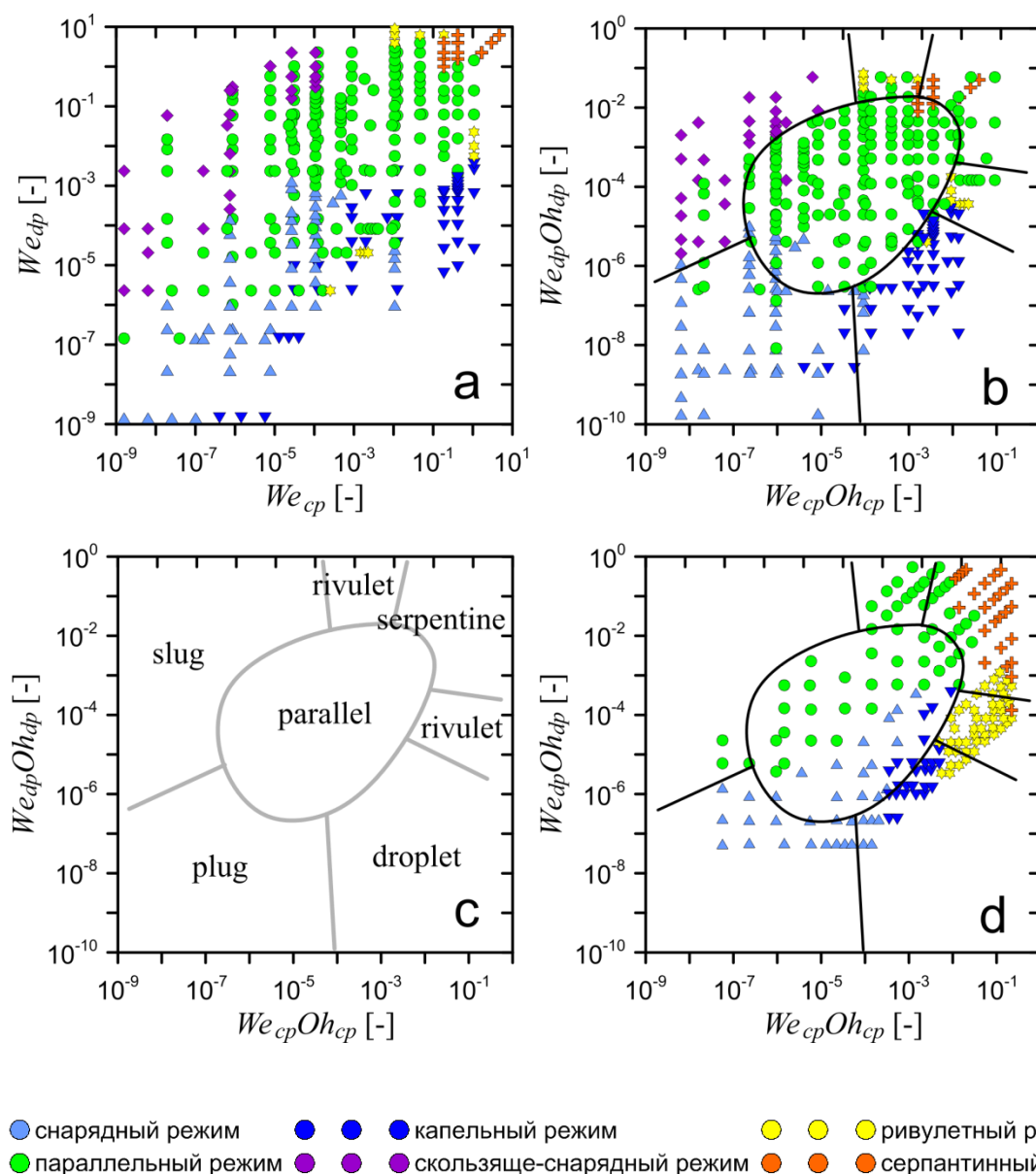


Рис. 61. а) Карты режимов течения для трех наборов жидкостей, построенные в одних осях по числу Вебера b) карты режимов течения для трех наборов жидкостей, построенные в координатах $We \cdot Oh$ c) универсальная карта режимов d) сравнение с результатами Y. Zhao et al. [29]. Легенда для карты режимов: \blacktriangle – снарядный режим, \bullet – параллельный режим, \blacktriangledown – монодисперсный капельный режим, \odot – полидисперсный капельный режим, \oplus – кольцевой режим.

Для проверки универсальности предложенного безразмерного параметра было выполнено сравнение режимных карт, полученных в данной работе с результатами работы Y. Zhao et al. [29]. На Рис. 61 d нанесены маркеры, соответствующие режимам, полученным в работе Y. Zhao и др., и линии, соответствующие границам режимов в экспериментах из данной работы. Y. Zhao с соавторами использовали комбинацию жидкостей керосин – вода. Однако,

стенки канала были обработаны так, что канал был гидрофильным, то есть керосин являлся дисперсной фазой, а вода несущей. Исходя из изложенных выше правил, новый критерий для несущей фазы откладывается по оси абсцисс, а для дисперсной – по оси ординат. Видно, что для параллельного режима, снарядного и капельного режима наблюдается относительно неплохое совпадение областей существования. Скользяще-снарядный режим в работе Y. Zhao и др. отсутствует, а режимы с мелкодисперсными каплями и кольцевой режим течения находятся в области существования ривулетного и параллельного режима течения из полученной в данной работе карты.

Дальнейшая верификация предложенного в данной работе безразмерного критерия была проведена в работе Z. Cao et al. [91]. Авторы данной работы выполнили визуализацию режимов течения трех наборов несмешивающихся жидкостей: бутанол – вода, толуол – вода и гексан – вода. В качестве рабочих участков использовались две геометрии микроканалов: микроканал Т-типа 600x300x300 мкм и микроканалы с крестообразным входом четырех конфигураций с различным отношением глубины к ширине. Авторы применили предложенный в рамках данной диссертации критерий $We \cdot Oh$ для определения границ режимов течения. На Рис. 62 а показана граница между снарядным и кольцевым режимами течения для наборов вода – бутанол и вода – толуол. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,98, таким образом, критерий $We \cdot Oh$ позволяет определить границу между снарядным и кольцевым режимом течения независимо от свойств жидкостей. На Рис. 62 б Z. Cao и др. представили границы между снарядным, капельным и параллельным режимами для течения бутанол – вода в Т-образном канале, а также данные по границам между режимами течения керосин – вода в Т-образном канале из работы Y. Zhao et al. [29]. Границы между параллельным и снарядным режимами течения совпадают с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$, для границы между снарядным и капельным режимами течения $R^2 = 0,95$. Все вышеизложенное подтверждают, что критерий $We \cdot Oh$ эффективно работает и может применяться для построения универсальных карт режимов независимо от физических свойств жидкостей.

В работе M. Darekar et al. [92] применили предложенный здесь критерий $We \cdot Oh$ для построения карт режимов для течения несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканалах Y-типа. Авторы также подтвердили, что данный критерий позволяет построить универсальную карту режимов для всех используемых наборов жидкостей, в отличие от других критериев (число Вебера, капиллярное число, приведенная скорость фаз).

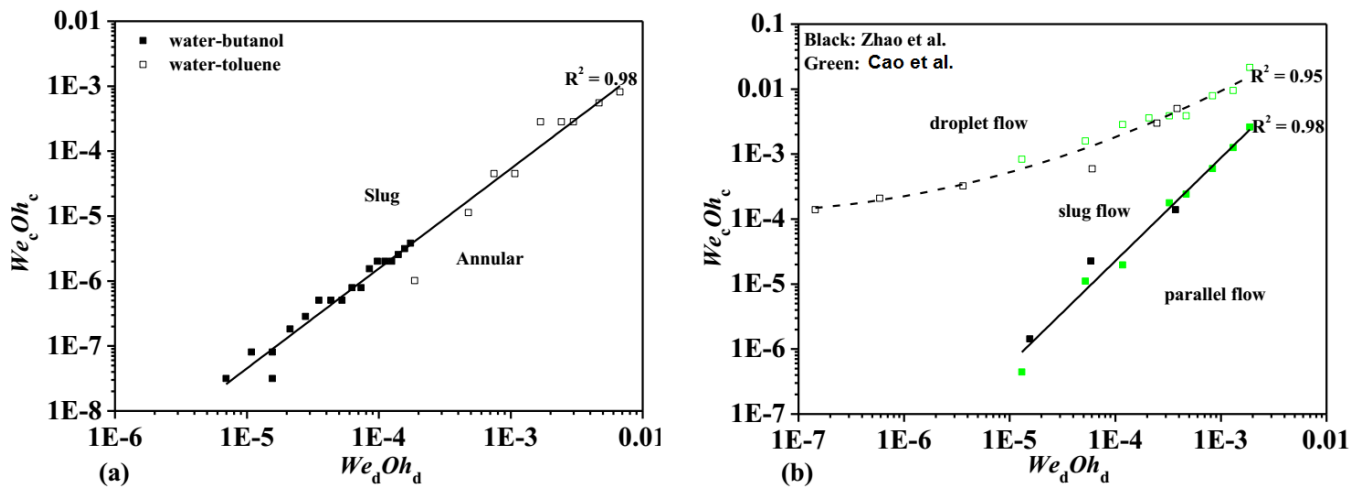


Рис. 62. а) Граница между снарядным и кольцевым режимом течения для наборов жидкостей вода – бутанол и вода – толуол [91]. б) границы между капельным и снарядным и между снарядным и параллельным режимом течения.

4.4 Снарядный режим течения несмешивающихся жидкостей

Снарядный режим течения несмешивающихся жидкостей представляет большой интерес в связи с его применением во многих технологических приложениях, таких как производство эмульсий, проведение химических реакций, в том числе процессов экстракции, синтез наноматериалов и т.д. Для разработки микроканальных устройств применительно к данным приложениям необходима экспериментальная информация и гидродинамике течения снарядного режима. Так, например, скорость химических реакций определяется скоростью движения снарядов, их длиной и циркуляцией внутри снарядов. В данном разделе описано экспериментальное исследование гидродинамики течений снарядного режима течения для трех наборов несмешивающихся жидкостей.

Форма снарядов для каждого из наборов жидкостей представлена на Рис. 63. Для

течения керосин – вода и парафиновое масло – вода снаряды имеют схожую форму: передняя кромка снаряда является выпуклой, задняя кромка – вогнутой, тогда как в случае течения парафиновое масло – касторовое масло снаряд имеет выпуклую переднюю и заднюю кромку. В первых двух случаях обе жидкости почти одинаково смачивают микроканал, статические контактные углы, измеренные в системе жидкость–жидкость–подложка, больше 90° . Более того, значение контактного угла в значительной степени зависит от жидкости предшественника (например, для системы парафиновое масло – вода контактный угол для воды равен 121° , когда жидкостью предшественником является парафиновое масло, и 65° в обратном случае). Данный факт указывает на наличие значительных сил адгезии между жидкостью и стенками микроканала, которые приводят к формированию контактной линии. В случае течения касторовое масло – парафиновое масло касторовое масло смачивает стенки микроканала намного лучше, контактные углы практически не зависят от жидкости – предшественника (25° and 28° для касторового масла, 155° and 152° для парафинового масла), между снарядом и стенками микроканала формируется пленка несущей фазы.

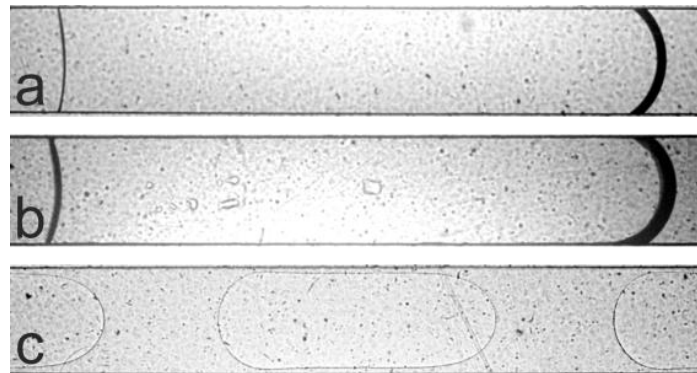


Рис. 63. Снарядный режим течения а) снаряды воды в керосине б) снаряды воды в парафиновом масле в) снаряды парафинового масла в касторовом масле.

На основе картин визуализации снарядного режима течения были измерены длины снарядов для всех наборов жидкостей. На Рис. 64 представлена зависимость безразмерной длины снаряда L_{plug}/d_h от отношения расходов жидкостей. Суммарный расход жидкостей варьировался посредством изменения расхода дисперсной фазы и поддержания постоянным расход несущей фазы (так,

что числа Вебера для керосина, парафинового масла и касторового масла равнялись $5,2 \cdot 10^{-4}$, $2,1 \cdot 10^{-6}$ и $1,6 \cdot 10^{-7}$, соответственно). Длины снарядов измерялись с помощью программного пакета ImageJ. Погрешность измерений составила 5 пикселей, что соответствует 10 мкм. Для каждого из расходов были измерены длины нескольких снарядов и проведено усреднение. Стандартное отклонение измеренной длины не превышало 5%. Как видно из Рис. 64, для всех наборов жидкостей длина снарядов растет с увеличением суммарного расхода, однако зависимость длины от расхода для набора касторовое масло – вода отличается от зависимости для наборов керосин – вода и парафиновое масло – вода. Данное различие вызвано отличием в свойствах смачиваемости данных систем.

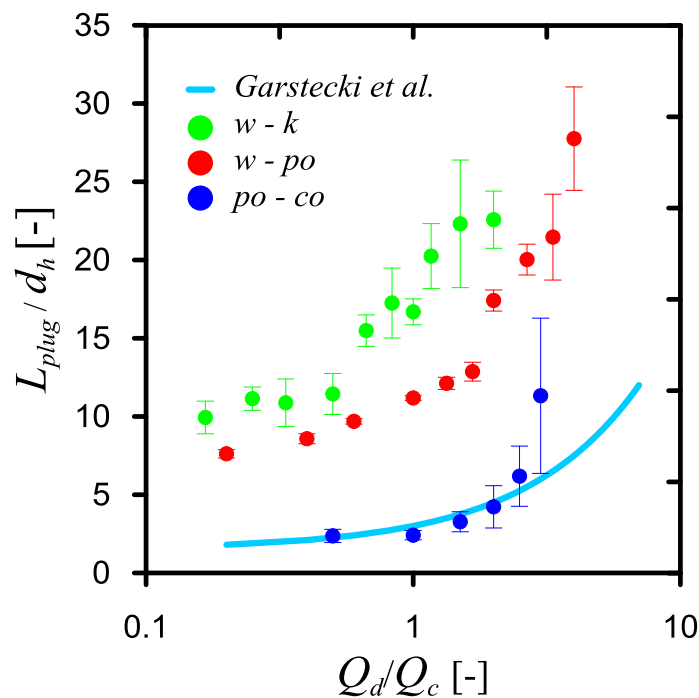


Рис. 64. Безразмерная длина снарядов в зависимости от суммарной среднерасходной скорости. Сплошная линия отвечает зависимости (1.9)(1.9), предложенной в работе P. Garstecki et al.[38].

Длины снарядов, рассчитанные по формуле (1.9), предложенной P. Garstecki et al. [38], с коэффициентом $s = 1$, представлены на графике сплошной линией. Рассчитанные длины снарядов совпадают с измеренными только для набора жидкостей касторовое масло – парафиновое масло. Как упомянуто в работе P. Garstecki et al. [38], переход от режима “squeezing” к “dripping” происходит при

числах $Ca \sim 10^{-2}$. В настоящих экспериментах значения капиллярного числа не превышали 10^{-2} для течения касторовое масло – парафиновое масло и 10^{-3} для течения других наборов жидкостей. Более того, в режиме “dripping” длина снарядов сравнима с шириной канала. Таким образом, можно сделать вывод, что несоответствие измеренных и рассчитанных данных не определяется переходом в режим “dripping”.

Рассмотрим механизм формирования снарядов для течения касторовое масло – парафиновое масло и керосин – вода. Картины течения в последовательные моменты времени представлены на Рис. 65 (слева и справа, соответственно). Механизм формирования снарядов в системе жидкостей парафиновое масло – вода такой же, что и для системы жидкостей керосин – вода, в связи с этим не представлен на Рис. 65. При течении касторового масла и парафинового масла процесс отрыва снаряда идентичен описанному в работе [38]. Капля дисперсной фазы растет, заполняя собой всю ширину смешивающего канала, и затем непрерывная фаза выдавливает каплю. Перешеек дисперсной фазы, соединяющий каплю, постепенно истончается, происходит отрыв капли. Так как парафиновое масло не смачивает стенки микроканала в системе касторовое масло – парафиновое масло, контактной линии не образуется.

Для набора керосин – вода первый этап отрыва капли схож со случаем касторовое масло – парафиновое масло. Однако когда дисперсная фаза достигает противоположную стенку микроканала, устанавливается контактная линия, и поток непрерывной фазы блокируется задней кромкой формирующегося снаряда. Давления непрерывной фазы недостаточно для преодоления сил адгезии и сдвига контактной линии. Тем временем поток дисперсной фазы наполняет снаряд до тех пор, пока толщина перешейка не становится постоянной. В конце концов, давление несущей фазы достигает значений, способных преодолеть силы адгезии, сдвинуть контактную линию и выдавить снаряд. Задняя кромка снаряда движется вниз по потоку и перешеек, соединяющий снаряд, разрывается. Данный механизм формирования снаряда с установлением контактной линии объясняет, почему

длины снарядов значительно превышают рассчитанные значения.

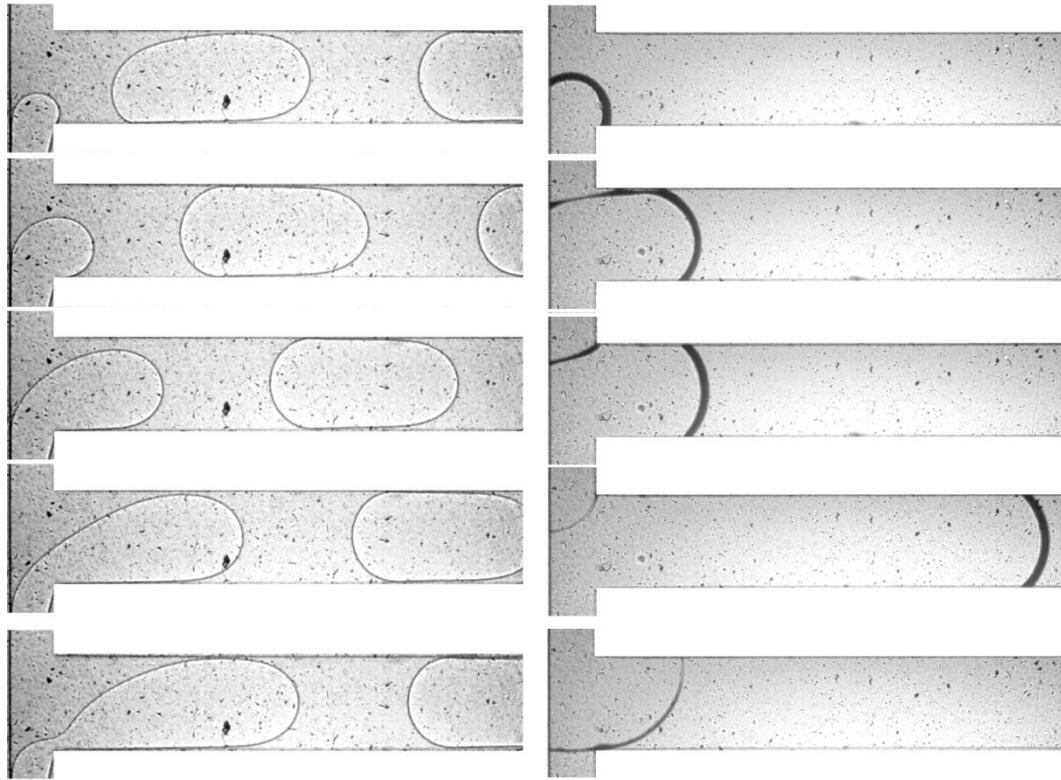


Рис. 65. Механизм формирования снарядов в Т-области. Слева: снаряды парафинового масла в касторовом масле, справа: снаряды воды в керосине.

Для измерения скорости движения снарядов был также использован программный пакет ImageJ. Относительная погрешность измерений составила 5%. Стандартное отклонение измеренных скоростей не превышало 10%. По результатам измерений было установлено, что скорость снарядов u_{plug} пропорциональна суммарной среднерасходной скорости с коэффициентом пропорциональности k равным 1,21, 1 и 1,81 для наборов жидкостей керосин – вода, парафиновое масло – вода и касторовое масло – парафиновое масло, соответственно. В случае течения керосин – вода коэффициент $k=1,21$ означает наличие керосиновых ручейков, движущихся в углах канала, так что снаряды движутся быстрее среднерасходной скорости. Для течения парафиновое масло – вода $u_{\text{plug}} = u_{\text{bulk}}$, что означает, что снаряды заполняют все сечение микроканала. Для течения касторовое масло – парафиновое масло $k = 1.81$ означает, что снаряды полностью окружены касторовым маслом, что позволяет им двигаться значительно быстрее, чем суммарный поток жидкостей. Данная аппроксимация

скорости снарядов хорошо согласуется с результатами работы Salim et al. [26], где коэффициент пропорциональности был равен 1,28 для снарядов масла в воде.

С помощью метода micro-PIV были измерены поля скорости в области формирования снарядов и в конце канала для течения керосин – вода. Флуоресцентные трассеры средним диаметром 3,2 мкм добавлялись в водную фазу. На Рис. 66 представлены мгновенные поля скорости в центральном сечении микроканала в различные фазы формирования снаряда воды. Можно видеть, что после установления контактной линии скорость дисперсной фазы значительно возрастает.

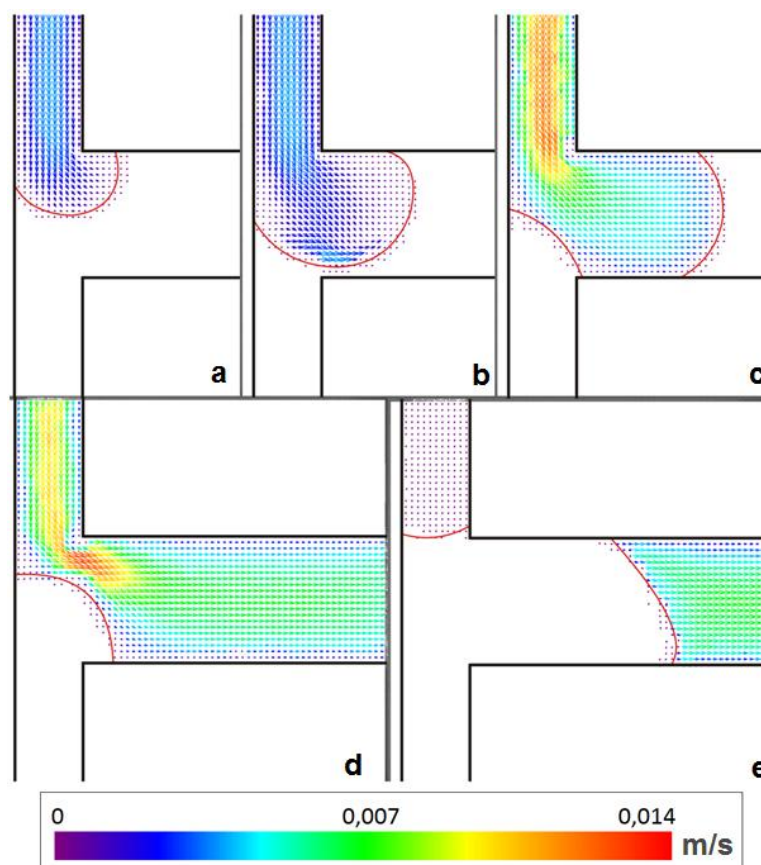


Рис. 66. Мгновенные поля скорости в центральном сечении снаряда в различные моменты формирования снаряда при течении керосин – вода.

Картина распределения трассеров и мгновенное поле скорости в снаряде в конце микроканала представлены на Рис. 67. На оси снаряда скорость потока максимальная, при этом она уменьшается при удалении от оси снаряда к стенкам микроканала. На Рис. 67 с показано поле скорости в системе отсчета движущегося снаряда. Можно видеть два контура циркуляции слева и права от оси снаряда.

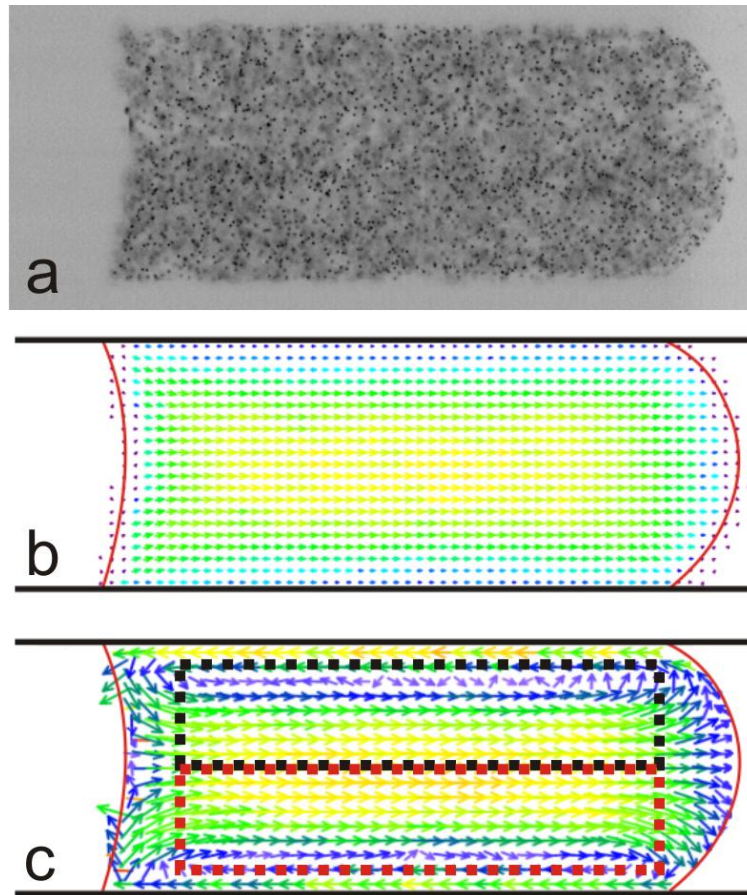


Рис. 67. а) Изображение трассеров в снаряде, градация серого инвертирована б) Мгновенное поле скорости в центральном сечении снаряда в конце микроканала с) Зоны циркуляции в снаряде.

На основе измеренных мгновенных полей скорости в снарядах была рассчитана циркуляция скорости для различных суммарных расходов фаз. Циркуляция скорости рассчитывалась на основе теоремы Грина посредством интегрирования поля завихренности по поверхности, показанной черным и красным контурами на Рис. 67 с. Разница между циркуляцией скорости для красного и черного контуров не превышала 10%. Рассчитанная циркуляция, нормированная на площадь поверхности интегрирования, для красного и черного контуров представлена на графике Рис. 68 в зависимости от скорости снаряда. С увеличением скорости снарядов циркуляция скорости растет линейно.

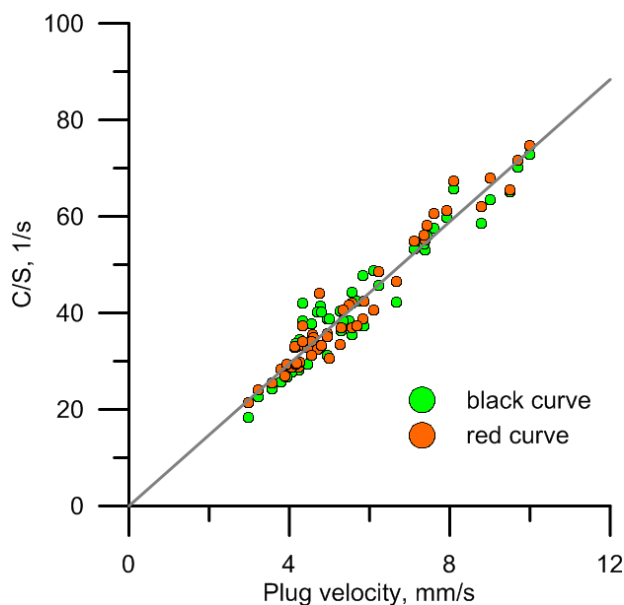


Рис. 68. Зависимость циркуляции скорости от скорости снаряда.

4.5 Выводы по главе 4

- Проведены комплексные экспериментальные исследования течения несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканале Т-типа. Обнаружен новый, серпантинный, режим течения, в котором граница раздела между жидкостями имеет периодическую волновую структуру.
- Показано, что для наборов несмешивающихся жидкостей с различными вязкостями число Вебера не является универсальным критерием для построения карт режимов течения. При этом карты режимов, построенные по числу Вебера, являются подобными друг другу, но границы между режимами сдвинуты по числам Вебера для наборов с различными вязкостями.
- Предложен новый универсальный параметр $We \cdot Oh$, позволяющий учесть вязкость несмешивающихся жидкостей при построении карт режимов. Проведена верификация данного параметра на экспериментальных данных других авторов.
- Проведено подробное исследование снарядного режима при тчении несмешивающихся жидкостей с контактной линией и без контактной линии.

Получены зависимости длины и скорости снарядов. Показано, что механизм формирования снарядов с установлением контактной линии приводит к значительно более высоким значениям длин снарядов. Проведены измерения мгновенных полей скорости в снарядах, показано, что циркуляция скорости в снарядах прямо пропорциональна среднерасходной скорости.

Результаты, описанные в главе, опубликованы в работах [6-8], [18-24], [26-27] из списка публикаций.

Заключение

Основными результатами работы являются следующие:

1. Разработаны оптические бесконтактные полевые методики *micro-PIV* и *micro-LIF* для измерения полей скорости и концентраций с микронным разрешением. Предложена модель оценки пространственного усреднения метода *micro-LIF*, позволяющая проводить адекватную интерпретацию экспериментальных данных и верификацию данных численного моделирования. Проведена апробация методики *micro-PIV* при измерении полей скорости в прямом прямоугольном микроканале, измерении полей скорости в потоках со свободной поверхностью (испаряющиеся капли на подложке) и в пульсирующих потоках с использованием метода фазового осреднения.
2. Проведено комплексное экспериментальное исследование гидродинамики течения однофазного потока и режимов перемешивания в микромиксере Т-типа с помощью методов *micro-PIV* и *micro-LIF*. Показано, что в зависимости от числа Re распределение скорости в канале существенно изменяется. Анализ профилей скорости и изоповерхностей поперечной скорости позволил получить критическое число Рейнольдса, при котором происходит переход к вихревому режиму течения ($120 < Re < 150$). Показано резкое повышение эффективности перемешивания при достижении критического числа Рейнольдса. Предложен и успешно верифицирован алгоритм для проведения сравнения экспериментальных полей концентраций с результатами численного моделирования.
3. Проведено комплексное экспериментальное исследование течения несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с отношением вязкостей, варьирующимся в широком диапазоне. Предложен новый безразмерный параметр, учитывающий вязкость жидкостей и позволяющий построить универсальную карту режимов для течений несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа. Проведено подробное исследование

снарядного режима при течении несмешивающихся жидкостей с контактной линией и без контактной линии. Получены зависимости длины, скорости снарядов и циркуляции скорости в снарядах от параметров потока.

Список литературы

1. Némethné-Sóvágó J., Benke M. Microreactors: a new concept for chemical synthesis and technological feasibility // Mater. Sci. Eng. 2014. Vol. 39, № 2. P. 89–101.
2. Bothe D., Stemich C., Warnecke H.J. Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer // Chem. Eng. Sci. 2006. Vol. 61, № 9. P. 2950–2958.
3. Cybulski A. et al. 5 - Process Development BT - Fine Chemicals Manufacture // Fine Chem. Manuf. Technol. Eng. 2001. P. 193–413.
4. Kockmann N. et al. Liquid mixing in static micro mixers with various cross sections // Int. Conf. Microchannels Minichannels. 2003. Vol. 1, № 1992. P. 911–918.
5. Dreher S., Kockmann N., Woias P. Characterization of Laminar Transient Flow Regimes and Mixing in T-shaped Micromixers // Heat Transf. Eng. 2009. Vol. 30, № 1–2. P. 91–100.
6. Kockmann N. et al. Fluid dynamics and transfer processes in bended microchannels // Heat Transf. Eng. 2005. Vol. 26, № 3. P. 71–78.
7. Danckwerts P. V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures // Appl. Sci. Res. Sect. A. 1952. Vol. 3, № 4. P. 279–296.
8. Soleymani A., Kolehmainen E., Turunen I. Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micromixers // Chem. Eng. J. 2007. Vol. 135, № SUPPL. 1.
9. Soleymani A., Yousefi H., Turunen I. Dimensionless number for identification of flow patterns inside a T-micromixer // Chem. Eng. Sci. 2008. Vol. 63, № 21. P. 5291–5297.
10. Engler M. et al. Numerical and experimental investigations on liquid mixing in static micromixers // Chem. Eng. J. 2004. Vol. 101, № 1–3. P. 315–322.
11. Wong S.H., Ward M.C.L., Wharton C.W. Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer // Sensors Actuators, B Chem. 2004. Vol. 100, № 3. P. 359–379.
12. Hoffmann M., Schlüter M., Rübiger N. Experimental investigation of liquid-liquid

- mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV // *Chem. Eng. Sci.* 2006. Vol. 61, № 9. P. 2968–2976.
13. Christopher G.F., Anna S.L. Microfluidic methods for generating continuous droplet streams // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2007. Vol. 40, № 19. P. R319–R336.
 14. Okushima S. et al. Controlled production of monodisperse double emulsions by two- step droplet breakup in microfluidic devices // *Langmuir*. 2004. Vol. 20, № 23. P. 9905–9908.
 15. Vladislavljević G.T., Al Nuamani R., Nabavi S.A. Microfluidic production of multiple emulsions // *Micromachines*. 2017. Vol. 8, № 3.
 16. Zhao C.X. et al. Nanoparticle synthesis in microreactors // *Chem. Eng. Sci.* Elsevier, 2011. Vol. 66, № 7. P. 1463–1479.
 17. Li Y. et al. Geometric optimization of liquid-liquid slug flow in a flow-focusing millifluidic device for synthesis of nanomaterials // *Chem. Eng. J.* 2013. Vol. 217. P. 447–459.
 18. Ducry L., Roberge D.M. Controlled autocatalytic nitration of phenol in a microreactor // *Angew. Chemie - Int. Ed.* 2005. Vol. 44, № 48. P. 7972–7975.
 19. Novak U. et al. Ionic liquid-based aqueous two-phase extraction within a microchannel system // *Sep. Purif. Technol.* 2012. Vol. 97. P. 172–178.
 20. Zhao Y., Chen G., Yuan Q. Liquid–Liquid Two-Phase Mass Transfer in the T-Junction Microchannels // *AIChE J.* 2007. Vol. 53, № 12. P. 3042–3053.
 21. Benavides J. et al. Extraction and Purification of Bioproducts and Nanoparticles using Aqueous Two-Phase Systems Strategies // *Chem. Eng. Technol.* 2008. Vol. 31, № 6. P. 838–845.
 22. Weibel D.B., Whitesides G.M. Applications of microfluidics in chemical biology // *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2006. Vol. 10, № 6. P. 584–591.
 23. Kashid M.N., Agar D.W. Hydrodynamics of liquid-liquid slug flow capillary microreactor: Flow regimes, slug size and pressure drop // *Chem. Eng. J.* 2007. Vol. 131, № 1–3. P. 1–13.
 24. Lan F. et al. Single-cell genome sequencing at ultra-high-throughput with microfluidic droplet barcoding // *Nat. Biotechnol.* Nature Publishing Group, 2017.

- Vol. 35, № 7. P. 640–646.
25. Tran T.M. et al. From tubes to drops: droplet-based microfluidics for ultrahigh-throughput biology // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2013. Vol. 46, № 11. P. 114004.
 26. Salim A. et al. Oil-water two-phase flow in microchannels: Flow patterns and pressure drop measurements // *Can. J. Chem. Eng.* 2008. Vol. 86, № 6. P. 978–988.
 27. Foroughi H., Kawaji M. Viscous oil-water flows in a microchannel initially saturated with oil: Flow patterns and pressure drop characteristics // *Int. J. Multiph. Flow.* Elsevier Ltd, 2011. Vol. 37, № 9. P. 1147–1155.
 28. Kashid M., Kiwi-Minsker L. Quantitative prediction of flow patterns in liquid-liquid flow in micro-capillaries // *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* Elsevier B.V., 2011. Vol. 50, № 10. P. 972–978.
 29. Zhao Y., Chen G., Yuan Q. Liquid-Liquid Two-Phase Flow Patterns in a Rectangular Microchannel // *AIChE J.* 2006. Vol. 52, № 12. P. 4052–4060.
 30. Kashid M.N. et al. Numbering-up and mass transfer studies of liquid-liquid two-phase microstructured reactors // *Chem. Eng. J.* Elsevier B.V., 2010. Vol. 158, № 2. P. 233–240.
 31. Dessimoz A.L. et al. Quantitative criteria to define flow patterns in micro-capillaries // *Chem. Eng. J.* Elsevier B.V., 2010. Vol. 160, № 3. P. 882–890.
 32. Waelchli S., Rudolf von Rohr P. Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors // *Int. J. Multiph. Flow.* 2006. Vol. 32, № 7. P. 791–806.
 33. Burns J.R., Ramshaw C. The intensification of rapid reactions in multiphase systems using slug flow in capillaries. // *Lab Chip.* 2001. Vol. 1, № 1. P. 10–15.
 34. Dumann G. et al. The capillary-microreactor: A new reactor concept for the intensification of heat and mass transfer in liquid-liquid reactions // *Catal. Today.* 2003. Vol. 79–80. P. 433–439.
 35. Kashid M.N. et al. Internal circulation within the liquid slugs of a liquid-liquid slug-flow capillary microreactor // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2005. Vol. 44, № 14. P. 5003–5010.
 36. Thorsen T. et al. Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic

- device // *Phys. Rev. Lett.* 2001. Vol. 86, № 18. P. 4163–4166.
37. Taylor G.I. The Formation of Emulsions in Definable Fields of Flow // *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1934. Vol. 146, № 858. P. 501–523.
 38. Garstecki P. et al. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction — scaling and mechanism of break-up. 2006. P. 437–446.
 39. De Menech M. et al. Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction // *J. Fluid Mech.* 2008. Vol. 595. P. 141–161.
 40. Xu J.H. et al. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: From squeezing to dripping // *Microfluid. Nanofluidics.* 2008. Vol. 5, № 6. P. 711–717.
 41. Xu J.H. et al. Shear force induced monodisperse droplet formation in a microfluidic device by controlling wetting properties. 2006. P. 131–136.
 42. Xu J.H. et al. Controllable Preparation of Monodisperse O/W and W/O Emulsions in the Same Microfluidic Device. 2006. Vol. 22, № 19. P. 2004–2007.
 43. Xu J.H. et al. Preparation of Highly Monodisperse Droplet in a T-Junction Microfluidic Device. 2006. Vol. 52, № 9. P. 3005–3010.
 44. Tan J. et al. Drop dispenser in a cross-junction microfluidic device : Scaling and mechanism of break-up. 2008. Vol. 136. P. 306–311.
 45. Santiago J.G. et al. A particle image velocimetry system for microfluidics // *Exp. Fluids.* 1998. Vol. 25, № 4. P. 316–319.
 46. Meinhart C.D., Wereley S.T., Gray M.H.B. Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.* 2000. Vol. 11, № 6. P. 809–814.
 47. Olsen M.G., Adrian R.J. Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry // *Exp. Fluids.* 2000. Vol. 29, № SUPPL. 1. P. 166–174.
 48. Bourdon C.J., Olsen M.G., Gorby A.D. Validation of an analytical solution for depth of correlation in microscopic particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.* 2004. Vol. 15, № 2. P. 318–327.
 49. Bourdon C.J., Olsen M.G., Gorby A.D. The Depth of Correlation in Micro-PIV

- for High Numerical Aperture and Immersion Objectives // *J. Fluids Eng.* 2006. Vol. 128, № 4. P. 883–886.
50. Meinhart C.D., Wereley S.T. The theory of diffraction-limited resolution in microparticles image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.* 2003. Vol. 14. P. 1047–1053.
 51. Mielnik M.M., Saetran L.R. Selective seeding for micro-PIV // *Exp. Fluids.* 2006. Vol. 41. P. 155–159.
 52. Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G. A PIV Algorithm for Estimating Time-Averaged Velocity Fields // *J. Fluids Eng.* 2000. Vol. 122, № 2. P. 285–289.
 53. Westerweel J., Geelhoed P.F., Lindken R. Single-pixel resolution ensemble correlation for micro-PIV applications // *Exp. Fluids.* 2004. Vol. 37, № 3. P. 375–384.
 54. Scharnowski S., Hain R., Kähler C.J. Reynolds stress estimation up to single-pixel resolution using PIV-measurements // *Exp. Fluids.* 2012. Vol. 52, № 4. P. 985–1002.
 55. Gui L., Wereley S., Lee S. Digital filters for reducing background noise in micro PIV measurement // *International Symposium on the Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics.* 2002. № 1.
 56. Bitsch L. et al. Micro particle-image velocimetry of bead suspensions and blood flows // *Exp. Fluids.* 2005. Vol. 39, № 3. P. 505–511.
 57. Bourdon C.J., Olsen M.G., Gorby A.D. Power-filter technique for modifying depth of correlation in microPIV experiments // *Exp. Fluids.* 2004. Vol. 37, № 2. P. 263–271.
 58. Wereley S.T., Gui L., Meinhart C.D. Advanced Algorithms for Microscale Particle Image Velocimetry // *AIAA J.* 2002. Vol. 40, № 6. P. 1047–1055.
 59. Nguyen C.V., Fouras A., Carberry J. Improvement of measurement accuracy in micro PIV by image overlapping // *Exp. Fluids.* 2010. Vol. 49, № 3. P. 701–712.
 60. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // *Вычислительные технологии.* 2007. Vol. 12, № 3. P. 109–131.

61. Raffel M. et al. Particle Image Velocimetry. 2018. 669 p.
62. Adrian R.J., Yao C.S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials // *Appl. Opt.* 1985. Vol. 24, № 1. P. 44–52.
63. Olsen M.G., Bourdon C.J. Random error due to Brownian motion in microscopic particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol.* 2007. Vol. 18, № 7. P. 1963–1972.
64. Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G. PIV measurements of a microchannel flow // *Exp. Fluids*. 1999. Vol. 27, № 5. P. 414–419.
65. Kravtsov Z.D., Chikishev L.M., Dulin V.M. Acetone PLIF concentration measurements in a submerged round turbulent jet // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1770.
66. Shestakov M.V. et al. Modulation of large-scale meandering and three-dimensional flows in turbulent slot jets // *J. Eng. Thermophys.* 2016. Vol. 25, № 2. P. 159–165.
67. Nebuchinov A.S. et al. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet // *Exp. Therm. Fluid Sci. Elsevier Inc.*, 2017. Vol. 80. P. 139–146.
68. Walker D.A. A fluorescence technique for measurement of concentration in mixing liquids // *J. Phys. E.* 1987. № 20. P. 217–224.
69. Matsumoto R., Zadeh H.F., Ehrhard P. Quantitative measurement of depth-averaged concentration fields in microchannels by means of a fluorescence intensity method // *Exp. Fluids*. 2005. Vol. 39, № 4. P. 722–729.
70. Munson M.S., Yager P. Simple quantitative optical method for monitoring the extent of mixing applied to a novel microfluidic mixer // *Anal. Chim. Acta*. 2004. Vol. 507, № 1. P. 63–71.
71. Li L., Ismagilov R.F. Protein crystallization using microfluidic technologies based on valves, droplets, and SlipChip. // *Annu. Rev. Biophys.* 2010. Vol. 39. P. 139–158.
72. Bothe D., Stemich C., Warnecke H.J. Mixing in a T-shaped microreactor: scales

- and quality of mixing // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering. 2006. P. 351–357.
73. Hoffmann M., Schlüter M., Kockmann N. Experimental Characterization Of Micro Mixers Using Microscale-Laser Induced Fluorescence And Particle Image Velocimetry // Proceedings of ICNMM2006. 2006. P. 1–6.
74. Sommer K. 1970 - Born, Wolf - Principles of Optics // Micro and macro mixing. 2010. P. 3–15.
75. Ахметбеков Е.К. et al. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Vol. 7. P. 79–85.
76. Li H., Olsen M.G. Aspect Ratio Effects on Turbulent and Transitional Flow in Rectangular Microchannels as Measured With MicroPIV // J. Fluids Eng. 2006. Vol. 128, № 2. P. 305.
77. White F.. Viscous Fluid Flow. 2006.
78. Erbil H.Y. Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: A review // Adv. Colloid Interface Sci. Elsevier B.V., 2012. Vol. 170, № 1–2. P. 67–86.
79. Tang G.H. et al. Electroosmotic flow and mixing in microchannels with the lattice Boltzmann method // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 100, № 9.
80. Steinke M.E., Kandlikar S.G. Single-phase heat transfer enhancement techniques in microchannel and minichannel flows // ICMM2004-2328. 2004. P. 1–8.
81. Bovard D. et al. Organs-on-a-chip // Toxicol. Res. Appl. 2017. Vol. 1, № August. P. 239784731772635.
82. Perestrelo A.R. et al. Microfluidic organ/body-on-a-chip devices at the convergence of biology and microengineering // Sensors (Switzerland). 2015. Vol. 15, № 12. P. 31142–31170.
83. ZEISS Microscopy Online Campus | Mercury Arc Lamps [Electronic resource]. URL: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/mercuryarc.html>

(accessed: 13.05.2018).

84. Mohanty J., Nau W.M. Ultrastable rhodamine with cucurbituril // *Angew. Chemie - Int. Ed.* 2005. Vol. 44, № 24. P. 3750–3754.
85. Carl Zeiss Microscopy, LLC, United States > Fluorescence Dye and Filter Database > Overview Filter Sets > Filter Set [Electronic resource]. URL: <https://www.microshop.zeiss.com/?s=138567376b32445&l=en&p=us&f=f&a=v&b=f&id=488020-9901-000&o=> (accessed: 13.05.2018).
86. Airy G.B. On the Diffraction of an Object-glass with a Circular Aperture // *Trans. Cambridge Philos. Soc.* 1834. Vol. 5, № August. P. 283–291.
87. Adrian R.J. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991. Vol. 23, № 1. P. 261–304.
88. Минаков А.В. et al. Смешение в микромиксере Т - типа при умеренных числах Рейнольдса // *Теплофизика и аэромеханика.* 2012. Vol. 19, № 5. P. 577–587.
89. Agirregabiria M. et al. Fabrication of SU-8 multilayer microstructures based on successive CMOS compatible adhesive bonding and releasing steps. // *Lab Chip.* 2005. Vol. 5, № 5. P. 545–552.
90. Bridgman P.W. *Dimensional Analysis.* 1922. 1-136 p.
91. Cao Z. et al. Liquid-Liquid Flow Patterns In Microchannels // *Proceedings of the ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference.* 2017. P. 1–9.
92. Darekar M. et al. Liquid-Liquid Two-Phase Flow Patterns in Y-Junction Microchannels // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017. Vol. 56, № 42. P. 12215–12226.

Список обозначений

Латинские символы

D_h	гидравлический диаметр, м
u	среднерасходная скорость, м с ⁻¹
U_{plug}	скорость движения снаряда, м с ⁻¹
Q	расход, м ³ с ⁻¹
l	длина снаряда, м
w	ширина микроканала, м
U_{bulk}	суммарная среднерасходная скорость, м с ⁻¹
$Ca = \mu u \sigma_i^{-1}$	капиллярное число
$Re = \rho u d_h \mu^{-1}$	число Рейнольдса
$Oh = \mu (\rho \sigma_i d_h)^{-1/2}$	число Онезорге
$We = u^2 d_h \rho \sigma_i^{-1}$	число Вебера

Греческие символы

θ	контактный угол смачивания
μ	динамическая вязкость, Па с
ρ	плотность, кг м ⁻³
σ_s	поверхностное натяжение, Н м ⁻¹
σ_i	межфазное натяжение, Н м ⁻¹
$\lambda = \mu_d / \mu_c$	отношение вязкостей

Список публикаций по теме диссертации

- [1] Andrey Minakov, Anna Yagodnitsyna, Alexander Lobasov, Valery Rudyak, Artur Bilsky Study of fluid flow in micromixer with symmetrical and asymmetrical inlet conditions // *La Houille Blanche* – 2013. – №5. – P. 12-21. (из перечня ВАК).
- [2] A. Minakov, A. Yagodnitsyna, A. Lobasov, V. Rudyak, A. Bilksy Micro-LIF and numerical investigation of mixing in microchannel // *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. – 2013. – Vol.6. – P. 15–27.
- [3] А.В. Минаков, А.А. Ягодницына, А.С. Лобасов, В.Я. Рудяк, А.В. Бильский Расчетно - экспериментальное исследование перемешивания жидкостей в Т-образном микроканале // *Нано- и микросистемная техника* –2013. – №3. – С. 18-21.
- [4] A. Yagodnitsyna, A. Bilsky, M. Roudgar, J. De Coninck, O. Kabov, Velocity field measurements in an evaporating sessile droplet by means of micro-PIV technique, *МАТЕС Web Conf.* 84 (2016) 00042. doi:10.1051/mateconf/20168400042. (из перечня ВАК).
- [5] А.А. Yagodnitsyna, А. V. Bilsky, О.А. Kabov, Flow visualization in evaporating droplet on a substrate by means of micro-PIV technique, *Sci. Vis.* 8 (2016) 53–58. (из перечня ВАК).
- [6] А.А. Yagodnitsyna, А. V. Kovalev, А. V. Bilsky, Flow patterns of immiscible liquid-liquid flow in a rectangular microchannel with T-junction, *Chem. Eng. J.* 303 (2016) 547–554. doi:10.1016/j.cej.2016.06.023. (из перечня ВАК).
- [7] А. V. Kovalev, А.А. Yagodnitsyna, А. V. Bilsky, Experimental study of liquid-liquid plug flow in a T-shaped microchannel, in: *J. Phys. Conf. Ser.*, 2016. doi:10.1088/1742-6596/754/9/092001. (из перечня ВАК).
- [8] А. V. Minakov, А.А. Shebeleva, А.А. Yagodnitsyna, А. V. Kovalev, А. V. Bilsky, Numerical and experimental study of the slug-flow regime in a mixture of castor and paraffin oils in a T-type microchannel, *Tech. Phys. Lett.* 43 (2017) 857–859. doi:10.1134/S1063785017090231. (из перечня ВАК).
- [9] А. В. Бильский, М. П. Токарев, А. А. Ягодницына, Метод цифровой трассерной визуализации и лазерной индуцированной флуоресценции для исследования потоков в микроканалах // *XI Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики»*. Тезисы докладов, 2010. – С. 17.
- [10] А. В. Бильский, М. П. Токарев, А. А. Ягодницына, Метод цифровой трассерной визуализации микронного разрешения для измерения полей

- скорости в микроканалах // *Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий. Тезисы докладов II Всероссийского семинара, 2010* – С. 19–21.
- [11] А. А. Ягодницына, Метод цифровой трассерной визуализации микронного разрешения для измерения полей скорости в микроканалах // 48-я Международная Научная Студенческая Конференция МНСК-2010, Тезисы докладов, 2010 – С. 27.
- [12] А. В. Бильский, А. А. Ягодницына, Экспериментальное исследование режимов течения и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа с помощью методов *micro-PIV* и *micro-LIF* // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей, 2011* – С. 167–171.
- [13] А. А. Ягодницына, Развитие и применение методов *micro-PIV* и *micro-LIF* для исследования режимов течения и процессов перемешивания в микроканалах // *Материалы XLVIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»*. Физика, 2011 – С. 18.
- [14] А. В. Бильский, А. В. Минаков, А. А. Ягодницына, Экспериментальное и численное исследование режимов течения и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа // *Доклады IV Всероссийской Конференции «Фундаментальные Основы МЭМС- и Нанотехнологий»*, 2012 – С. 81–86.
- [15] A. Minakov, V. Rudyak, A. Lobasov, A. Yagodnitsina, A. Bilsky, Experimental and numerical investigation of fluid mixing in T-shaped microchannel at high Reynolds numbers // *Proc. 3rd Eur. Conf. Microfluid.*, 2012.
- [16] А.А. Ягодницына, Применение метода лазерной индуцированной флуоресценции для исследования перемешивания в микроканалах // Тезисы докладов всероссийской конференции молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 2013.
- [17] А.А. Ягодницына, А.В. Бильский, Исследование гидродинамики и процессов перемешивания в микроканальных устройствах с помощью методов *micro-PIV* и *micro-LIF* // *Оптические Методы исследования потоков XII Межд. Науч-Технич. Конференция [Электронный Ресурс] Труды Конференции, 2013* – С. 1–9.
- [18] А. В. Ковалев, А. А. Ягодницына, Экспериментальное исследование двухкомпонентных потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах // 53-я Международная Научная Студенческая Конференция МНСК-2015, Тезисы Докладов, 2015 – С. 67.

- [19] А.А. Ягодницына, А.В. Ковалев, А.В. Бильский Визуализация режимов течения несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей - №1 (16) – 2015, стр. 207-210
- [20] А. А. Ягодницына, А.В. Ковалев, А.В. Бильский Режимы течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа // Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий. Доклады конференции. 2015, Вып. 5, том 2, стр.177-180
- [21] A. Yagodnitsyna, A. Kovalev, A. Bilsky Visualization and velocity field measurements in immiscible liquid-liquid flow in microchannels // The 13th Asian Symposium on Visualization, Novosibirsk, Russia, June 22–26, 2015
- [22] Anna Yagodnitsyna, Alexander Kovalev, Artur Bilsky Experimental investigation of immiscible liquids flow in a T-shaped microchannel // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing Naples, Italy, 15-18 June, 2015
- [23] Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Экспериментальное исследование структуры потока в дисперсной фазе при снарядном режиме течения несмешивающихся жидкостей в Т-образном микроканале // Тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». – Новосибирск, 2016. – С. 147.
- [24] Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Экспериментальное исследование снарядного режима течения несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». – Ялта, 2016. – С. 140.
- [25] A. Yagodnitsyna, A. Bilsky, M. Roudgar, J. De Coninck, O. Kabov, Flow visualization in evaporating droplet on a substrate by means of Micro-PIV technique // Int. Symp. Sch. Young Sci. Interfacial Phenom. Heat Transf. B. Abstr., 2016: p. 55.
- [26] A. Yagodnitsyna, A. Kovalev, A. Bilsky, Liquid-liquid two-phase flow patterns in T-junction rectangular micro-capillaries // Int. Symp. Sch. Young Sci. Interfacial Phenom. Heat Transf. B. Abstr., 2016: p. 88.
- [27] A. Yagodnitsyna, A. Kovalev, A. Bilsky, Viscosity influence on flow pattern map of immiscible liquid-liquid flow in a T-shaped microchannel // Proc. 5 Th Int. Conf. MNF2016, 2016.