

На правах рукописи



Ягодницына Анна Александровна

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

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Бильский Артур Валерьевич

Официальные оппоненты:

Губайдуллин Амир Анварович, доктор физико-математических наук, профессор, Тюменский филиал ФГБУН Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, директор.

Ахметов Альфир Тимирзянович, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, лаборатория «Экспериментальная гидродинамика», заведующий лабораторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «13» марта 2019 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, www.itp.nsc.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.053.01 по адресу:

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

(факс: (383) 330-84-80, e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан « » января 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 и использовать минимально возможные объемы веществ.

Потребность в разработке микроканальных устройств привела к развитию новой области исследований – микрогидродинамики. Одной из главных целей изучения микрогидродинамики 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 двухкомпонентных 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 micro-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. По результатам визуализации был обнаружен новый режим течения, названный серпантинным, при котором форма границы раздела между жидкостями имеет периодическую волновую структуру. Построены карты режимов.

3. Предложен новый 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 влияние механизма формирования снаряда на его длину.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанные методики *micro-PIV* и *micro-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.

Новый безразмерный параметр, позволяющий построить универсальную карту режимов для течений несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканале Т-типа.

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

Личный вклад соискателя. Автором лично получены все экспериментальные данные, включенные в диссертацию, проведена их обработка и анализ, построены безразмерные критерии. Автором лично разработаны модель пространственного усреднения метода micro-LIF и программный код для сравнения данных численного моделирования и эксперимента посредством усреднения данных численного моделирования по разработанной модели. Экспериментальные методики micro-PIV и micro-LIF разрабатывались при непосредственном участии автора. Личный вклад автора включает участие в постановке задач, решаемых в рамках выполнения диссертационной работы.

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, заключения и библиографии. Работа изложена на 130 страницах, содержит 68 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает 92 наименования работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, сформулирована новизна и практическая значимость работы.

Первая глава диссертации состоит из трех разделов, включающих обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

В *разделе 1.1* представлен обзор расчетных и экспериментальных работ по исследованию перемешивания жидкостей в микромиксерах Т-типа. Ряд работ по численному моделированию течения в микромиксерах Т-типа показал существование нескольких режимов течения, в том числе несимметричного режима с возникновением S-образной структуры, при этом эффективность перемешивания возрастает в десятки раз [Kockmann et al. 2003; Dreher et al. 2009]. В работе [Soleymani et al. 2008] на основе численного моделирования получен безразмерный критерий для перехода из вихревого в захватывающий режим с S-образной структурой. Для валидации данных численного моделирования требуются комплексные экспериментальные данные по полям скорости и концентрации в Т-образных микроканалах при перемешивании жидкостей.

Раздел 1.2 включает в себя описание основных результатов, представленных в мировой литературе, по исследованию течений несмешивающихся жидкостей в Т-образных микроканалах. Обсуждаются основные работы по созданию размерных и безразмерных критериев для построения карт режимов несмешивающихся жидкостей, их границы применимости и недостатки. 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. 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.

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 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. В разделе описаны основные результаты работ, направленных на построение зависимостей длины снарядов от параметров потока и механизма формирования снаряда [Garstecki et al. 2006; De Menech et al. 2016; Xu et al. 2008].

В *разделе 1.3* освещены бесконтактные оптические методы для диагностики потоков на микромасштабах – micro-PIV и micro-LIF. Суть метода micro-PIV заключается в засеве исследуемого потока трассерными частицами, 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. Метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) является методом для измерения полей концентраций и температур и основан на том, что интенсивность флуоресценции пропорциональна концентрации флуоресцентного красителя или уменьшается с увеличением температуры. В разделе описаны основные отличия метода micro-PIV от стандартного метода PIV для исследования потоков на макромасштабах. Объемное освещение потока в методе micro-PIV приводит к тому, что толщина измерительной области определяется глубиной резкости объектива микроскопа, при этом частицы вне глубины резкости уменьшают отношение сигнал/шум. Другой особенностью, отличающей micro-PIV от традиционного PIV метода, является размер трассерных

частиц: частицы должны быть достаточно малыми, чтобы беспрепятственно следовать за потоком и не загромождать микроканал, при этом размер частиц приближается к длине волны лазерного излучения, что приводит к возникновению дифракционных эффектов. Для того чтобы минимизировать дифракцию на частицах и регистрацию света, отраженного от стенок исследуемого участка, используют флуоресцентные трассеры. Рассматриваются вопросы погрешностей и обработки изображений в методе *micro-PIV*, направленной на увеличение отношения сигнал/шум. Представлено описание метода *micro-LIF* для измерения полей концентрации в микроканалах, затронут вопрос источников погрешности метода, а также описан метод оценки эффективности перемешивания по полям концентраций.

Вторая глава содержит результаты разработки бесконтактных оптических методов *micro-PIV* и *micro-LIF* для измерения полей скорости и концентрации с микронным разрешением. Была создана экспериментальная установка для измерения полей скорости и концентрации в микроканалах (Рис. 1).



*Рис. 1. Фотография экспериментальной установки для проведения *micro-PIV* и *micro-LIF* измерений.*

Система формирования изображения состояла из эпифлуоресцентного инвертированного микроскопа Zeiss Axio Observer с набором объективов (1). Освещение потока проводилось с помощью двойного импульсного Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм (2), изображения потока регистрировались цифровой камерой с двойной экспозицией (4). Синхронизация работы системы осуществлялась с помощью

программируемого процессора. Управление экспериментом и обработка данных осуществлялась с помощью программного пакета ActualFlow, разработанного в Институте теплофизики СО РАН. Поток жидкости в микроканале создавался с помощью прецизионного двойного шприцевого насоса с регулируемым расходом жидкости в широком диапазоне значений (5). Поток засеивался флуоресцентными трассерами средним диаметром от 1 до 3 мкм. При измерении полей концентраций в исследуемый поток добавлялся краситель Родамин 6Ж, поток освещался ртутной лампой (3).

Представлены результаты разработки алгоритмов обработки данных, полученных в результате micro-PIV измерений, для расчета полей скорости посредством усреднения корреляционных функций, и расчета эффективности перемешивания по заданным профилям концентраций, полученных с помощью метода micro-LIF. Разработана модель пространственного усреднения метода micro-LIF и получено ее экспериментальное подтверждение (Рис. 2). Показано, что полная зарегистрированная интенсивность флуоресценции в точке (x_0, y_0) при условии, что фокальная плоскость расположена на расстоянии z_0 от центральной плоскости микроканала:

$$I_0(x_0, y_0, z_0) = \frac{KD_a^2}{4\pi H s_0^2} \int_{-H/2}^{H/2} \frac{1}{d_s^2(z)} \iint_{S(d_e(x_0, y_0, z))} C(x - x_0, y - y_0, z - z_0) dS dz$$

где $K(x_0, y_0)$ – калибровочный коэффициент, отвечающий за пространственную неравномерность освещения потока, D_a – диаметр апертуры линзы, H – высота микроканала, s_0 – рабочая дистанция объектива микроскопа, d_s – диаметр диска Эйри, C – распределение концентрации красителя в объеме.

Проведены тестовые эксперименты для верификации работы разработанных методов и демонстрации возможностей их применения. Проведены измерения полей скорости в прямом микроканале с сечением 200x50 мкм, представлено сравнение результатов измерений с аналитическим решением и результатами измерений других авторов. Максимальное отклонение экспериментальных данных от аналитического решения составило 3%.

Показана возможность применения метода micro-PIV для измерения полей скорости в потоках со свободной поверхностью – испаряющихся

каплях, сидящих на подложке. Представлены результаты *micro*-PIV измерений мгновенных полей скорости в испаряющихся каплях воды на подложках с различными контактными углами с высоким пространственным разрешением. Показано, что по мере испарения капля жидкости структура течения внутри капли значительно меняется (Рис. 3). Были получены схожие симметричные вихри в каплях на подложках с различными контактными углами.

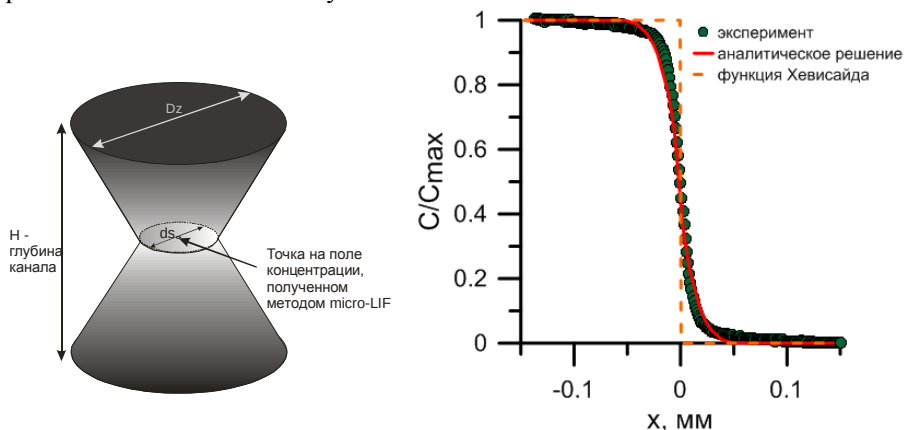


Рис. 2. Слева: схема пространственного усреднения метода *micro*-LIF, где ds - диаметр диска Эйри, Dz - диаметр функции распределения точки на расстоянии z от фокальной плоскости микроскопа. Справа: профиль концентрации поперек микроканала. Эксперимент и аналитический расчет по предложенной модели усреднения метода *micro*-LIF.

Разработанная методика *micro*-PIV была применена для исследования пульсирующих течений в микрочипе. Рабочий участок представлял собой микроканал с ответвлением, выполненный из материала PDMS, высота канала равнялась 100 мкм, ширина канала 400 мкм. Поток создавался посредством насоса, создающего пульсации расхода жидкости. Измерение полей скорости в микроканале с пульсирующим потоком были проведены методом фазового усреднения. Полученные экспериментальные данные были использованы для оптимизации биочипа, моделирующего органы человека.

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

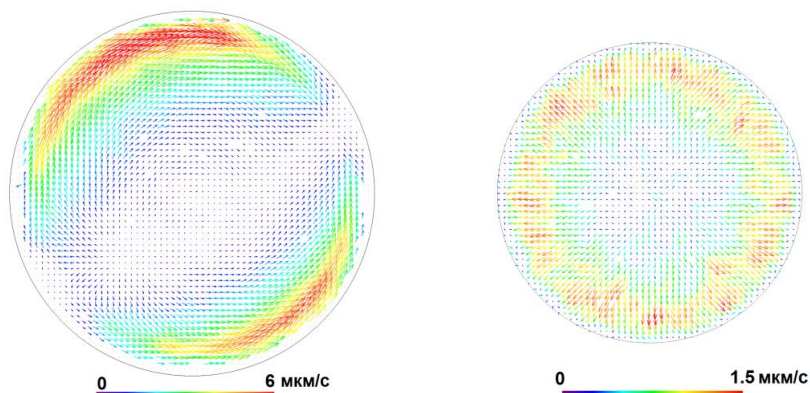


Рис. 3. Мгновенные поля скорости в сечении капли на расстоянии 93 мкм от подложки из материала SU-8 (оттекающий контактный угол $45-60^\circ$, гистерезис контактного угла $30-40^\circ$). Слева – 78 с после начала испарения. Справа – 220 с после начала испарения. Полное время испарения 558 с.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию гидродинамики течений и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа с помощью разработанных методов *micro-PIV* и *micro-LIF*. Размеры сечения входных каналов микромиксера составили 200×200 мкм, размеры сечения смешивающего канала – 400×200 мкм, длина входных и выходных каналов – 5 мм (Рис. 4). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, при исследовании перемешивания жидкостей методом *micro-LIF* в один из входных каналов подавался водный раствор флуорофора Родамин 6Ж. Измерены поля скорости и поля концентрации в центральном сечении микромиксера в широком диапазоне чисел Рейнольдса Re от 10 до 300. Измерение полей скорости показало, что при Re от 120 до 150 распределение скорости в канале существенно изменяется – профиль скорости приобретает два перегиба, происходит переход из симметричного режима течения в несимметричный вихревой с возникновением S-образной структуры (Рис. 4).

Анализ полей скорости, измеренных в различных сечениях микроканала по высоте, также показал возникновение S-образной структуры. На Рис. 5 показаны средние поля скорости в центральном сечении микроканала и изоповерхности средней поперечной скорости, полученные по полям скорости в пяти сечениях микроканала, при различных Re от 10 до 300. При $Re = 120$ формируется структура потока,

приводящая к симметричному распределению изоповерхностей поперечной скорости в смешивающем канале, связанному с возникновением вихрей Дина. При дальнейшем увеличении Re распределение изоповерхностей поперечной скорости принимает несимметричный характер относительно оси канала, что свидетельствует о наличии S-образной структуры в потоке.

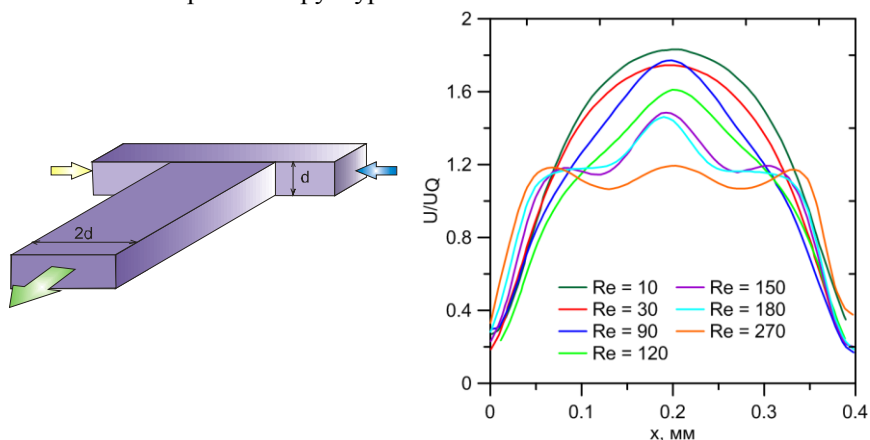


Рис. 4. Слева: схема микромиксера T-типа. $d = 200$ мкм; справа: нормированные на среднерасходную скорость профили скорости в центральном сечении T-канала при различных числах Re . Расстояние от торца канала $L = 3,5 Dh$.

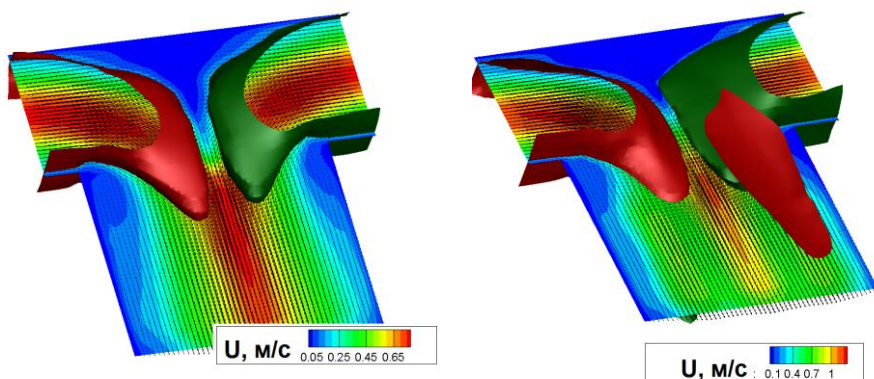


Рис. 5. Средние поля скорости в центральном сечении T-канала и изоповерхности средней поперечной скорости (-40% и 40% от среднерасходной скорости), построенные по полям скорости, измеренным в пяти сечениях микроканала. Слева: $Re = 120$, справа: $Re = 186$.

Сравнение с результатами численного моделирования [Минаков и др. 2012] продемонстрировало удовлетворительное совпадение распределений скорости в канале. Предложен алгоритм для обработки данных трехмерного моделирования смешения жидкостей в микроканале, позволяющий провести сравнение измеренных и рассчитанных полей концентраций. Показано, что применение разработанной модели пространственного усреднения метода *micro-LIF* к данным численного моделирования позволяет корректно сравнивать результаты численного моделирования и эксперимента (Рис. 6).

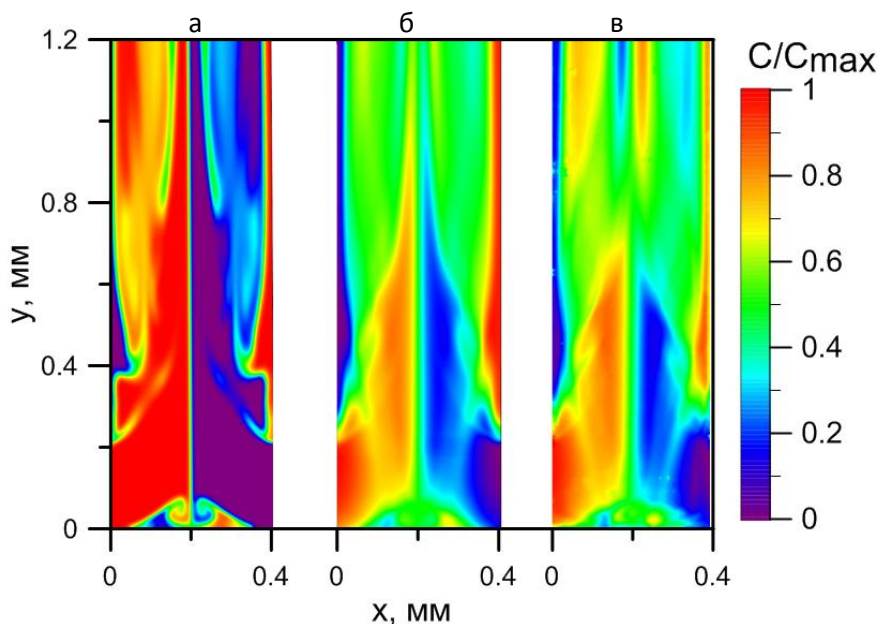


Рис. 6. Сравнение полей концентраций, полученных с помощью численного моделирования [Минаков и др. 2012] и эксперимента при $Re = 186$. а) Поле концентрации в центральном сечении микроканала, полученное с помощью численного моделирования. б) Усредненные данные численного моделирования, согласно предложенной модели пространственного усреднения метода *micro-LIF*. в) Поле концентрации, измеренное в центральном сечении микроканала с помощью метода *micro-LIF*.

Проведена оценка эффективности перемешивания по измеренным полям концентраций при смешении двух жидкостей в Т-канале для различных чисел Рейнольдса. 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. Критическое число Рейнольдса, при котором происходит переход к несимметричному вихревому режиму, хорошо согласуется с результатами других авторов.

Четвертая глава описывает результаты комплексного экспериментального исследования течения двухкомпонентных несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканале Т-типа. В *разделе 4.1* представлены результаты проведения экспериментов по визуализации режимов течения для набора несмешивающихся жидкостей в широком диапазоне вязкостей: керосин – вода, парафиновое масло – вода, парафиновое масло – касторовое масло и касторовое масло – вода. Отношение вязкостей жидкостей в наборах варьировалось от 1:1 до 1:1000. Физические свойства используемых жидкостей представлены в Таблица 1. Визуализация режимов течения проводилась с помощью скоростной камеры с частотой съемки от 1 до 1000 Гц и микроскопа с установленным объективом 5х увеличения. Т-образный микроканал, изготовленный из материала SU-8, имел размеры входных каналов 200х200 мкм, выходного канала – 400х200 мкм.

Таблица 1. Физические свойства жидкостей, используемых в экспериментах.

	Керосин	Вода	Парафиново е масло	Касторовое масло
ρ , кг/м ³	745	997	845	935
μ , мПа*с	0.820	0.894	110	650
σ , мН/м	46.2		45.2	17
θ	$130^\circ \pm 4^\circ$ (вода)	$121^\circ \pm 2^\circ$ (вода)		$25^\circ \pm 2^\circ$ (каст. масло)
	$98^\circ \pm 3^\circ$ (керосин)	$115^\circ \pm 3^\circ$ (пар. масло)		$152^\circ \pm 4^\circ$ (пар. масло)

В результате визуализации получены следующие режимы течения: снарядный без контактной линии, снарядный с контактной линией, скользяще-снарядный, параллельный, ривулетный, капельный и серпантинный (Рис. 7). При этом серпантинный режим, полученный в данной работе впервые, является стационарным при сохранении структуры течения вплоть до конца микроканала.

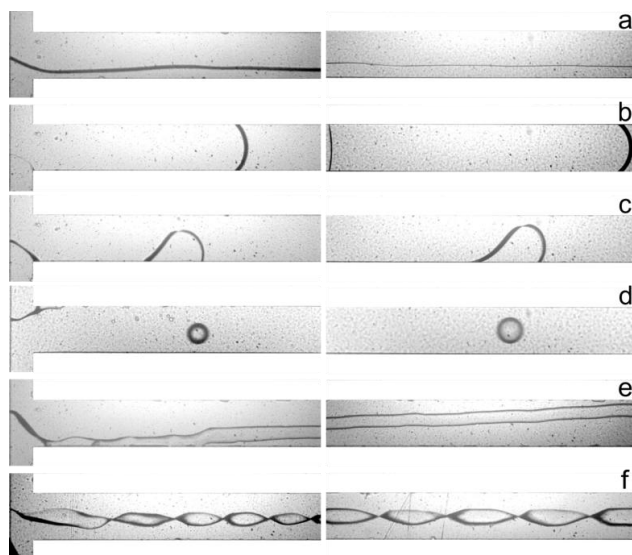


Рис. 7. Характерные режимы течения для несмешивающихся жидкостей керосин–вода, зарегистрированные в начале микроканала и на расстоянии 56 калибров вниз по течению: а) параллельный режим течения, б) снарядный режим течения с контактной линией, в) скользяще-снарядный режим течения, г) капельный режим течения, д) ривулетный режим течения, е) серпантинный режим течения.

Для каждого из наборов жидкостей построены карты режимов по безразмерному параметру – числу Вебера. Показано, что относительное положение режимов течения на картах совпадает, однако границы режимов сдвинуты относительно друг друга на несколько порядков. Был проведен анализ размерностей, в результате которого получен новый безразмерный параметр - число Вебера, умноженное на число Онезорге $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{a_h \sigma \rho}}$, который учитывает вязкость жидкостей. 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. Показано, что карта режимов, построенная по данному безразмерному параметру, является универсальной для всех используемых в эксперименте наборов жидкостей (Рис.8).

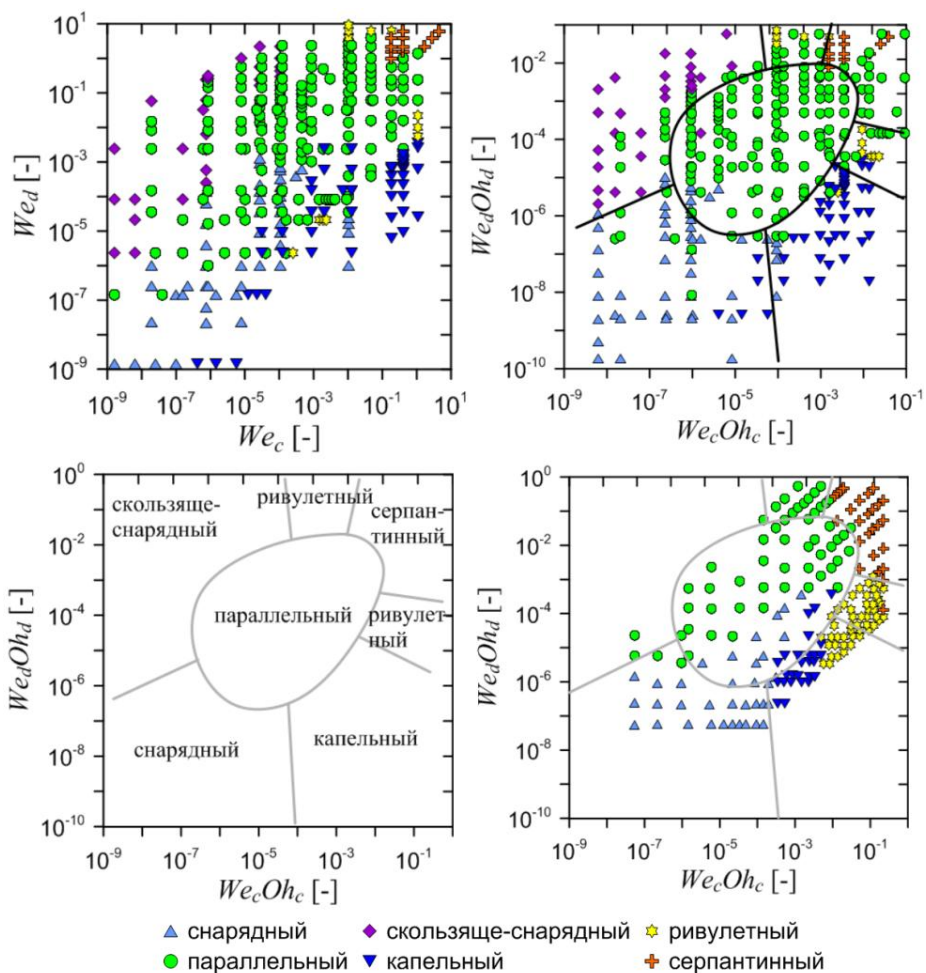


Рис. 8. а) Карта режимов течения, построенная для трех наборов несмешивающихся жидкостей в числах Вебера. б) Карта режимов течения, построенная для трех наборов несмешивающихся жидкостей в числах Вебера, умноженных на число Онезорге. в) Границы режимов течения. г) Экспериментальные данные [Zhao et al. 2006], наложенные на универсальную карту режимов.

Представлены результаты верификации предложенного безразмерного критерия другими авторами. В работе [Darekar et al. 2017] применили предложенный в рамках диссертации критерий $We \cdot Oh$ для построения

карт режимов для течения несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканалах Y-типа. Авторы 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). В работе [Cao et al. 2017] применили критерий $We \cdot Oh$ для определения границ режимов течения трех наборов несмешивающихся жидкостей в микроканалах T-типа и крестообразных микроканалах. Авторы работы показали, что границы между параллельным и снарядным режимами течения совпадают с коэффициентом детерминации $R^2=0,98$, для границы между снарядным и капельным режимами течения $R^2=0,95$.

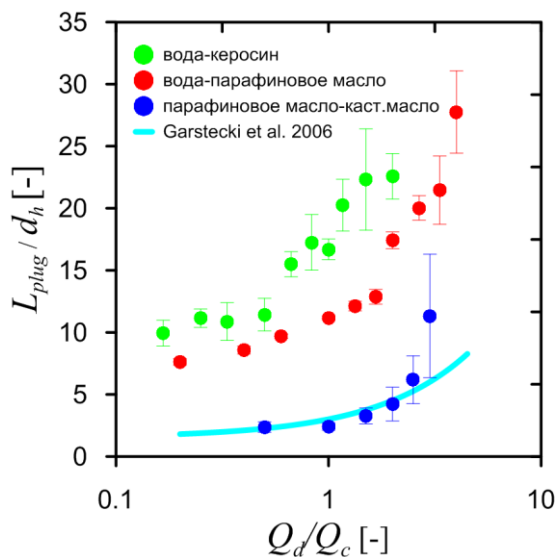


Рис. 9. Безразмерная длина снарядов в зависимости от суммарной среднерасходной скорости. Сплошная линия отвечает зависимости, предложенной в работе [Garstecki et al. 2006].

Раздел 4.2 посвящен исследованию снарядного режима течения несмешивающихся жидкостей в микроканале T-типа. Используя данные скоростной визуализации, были измерены скорости и длины снарядов для различных расходов жидкостей. Показано, что механизмы формирования снарядов с контактной и без контактной линии отличаются, что приводит к тому, что зависимость длины снаряда от отношения расходов

дисперсной и несущей фазы [Garstecki et al. 2006] не может быть применена для случая снарядов с контактной линией (Рис. 9).

По результатам измерений скорости движения снарядов было установлено, что скорость снарядов пропорциональна суммарной среднерасходной скорости с коэффициентом пропорциональности k равным 1, 1,21 и 1,81 для наборов жидкостей парафиновое масло – вода, керосин – вода и касторовое масло – парафиновое масло, соответственно.

С помощью метода micro-PIV были измерены поля скорости в области формирования снарядов и в конце канала для течения керосин – вода (Рис. 10). По мгновенным полям скорости построены зависимости циркуляции скорости внутри снарядов для различных расходов жидкостей (Рис. 11). Показано, что с увеличением скорости снарядов циркуляция скорости растет линейно.

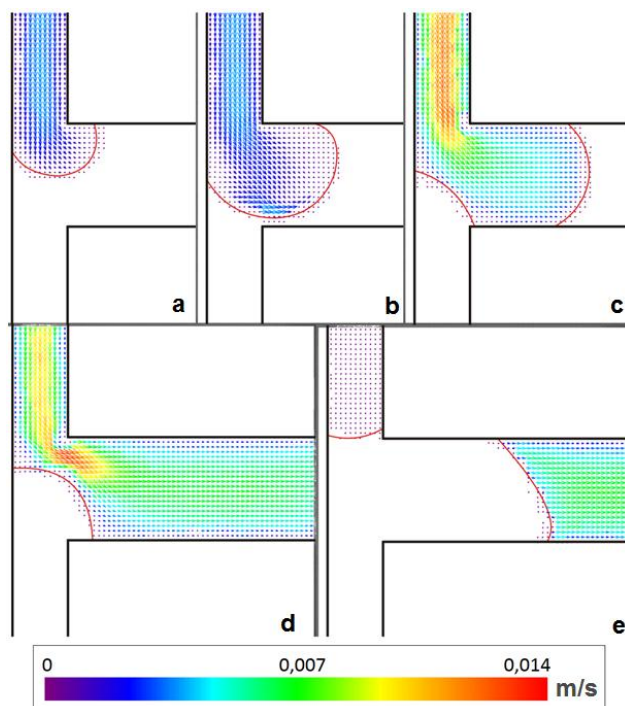


Рис. 10. Мгновенные поля скорости в центральном сечении снаряда в различные моменты формирования снаряда при течении керосин – вода.

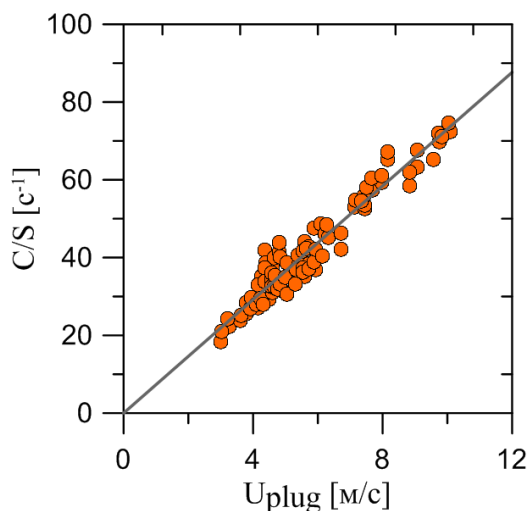


Рис. 11. Зависимость циркуляционной скорости в снарядах, нормированной на площадь снаряда, от скорости снаряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. 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.

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 несимметричному 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.

Проведено комплексное экспериментальное исследование двухкомпонентных течений несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканале Т-типа в широком диапазоне безразмерных параметров. 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.

Основное содержание диссертации изложено в следующих рецензируемых работах:

1. A. A. Yagodnitsyna, A. V. Kovalev, A.V. Bilsky *Flow patterns of immiscible liquid-liquid flow in a rectangular microchannel with T-junction* // Chemical Engineering Journal – 2016. – Vol. 303 – P. 547-554 (из перечня ВАК).
2. А. В. Минаков, А. А. Шебелева, А. А. Ягодницына, А. В. Ковалев, А. В. Бильский *Расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа* // Письма в ЖТФ – 2017. – Вып. 18. – С. 82-89. (из перечня ВАК).
3. А.А. Ягодницына, А.В. Бильский, О.А. Кабов *Визуализация течения в испаряющейся капле на подложке с помощью метода micro-PIV* // Научная визуализация – 2016 – Т. 8. – №2. – С. 53-58. (из перечня ВАК).
4. 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. – Vol. 5. – P. 12-21. (из перечня ВАК).
5. Yagodnitsyna A., Bilsky A., Roudgar M., De Coninck J. and Kabov *Velocity field measurements in an evaporating sessile droplet by means of micro-PIV technique* // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 84 – 00042. (из перечня ВАК).

6. Kovalev A., Yagodnitsyna A., Bilsky A. *Experimental study of liquid-liquid plug flow in a T-shaped microchannel* // Journal of Physics: Conference Series – 2016. – Vol. 754. – 092001. (из перечня ВАК).

7. 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.

8. 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.

9. 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 – 2015. – №1 (16) – С. 207–210.

10. 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.

Цитированная литература:

Cao, Z., Najafabadi, M.S., Wu, Z., and Sunden, B. 2017. Liquid-liquid flow patterns in microchannels. *Proceedings of the ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference*, 1–9.

Darekar, M., Singh, K.K., Mukhopadhyay, S., and Shenoy, K.T. 2017. Liquid-liquid two-phase flow patterns in Y-junction microchannels. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 56, 42, 12215–12226.

Dreher, S., Kockmann, N., and Woias, P. 2009. Characterization of laminar transient flow regimes and mixing in T-shaped micromixers. *Heat Transfer Engineering* 30, 1–2, 91–100.

Garstecki, P., Fuerstman, M.J., Stone, H. a, and Whitesides, G.M. 2006. Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction-scaling and mechanism of break-up. *Lab on a chip* 6, 3, 437–446.

Kockmann, N., Engler, M., Föll, C., and Woias, P. 2003. Liquid mixing in static micro mixers with various cross sections. *International Conference on Microchannels and Minichannels* 1, 1992, 911–918.

De Menech, M., Garstecki, P., Jousse, F., and Stone, H.A. 2016. Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction. *Journal of Fluid Mechanics* 595, May, 141–161.

Soleymani, A., Yousefi, H., and Turunen, I. 2008. Dimensionless number for identification of flow patterns inside a T-micromixer. *Chemical Engineering Science* 63, 21, 5291–5297.

Xu, J.H., Li, S.W., Tan, J., and Luo, G.S. 2008. Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping. *Microfluid. Nanofluidics*, Vol. 5, № 6, 711–717.

Zhao, Y., Chen, G., and Yuan, Q. 2006. Liquid-liquid two-phase flow patterns in a rectangular microchannel. *AIChE Journal* 52, 12, 4052–4060.

Минаков, А.В., Рудяк, В.Я., Гаврилов, А.А., Дектерев, А.А. 2012. Смешение в микромиксере Т - типа при умеренных числах Рейнольдса. *Теплофизика и аэромеханика* 19, 5, 577–587.

Подписано к печати 25.12.2018г. Заказ №18
Формат 60х84/16. Объем 1.0 уч.-изд.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН
просп. Ак. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090