

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
гидродинамики им. М.А.Лаврентьева

Сибирского отделения Российской
академии наук
доктор физико-математических наук




С.В. Головин

 февраля 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ягодницыной Анны Александровны
«Экспериментальное исследование локальных характеристик двухкомпонентных течений
жидкостей в микроканалах Т-типа», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости,
газа и плазмы

В диссертации А. А. Ягодницыной проводится комплексное экспериментальное исследование двухкомпонентных течений смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа для обнаружения фундаментальных закономерностей, определяющих эти явления и использования их в различных приложениях микрогидродинамики.

Актуальность экспериментального исследования сложных течений жидкости в микроканалах различной геометрии обусловлена как запросами фундаментальной микрогидродинамики, так и широким использованием микроканальных устройств в различных приложениях в качестве химических микрореакторов, микротеплообменников, систем диагностики и сортировки биологических объектов и т.д. Микромасштабы таких течений позволяют, за счет повышенного отношения площади поверхности к объему, интенсифицировать процессы смешения, теплообмена, протекание химических реакций. Микрогидродинамика позволяет интегрировать в одном чипе процессы, происходящие на макроуровне в размерах целой системы. Описание таких явлений происходит, в основном, в рамках континуального подхода, с применением аппарата механики сплошных сред. При адекватном описании потоков несмешивающихся жидкостей возникает много дополнительных факторов, значительно усложняющих исследование и не имеющих места для однофазных течений. Это контактный угол, граница раздела жидкостей, пленка на

стенке микроканала. Экспериментальные исследования таких явлений играют определяющую роль, давая необходимый материал для их моделирования. Эксперимент в этой области сложен, требует использования специальных методов и аппаратуры, разработки соответствующих методик.

Таким образом, тематика диссертации А. А. Ягодницыной чрезвычайно актуальна, ее результаты ценны как для развития фундаментальной науки, так и ее приложений.

Содержание работы. Диссертация А.А. Ягодницыной изложена на 130 страницах, снабжена исчерпывающе подробным иллюстративным материалом, исполненным на высоком уровне. Имеется список литературы из 92 наименований работ, всесторонне освещающих тематику диссертации.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определяются ее цель и задачи, представлены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** дается подробный и детальный обзор современного состояния исследований по теме диссертации. В разделе 1.1 дается обзор расчетных и экспериментальных работ по исследованию перемешивания жидкостей в микромиксерах Т-типа. Обращается внимание на существование нескольких типов течения и параметров, определяющие переход от одного типа к другому. В разделе 1.2 дано описание имеющихся результатов по исследованию течений несмешивающихся жидкостей в Т-образных микроканалах. Отмечается недостаточное количество работ по исследованию течений несмешивающихся жидкостей, когда обе фазы смачивают стенки микроканала, и отсутствие критериев для построения карты режимов течения. В разделе 1.3 подробно описаны бесконтактные оптические методы диагностики потоков на микромасштабах: *micro PIV* и *micro-LIF*. Они позволяют строить векторное поле скорости в потоке и поля концентраций и температур. Отмечается специфика этих методов для микромасштабов, существенно усложняющая проведение экспериментов.

Обзор дает полное представление о состоянии экспериментальных исследований в микрогидродинамике по теме диссертации.

Во **второй главе** изложены результаты автора по разработке бесконтактных оптических методов *micro-PIV* и *micro-LIF* для измерения полей скорости и концентрации с микронным разрешением. Описывается созданная автором работы экспериментальная установка для измерения полей скорости и концентраций в микроканалах. Представлены результаты разработки алгоритмов обработки экспериментальных данных для расчета полей скорости. Описаны тестовые эксперименты по измерению полей скорости в прямом микроканале и испаряющихся каплях воды на различных подложках. Очень интересны результаты по динамике поля скорости внутри испаряющейся капли: трансформация

системы двух отдельных вихрей по краям капли в радиально симметричное движение в последующие моменты времени.

Нужно отметить очень высокий, современный уровень разработанного приборно-измерительного комплекса, вошедшего, в качестве составного модуля, в глобальный ПИК «ПОЛИС» Института теплофизики.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям гидродинамики течений и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа с помощью разработанных методов *micro-PIV/micro-LIF*, описанных в предыдущей главе. Используются две жидкости: вода и водный раствор флуорофора Родамин 6Ж. Измерены поля скорости и поля концентрации в широком диапазоне чисел Рейнольдса от 10 до 300. Установлено что при Re от 120 до 150 происходит переход симметричного режима течения в несимметричный вихревой с образованием S-структуры. Детально описывается изменение геометрии течения при возрастании числа Рейнольдса. Сравнение с численным моделированием показывает удовлетворительное качественное совпадение результатов. Показано, что образование S-структур существенно повышает эффективность перемешивания.

В **четвертой** главе представлены результаты экспериментального исследования течения двухкомпонентных несмешивающихся жидкостей с различными физическими свойствами в микроканалах Т-типа. Были исследованы пары керосин – вода, парафиновое масло – вода и касторовое масло – парафиновое масло. Эти наборы позволяют проварьировать в широком диапазоне различные физические свойства жидкостей, такие как плотность, вязкость, краевой угол и пр., что предоставляет богатый экспериментальный материал для проведения сопоставлений и обобщений. Отлично исполненные эксперименты демонстрируют очень интересные и разнообразные режимы течений: снарядный с контактной линией и без нее, скользяще-снарядный, параллельный, ривулетный, капельный, серпантинный. Последний режим является новым, наблюдался впервые, является стационарным и сохраняется по всей длине канала. И еще – он очень красив визуально. Построены карты режимов течения по числу Вебера. Показана их «типичность»: для различных пар жидкостей подобласти различных режимов сдвигаются, сохраняя топологию взаимного расположения. Важным достижением Анны Александровны является использование нового безразмерного параметра, равного произведению числа Вебера на число Онезорге. Обосновывается его введение и показывается, что карта режимов, построенная по нему, является универсальной.

В разделе 4.2 детально исследован снарядный режим течения в микроканале. Показано, что скорость снарядов пропорциональна среднерасходной скорости, и что с увеличением скорости снарядов линейно возрастает циркуляция.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В диссертационной работе А.А.Ягодницыной

1. Разработаны оптические бесконтактные полевые методики micro-PIV/micro-LIF для измерения полей скорости и концентраций с микронным разрешением. Эти методики апробированы на тестовых объектах и показали свою эффективность.

2. Проведено комплексное экспериментальное исследование гидродинамики течения однофазного потока и режимов перемешивания в микромиксере Т-типа с помощью указанных методик. Получены различные режимы течения, показано что при изменении числа Рейнольдса в интервале 120-150 происходит потеря симметричности течения, образование S-структур, резко повышающее эффективность перемешивания.

3. Проведено комплексное экспериментальное исследование двухкомпонентных течений несмешивающихся жидкостей с различными свойствами в микроканале Т-типа. Предложен новый безразмерный параметр, позволяющий построить универсальную карту режимов течения. Детально исследован снарядный режим течения.

Научная новизна работы заключается в комплексном экспериментальном исследовании течения жидкостей в Т-микроканалах, в результате которого разработана новая модель усреднения метода micro-LIF, обнаружен новый серпантинный режим течения в микроканале Т-типа, новый безразмерный параметр использован для построения карты течения, дан детальный анализ снарядного режима течения.

Значимость работы состоит в разработанных автором методиках micro-PIV/micro-LIF, полученные экспериментальные данные о течениях жидкостей, в том числе многокомпонентных, могут использоваться для интенсификации процессов перемешивания в технических устройствах и проектировании микроканальных модулей с заданными свойствами. Полученные автором результаты дают новые знания о сложных микрогидродинамических процессах, являются основой для построения физических и математических моделей течения жидкостей в микроканалах, базой для компьютерных алгоритмов расчета таких течений. Полученный новый безразмерный параметр позволяет классифицировать различные режимы течения и может быть использован для управления такими течениями.

Полученные А.А. Ягодницыной результаты могут найти применение в организациях: ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИТ УрО РАН, ОИВТ РАН, НГУ, МГУ, МГТУ, МЭИ, ИПМех РАН, ИМех МГУ и других.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 статьях, из них 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для представления результатов кандидатских диссертаций. Среди них такие авторитетные в своей области издания с высоким рейтингом, как Письма в ЖЭТФ, La Houille Blanche, Chem. Eng. Journal.

Материалы работы были представлены на многих авторитетных международных и всероссийских конференциях.

Работа четко структурирована, написана грамотным и ясным языком.

Замечания по работе:

1. В работе анализируются процессы перемешивания в жидкости и в гл.1 обсуждаются различные ее механизмы, но не приводится формула, определяющая эффективность перемешивания. Между тем этот коэффициент - Рис. 2 на стр. 12 работы - определяется в разных работах по разному.

2. В работе ничего не говорится о влиянии на течение верхней и нижних стенок канала. Как и на каких масштабах течение в центральной зоне меняется при приближении к стенке микроканала?

3. В работе обнаружен серпантинный режим течения. Можно ли указать физический механизм его возникновения?

4. Можно отметить, что параметр, представляющий собой произведение числа Вебера на число Онезорге, использовался для обобщения результатов опытов в смежных областях. Примером может служить использование произведения т.н. «электростатического» числа Вебера на число Онезорге при исследовании механизмов электро-коалесценции капель в работе Mousavichoubeh M., Shariaty-Niassar M. and Ghadiri M. The effect of interfacial tension on secondary drop formation in electrocoalescence of water droplets in oil // Chem. Eng. Sci., 2011. V. 66, 5330-5337. (см. стр. 5335, формула 3).

Приведенные замечания не снижают ценности работы в целом. Представленная работа А.А. Ягодницыной является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, в которой решается важная для фундаментальной микрогидродинамики задача экспериментального исследования параметров двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа.

Все приведенные результаты являются достоверными, содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05, автореферат полностью отражает ее содержание.

Считаем, что в диссертации «Экспериментальное исследование локальных характеристик двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа» получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития микрогидродинамики. Работа удовлетворяет всем требованиям п.9 Положения ВАК России о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Анна Александровна Ягодницына безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составлен заведующим лабораторией дифференциальных уравнений Института гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН д. ф. - м. н. Чупахиным Александром Павловичем и заведующим лабораторией экспериментальной прикладной гидродинамики того же института д.ф.-м.н. Ерманюком Евгением Валерьевичем.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждались на совместном семинаре “Нелинейные волны” лабораторий дифференциальных уравнений и экспериментальной прикладной гидродинамики Института гидродинамики им. М.А.Лаврентьева СО РАН под руководством д. ф.-м. н. А. П. Чупахина 24 января 2019 года.

Заведующий лабораторией
дифференциальных уравнений
ИГиЛ СО РАН
Д. ф.-м.н.



А. П. Чупахин

Заведующий лабораторией
экспериментальной прикладной
гидродинамики
Д. ф.-м.н.



Е. В. Ерманюк

Подписи удостоверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
К. ф.-м.н.



И. В. Любашевская

Адрес: 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15,
ИГиЛ СО РАН
Тел. :+ 7(383)333-16-12
E-mail: chupakhin@hydro.nsc.ru