

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д.003.053.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 13.03.2019 г. № 6/2019

О присуждении Ягодницыной Анне Александровне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование локальных характеристик двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа» по специальности 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы, принята к защите 18.12.2018 г. (протокол заседания № 16-1/2018) диссертационным советом Д003.053.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, приказ о создании диссертационного совета №105/НК от 11.04.2012 г.

Соискатель Ягодницына Анна Александровна, 1988 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности младшего научного сотрудника в ИТ СО РАН. В 2011 г. соискатель окончила магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный университет» (НГУ) по направлению «физика», в 2014 г. окончила очную аспирантуру ИТ СО РАН по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация выполнена в Лаборатории физических основ энергетических технологий и Лаборатории процессов переноса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИТ СО РАН Бильский Артур Валерьевич.

Официальные оппоненты: Губайдуллин Амир Анварович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук и Ахметов Альфир Тимирзянович, кандидат физико-

математических наук, доцент, заведующий Лабораторией «Экспериментальная гидродинамика» Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра РАН – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанном доктором физико-математических наук, заведующим Лабораторией дифференциальных уравнений Чупахиным Александром Павловичем и доктором физико-математических наук, заведующим Лабораторией экспериментальной прикладной гидродинамики Ерманюком Евгением Валерьевичем, указала, что «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 проектирования 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... 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».

Соискатель имеет 41 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 27 работ, из них в изданиях из списка ВАК 6 работ (содержат в сумме 40 страниц). Вклад автора в опубликованных работах состоит в постановке задач, проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, подготовке результатов исследований к публикации. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. А. А. 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.

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.

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.

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.

На автореферат диссертации поступило 8 отзывов. Все отзывы положительные. В отзывах отмечено, что диссертация выполнена на высоком научном уровне и является существенным вкладом в гидродинамику микромасштабов, тема исследования является актуальной, результаты работ имеют теоретическую и практическую значимость. В отзыве д.т.н. Молочникова Валерия Михайловича, ведущего научного сотрудника Лаборатории гидродинамики и теплообмена Института энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», содержатся следующие замечания: "1. В методе micro-PIV выполняется освещение всей области исследуемого потока. Для правильной интерпретации экспериментальных данных большое значение имеет точное определение глубины корреляции, которая, в частности, зависит от глубины резкости объектива микроскопа. В автореферате отсутствует информация о количественном значении этого параметра и его соотношении с характерными размерами исследуемого течения. 2. В автореферате утверждается, что соискателем впервые обнаружен новый серпантинный режим течения несмешивающихся жидкостей в Т-образном канале. Тем не менее, на рис. 8, d представлены результаты Zhao et al. (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), наложенные на карту режимов течения, где этот режим присутствует. 3. В работе детально исследуется только снарядный режим течения несмешивающихся жидкостей в Т-образном канале. Было бы крайне интересно представить результаты подобных исследований для других режимов, в частности, для обнаруженного автором нового серпантинного режима течения». В отзыве д.т.н., профессора Деревича Игоря Владимировича, профессора кафедры прикладной математики Факультета фундаментальных наук Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ), содержатся следующие замечания: «1. В автореферате упоминается, что разработанная методика micro-PIV была использована при исследовании пульсирующих течений в микрочипе. Однако, кроме размера канала нет данных о частоте пульсаций, расходах жидкости, особенностях пульсирующего течения. 2. На рис. 2 (справа) представлено сопоставление

результатов эксперимента с аналитическим решением. Из текста автореферата неясно, как ставилась экспериментальная задача верификации и что описывает аналитическое решение. 3. На рис. 4 представлены графики распределения скорости потока в сечении микромиксера. Показано, что при числах Рейнольдса  $Re=120 - 150$  наблюдаются два экстремума в профиле скорости. Наличие экстремумов в профиле скорости вне линии симметрии может приводить к гидродинамической неустойчивости и возникновению автоколебаний в жидкости. В автореферате следовало бы отметить возможность возникновения автоколебаний в микромиксере. 4. На стр. 19 указывается, что по полям скорости построены циркуляции скорости в снарядном режиме течения и отмечается линейный рост циркуляции с ростом скорости снарядов. Из текста не понятно, что подразумевается под термином циркуляция – это максимум модуля ротора скорости, или мощность эффективного одиночного вихря скорости». В отзыве д.ф.-м.н. Веденеева Василия Владимировича, доцента кафедры гидромеханики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, содержатся замечания: «Судя по рис.6, усреднение результатов численного моделирования сильно искажает результаты: например, на рис. 6а верхняя левая и правая половина в основном соответствуют концентрациям, близким к 0 и 1, в то время как на рис. 6б концентрация в тех же областях близка к 0.5. Следует пояснить, чем вызвано столь сильное искажение и имеют ли результаты осреднения физический смысл. 2. В тексте автореферата утверждается, что серпантинный режим впервые обнаружен в данной работе (стр. 15, последнее предложение). Однако, на рис. 8d, где приведены данные Zhao et al. (2006), присутствует область серпантинного режима, т.е. он наблюдался ранее другими авторами. Следует пояснить, как это согласуется с утверждением о новизне данного результата». В отзыве д.ф.-м.н. Анискина Владимира Михайловича, старшего научного сотрудника Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, содержатся замечания: «На рис. 4 и рис. 6 используются размерные величины расстояний. Почему автор не использует нормировку на высоту канала? В таблице 1 присутствует небрежность в написании некоторых параметров, что изначально вводит в недоумение. На рис.6 используется обозначение рисунков в русской раскладке: а, б, в. В то время как на рисунках 7 и 10 раскладка английская. На рис. 8 обозначение рисунков вообще отсутствует. В работе показано, что при некоторых условиях возникает новый, не зарегистрированный ранее другими исследователями, режим, названный автором «серпантинный». На рис. 8,b этот режим обозначен красными крестиками. Однако граница серпантинного режима течения указана значительно больше, чем обнаружено экспериментально. Чем это объясняется? Кроме того на рис. 8,d приведены данные Zhao et al. 2006, где есть обозначения –

красные кресты – соответствующие, как указано в описании к рисунку, серпантинному режиму течения. В чем здесь дело и нет ли здесь противоречия?» В отзыве к.ф.-м.н. Сухановского Андрея Николаевича, старшего научного сотрудника ИМСС УрО РАН, содержатся следующие замечания: «1. Использование флуоресцентных трассеров имеет свои особенности, так при проведении PLIF измерений было замечено, что интенсивность свечения трассеров может варьироваться в ходе длительных испытаний. Производился ли контроль стабильности свойств флуоресцента в ходе серий исследований? 2. В автореферате не описано как ведут себя трассеры в микроканалах, не наблюдается ли их агрегация, седиментация, прилипание к стенкам? 3. Из автореферата не удалось получить ответ на важный вопрос о том, когда, на каких размерах начинают проявляться специфические свойства микроканалов? Если течения в используемых в работе микроканалах подобны течениям в каналах большего размера, тогда эффективнее использовать для моделирования микроканальных течений модели большего размера. Это снимает целый ряд технических проблем при измерении полей скорости и концентрации». В отзыве д.ф.-м.н. Кузнецова Геня Владимировича, главного научного сотрудника НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ТПУ, содержится следующее замечание: «По содержанию автореферата следует сделать замечание по разделу «Достоверность результатов». Автор диссертации провела достаточно сложные (возможно даже уникальные) эксперименты. Но во второй главе диссертации (если судить по автореферату), посвященной описанию методик экспериментальных исследований, отсутствует информация о систематических и случайных погрешностях (неопределенностях, как говорят в последнее время), без знания которых невозможно объективно оценить достоверность результатов экспериментальных исследований автора. В разделе «Достоверность результатов» автореферата также нет сведений о погрешностях систематического и случайного происхождения. При этом в качестве обоснования достоверности результатов проведенных опытов используется нестандартный прием - проводится сравнение с каким-то аналитическим решением. В качестве основного аргумента указывается, что «отклонение экспериментальных данных от аналитического решения составило 3%». В отзыве д.ф.-м.н. Исаева Сергея Александровича, заведующего Лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации содержатся следующие замечания: «Какова точность бесконтактных методов диагностирования полей скорости и концентраций с микронным разрешением? Какова степень согласования данных измерений и численных прогнозов полей скорости и концентраций при смешении в микромиксере Т-типа?» В отзыве д.т.н. Абиева Руфата

Шовкетовича, заведующего кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт», содержатся следующие замечания: «1. Выбор для исследований Т-образного микросмесителя из множества Т-, Х-, Y-,  $\Psi$ -образных устройств требует обоснования, поскольку Т-образная форма не является оптимальной. 2. Рис. 11 в автореферате «Зависимость циркуляции скорости в снарядах, нормированной на площадь снаряда, от скорости снаряда», по-видимому, относится к одной двухфазной системе, и не учитывает влияния вязкости фаз. 3. Содержание автореферата не дает представления о том, предпринимались ли автором попытки теоретического анализа и обобщения полученных экспериментальных данных».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что д.ф.-м.н. Губайдуллин А.А. является известным специалистом в области многофазных систем, направление его научных исследований охватывает тепломассообменные процессы в газо- и парокапельных, пузырьковых потоках, пористых средах, явления на микроуровне, процессы на границах раздела фаз. К.ф.-м.н. Ахметов А.Т. специализируется в области экспериментального исследования течения дисперсных систем в микроканальных структурах. Большой накопленный оппонентами опыт позволяет провести критическую оценку диссертационной работы Ягодницыной А.А. Выбор ведущей организации обоснован тем, что основные направления фундаментальных исследований, проводимых в ней, включают математические проблемы механики сплошных сред и механику жидкости и газов. Сотрудники ИГиЛ СО РАН д.ф.-м.н. Чупахин А.П., д.ф.-м.н. Ерманюк Е.В. являются признанными, высококвалифицированными специалистами в областях науки, непосредственно связанных с темой диссертации, и могут дать полноценную экспертную оценку научной и практической значимости результатов работы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований с помощью развитых экспериментальных методик оптической диагностики потоков на микромасштабе выявлены качественно новые закономерности течения двухкомпонентных жидкостей в микроканалах Т-типа. Впервые проведено комплексное экспериментальное исследование несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа с отношением вязкостей, варьирующимся в широком диапазоне, обнаружен новый режим течения несмешивающихся жидкостей, названный серпантинным, при котором форма границы раздела между жидкостями имеет периодическую волновую структуру. Предложен новый безразмерный параметр, позволяющий построить универсальную карту режимов для течений несмешивающихся жидкостей в микроканале Т-типа. 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. Предложена модель оценки пространственного усреднения метода *micro-LIF*, позволяющая проводить адекватную интерпретацию экспериментальных данных и верификацию данных численного моделирования.

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что полученные экспериментальные данные могут быть использованы для развития математических моделей, описывающих течения двухкомпонентных жидкостей в микроканалах. Получены новые данные по режимам течения смешивающихся и несмешивающихся жидкостей, имеющие существенное значение для развития микрогидродинамики. Предложенный новый безразмерный параметр для построения карт режимов позволяет классифицировать различные режимы течения.

Значение полученных соискателем результатов для практики подтверждается тем, что 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 проектирования микромиксеров, в том числе для проектирования устройств подачи реагентов при создании комплексных интегрированных микроканальных систем. Полученный безразмерный критерий, позволяющий построить универсальную карту режимов течения несмешивающихся жидкостей, может быть использован при проектировании микроканальных устройств и предсказания режимов течения. Полученные результаты могут быть использованы специалистами ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИМСС УрО РАН, ОИВТ РАН и других организациях.

Оценка достоверности исследований выявила, что в работе ставились специальные тестовые эксперименты, обоснованы калибровки, использовались апробированные методики экспериментов, воспроизводились экспериментальные режимы, проведено сравнение с экспериментальными и теоретическими данными других исследователей.

Личный вклад автора в исследования состоит в подготовке и проведении экспериментов, обработке результатов экспериментов и последующем анализе, построении безразмерных критериев. 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 непосредственное участие в постановке задач, решаемых в рамках выполнения диссертационной работы.

Диссертационным советом сделан вывод, что диссертация Ягодницыной Анны Александровны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований гидродинамики течения двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области микрогидродинамики, и соответствует критериям п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 29.04.2013 г.

На заседании 13 марта 2019 года диссертационный совет принял решение присудить Ягодницыной Анне Александровне ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., академик РАН



Алексеев Сергей Владимирович

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

Кузнецов Владимир Васильевич

15 марта 2019г.