

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

чл.-корр. РАН Маркович Д.М.



Маркович

«3» сентября 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование локальных характеристик двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Ягодницына Анна Александровна работала в лаборатории физических основ энергетических технологий (в должности инженера-исследователя, с 2014 года – в должности младшего научного сотрудника), а с 2016 г. в лаборатории процессов переноса младшим научным сотрудником. В 2011 году с отличием окончила магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «физика». В период с 2011 по 2014 гг. проходила очное обучение в аспирантуре Института теплофизики СО РАН.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы выдана в 2018 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, Бильский Артур Валерьевич, работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории процессов переноса в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

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

Актуальность темы:

Технологические устройства с применением микроканальных технологий стали активно разрабатываться и применяться во многих областях народного хозяйства, таких как энергетика, химия, биология. Микроканальные устройства нашли применение в различных

областях науки и техники: в качестве химических микрореакторов с применением однофазных и двухфазных потоков жидкостей, в качестве микротеплообменников для охлаждения электроники, а также в составе комплексных систем для диагностики и сортировки биологических объектов (анализаторы ДНК и т.п.). Основным преимуществом использования микроканалов в технологических процессах является экстремально высокое отношение площади поверхности к объему, что 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.

Микроканалы Т-типа с прямоугольным сечением широко используются при создании микроустройств. Это связано с простотой изготовления такого типа микроканалов и удобством подвода жидкостей. Миниатюризация технологических устройств с двухкомпонентными течениями смешивающихся и несмешивающихся жидкостей в Т-каналах требует комплексных данных о режимах течения в зависимости от физических свойств жидкостей и параметров потока. 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.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. разработка бесконтактных оптических методов измерения полей скорости (micro-PIV) и концентраций (micro-LIF) в микроканалах;
2. экспериментальное исследование гидродинамики течений и процессов перемешивания в микромиксере Т-типа. Построение карт режимов и оценка эффективности перемешивания;
3. экспериментальное исследование течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах Т-типа. Построение карт режимов и безразмерных критериев, определяющих основные параметры, влияющие на эффективность технологических устройств.

Личный вклад автора:

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.

Достоверность научных результатов подтверждена сравнением с экспериментальными и теоретическими данными других исследователей, постановками специальных тестовых

экспериментов, использованием разработанных методик экспериментов, воспроизводимостью экспериментальных режимов.

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 течения 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.

Научная 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 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. Результаты экспериментов по исследованию процессов смешения в микромиксерах Т-типа и течений несмешивающихся жидкостей в Т-образных микроканалах составляют базу для верификации данных численного моделирования.

Основные публикации по материалам диссертации:

В журналах из перечня ВАК:

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. – V. 303. – P. 547–554.
2. A. Minakov, A.Yagodnitsyna, A.Lobasov, V. Rudyak, A.Bilsky Study of fluid flow in micromixer with symmetrical and asymmetrical inlet conditions // La Houille Blanche – 2013. – №5. – P. 12-21.
3. A.A. Yagodnitsyna, A. V. Bilsky, O.A. Kabov Flow visualization in evaporating droplet on a substrate by means of micro-PIV technique // Scientific Visualization. –2016. – №8. – С. 53–58.
4. A. V. Kovalev, A.A. Yagodnitsyna, A. V. Bilsky Experimental study of liquid-liquid plug flow in a T-shaped microchannel // J. Phys. Conf. Ser. – 2016. – V. 754. – № 092001.

5. 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 // MATEC Web Conf. – 2016. – V. 84. – № 00042.

6. Минаков А.В., Шебелева А.А., Ягодницына А.А., Ковалев А.В., Бильский А.В. Расчетно-экспериментальное исследование снарядного режима течения смеси касторового и парафинового масел в микроканале Т-типа // Письма в ЖТФ. – 2017. – Вып. 18. – С. 82-89.

В журналах РИНЦ и материалах конференций:

7. 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.

8. 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.

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. 5th Int. Conf. MNF2016, 2016.

Апробация работы:

Материалы диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: 5th International Conference on Micro and Nano Flows (Milano, Italy, 2016), 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), Всерос. конф. «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий» (Новосибирск, 2010, 2012 и 2015), 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).

Решение о рекомендации работы к защите:

Диссертация «Экспериментальное исследование локальных характеристик двухкомпонентных течений жидкостей в микроканалах Т-типа» Ягодницыной Анны Александровны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы. Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством проф. РАН, д.ф.-м.н. Чернова Андрея Александровича. Присутствовали на заседании 47 человек, из них 8 докторов наук, 16 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации Ягодницыной А.А.: за – 47 человек, против – 0, воздержались – 0. Протокол №4 от «31» августа 2018 г.

Председатель семинара
д.ф.-м.н., проф. РАН

Чернов А.А.

Секретарь семинара
к.ф.-м.н., с.н.с. ИТ СО РАН

Черданцев А.В.