



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик Д.М. Маркович

«13» сентября 2022 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 газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах» выполнена Барткус Г.В. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН).

В 2017 году Барткус Г.В. присуждена степень магистра в «Новосибирском национальном исследовательском государственном университете», диплом магистра 105424 0956403. В 2021 году Барткус Г.В. там же окончил аспирантуру по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы, диплом 105424 5293656. В настоящее время Барткус Г.В. работает младшим научным сотрудником в ИТ СО РАН, лаборатория 1.1 Процессы переноса в многофазных системах.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. В настоящее время капиллярная гидродинамика двухфазного течения в микроканалах и сопутствующие им процессы тепломассобмена являются активно развивающимися направлениями науки и техники. При данном течении две фазы, которые могут быть газом, жидкостью или твердыми частицами, движутся совместно в заданной геометрии канала. Среди всего разнообразия различных двухфазных течений значительное внимание уделяется газожидкостным смесям и смесям жидкость-жидкость.

Для газожидкостного течения в микроканалах, поперечный размер которых обычно меньше капиллярной постоянной δ_c , определяющими являются капиллярные, межфазные, инерционные и вязкостные силы. Исследования закономерностей газожидкостного течения в таких каналах, которые значительно отличаются от режимов течения в больших каналах вследствие доминирования капиллярных сил, является в настоящее время

актуальной задачей, так как связано с широким применением газожидкостных и жидкость-жидкость течений в различных современных технологиях на основе микроканалов. Например, двухфазные течения в микроканалах используются в мембранных топливных элементах и испарительно-конденсационных системах термостабилизации космических аппаратов.

При уменьшении поперечного размера канала отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально диаметру канала, что обеспечивает высокую эффективность теплообмена и массообмена в микроканалах. Такие системы получают все более широкое распространение в микроэлектронике, транспорте и энергетике. Микроканалы открывают новые перспективы в управлении реакций с временным масштабом порядка нескольких миллисекунд, и прямоугольная геометрия микроканала является наиболее преимущественной и уже широко реализуемой для указанных выше применений. Например, в системах охлаждения оборудования прямоугольная геометрия сечения может обеспечить максимальную поверхность контакта фаз для теплосъема. Искривленная геометрия канала применяется для улучшения смешения фаз и являются основой для разработки пассивных микросмесителей. Большая площадь контакта фаз делает выгодным внедрение систем на основе микроканалов в биологических технологиях для анализа крови, компактных системах Lab-On-Chip, инкапсуляции клеток и их лизиса.

За последние 15–20 лет исследовательские группы со всего мира представляли свои результаты по тепло- и массообмену двухфазных течений в каналах микроразмера для разного типа геометрий. Растет число публикаций на данную тематику и проводятся многочисленные специализированные конференции по вопросам гидродинамики и тепломассообмена в микроканалах и микросистемах. Для оптимизации дизайна микроканальных систем необходимо детальное понимание механизмов формирования газожидкостного течения, реализуемых режимов, перепада давления и локальных характеристик для большого диапазона расхода фаз.

В этой связи актуальным являются проведение экспериментальных исследований капиллярной гидродинамики и межфазного массообмена при газожидкостном течении в микроканалах, определение характерных режимов течения и построение карт на их основе, измерение локальных характеристик течения для разных типов геометрий канала и с использованием фаз с различными физическими свойствами. Экспериментальное исследование требует разработки новых методов определения характеристик течения.

Цель работы: Целью данной работы является развитие методов экспериментального исследования капиллярной гидродинамики и межфазного

массообмена для газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах, получение закономерностей режимов течения и определения границ режимов, измерение локальных характеристик течения и коэффициента массоотдачи.

В рамках поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

Исследование структуры двухфазного газожидкостного течения в каналах прямоугольной (соотношение сторон $\alpha_c < 6$) и щелевой геометрии (соотношение сторон $\alpha_c > 6$) с гидравлическими диаметрами от 253 до 364 мкм с помощью высокоскоростной видеосъемки и лазерного сканирования для каналов с разными типами смесителей и используемых жидкостей.

Определение характерных режимов и статистических характеристик течения, построение карт режимов течения на их основе. Разработка метода смешения фаз в щелевых микроканалах.

Развитие методики измерения локальных характеристик течения методом лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF) и измерение с его помощью локальной и средней толщины пленки жидкости, ее распределение вдоль широкой стороны канала. Определение закономерностей на основе данного метода и сравнение с существующими моделями.

Измерение объемного коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале по измерению изменения объема газового пузыря вдоль канала, проверка применимости существующих моделей и их доработка для случая прямоугольной геометрии.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

Впервые с использованием лазерных методов определения статистических характеристик и локальной толщины пленки жидкости выполнено комплексное исследование локальных характеристик горизонтального газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах в диапазоне соотношения сторон канала от 2 до 10 для безволнового и волнового режимов течения.

С использованием метода высокоскоростной визуализации и лазерного сканирования получены основные режимы течения в прямоугольных и щелевых микроканалах для соотношения сторон канала $\alpha_c = 2, 6$ и 10 с различными смесителями для формирования газожидкостного течения и при вариации физических свойств жидкостей. С использованием скоростной визуализации и статистических характеристик течения определены границы режимов течения, измерены скорости движения снарядов, показано

определяющее влияние геометрии каналов и типа смесителя на карту режимов течения. Установлено, что Т-смеситель бокового типа позволяет расширить область существования периодического снарядного режима течения. Впервые показано значительное влияние гидрофилизации стенок микроканала на границы периодического снарядного режима течения для смеси с повышенной вязкостью.

Обосновано применение перекрестного смесителя с равномерной подачей жидкости на боковые стенки микроканала для микроканалов с соотношением сторон $\alpha_c=6$ и 10, что позволило получить устойчивые режимы течения. Впервые установлено определяющее влияние волн и межфазного трения на локальные характеристики газожидкостного течения, которые вызывают поперечное течение жидкости и равномерное орошение стенок канала, получено выравнивание поверхности пленки жидкости при высоких скоростях газа, вследствие образования трехмерных волн.

Впервые с помощью метода μ -LIF измерено распределение локальной толщины безволновой и волновой пленки жидкости в поперечном сечении прямоугольного микроканала. Доказана предсказанная ранее теоретически неравномерность толщины пленки жидкости, связанная с поперечным течением жидкости к менискам в углах прямоугольных и щелевых микроканалов, определена средняя толщина пленки и размер зоны менисков на короткой стороне канала. Установлено, что модель Тейлора дает заниженные значения для толщины пленки жидкости в прямоугольных и щелевых микроканалах для снарядного режима течения вследствие искривления поверхности жидкости капиллярными силами.

Экспериментально получены объемные коэффициенты массоотдачи в прямоугольном микроканале, используя визуализацию течения с высоким разрешением для измерения объема пузыря. Проведено сравнение измеренных коэффициентов массоотдачи для снарядного режима течения с расчетом по моделям, предложен новый подход для расчета массоотдачи в прямоугольном микроканале, учитывающий локальную структуру течения жидкости.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая и практическая значимость работы связана с получением экспериментальных данных и закономерностей о режимах течения, перепаде давления и локальных характеристиках, которые могут быть использованы при обосновании режимов работы микрожидкостных технологических устройств. Примененный в исследовании метод μ -LIF позволяет получать более полные данные о структуре распределения фаз при течениях и о тонкой пленке жидкости, что является критически важным для разработки

массообменных микрореакторов и микроканальных теплообменников. Полученные результаты могут быть использованы при разработке компактных тепломассообменных устройств в энергетике, химической технологии и системах утилизации двуокиси углерода.

Степень достоверности результатов:

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов измерений, оценкой величины погрешности измерений, проведением калибровочных экспериментов, а также сопоставлением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

На защиту выносятся:

- Результаты по экспериментальному определению границ режимов течения в горизонтальных прямоугольных и щелевых микроканалах, полученные методом лазерного сканирования и высокоскоростной визуализацией.
- Результаты по применению перекрестного смесителя для смещения жидкости и газа на входе для микроканала с большим отношением сторон.
- Результаты по экспериментальному определению локальных характеристик течения с использованием метода μ -LIF, определению областей менисков в углах канала, измерений локальной и средней толщины пленки жидкости с использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции.
- Результаты по экспериментальному определению объемного коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале и новый подход для расчета коэффициента массоотдачи для снарядного режима течения в прямоугольном микроканале.

Личный вклад соискателя. Постановка задач исследования и выбор методики измерений проведены соискателем совместно с научным руководителем. Соискателем лично проведено конструирование рабочих участков, модернизация стенда, отработка методик измерений локальных и статистических характеристик газожидкостного течения методами высокоскоростной визуализации, лазерного сканирования и лазерно-индуцированной флуоресценции (μ -LIF). Все экспериментальные данные, включенные в диссертацию, обработка экспериментальных данных, их анализ, разработка программы для получения локальных характеристик течения методом μ -LIF выполнены соискателем лично. Написание статей по материалам выполненного исследования выполнено совместно с научным руководителем.

Список из 14 работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental study of gas-liquid flow patterns in a slit channel with a cross junction mixer // Journal of Engineering Thermophysics. - 2021. - Т. 30. - №. 1. - С. 14-18.
2. Барткус Г. В., Кузнецов В. В. Экспериментальное исследование влияния физических свойств жидкости и размера сечения прямоугольного микроканала на режимы газожидкостного течения // Тепловые процессы в технике. - 2019. - Т. 11. - №3. - С. 98-105.
3. Барткус Г. В., Кузнецов В. В. Экспериментальное изучение детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // Журнал Вестник НГУ. Серия Физика. - 2016. - Т. 1. - № 11. - С. 73-79.
4. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Study of interface gas-liquid flow characteristics in a rectangular microchannel for wavy-annular flow //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2021. - Т. 2119. - №. 1. - С. 012059.
5. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental study of wavy-annular flow in a rectangular microchannel using LIF method //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2021. - Т. 2119. - №. 1. - С. 012061.
6. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Application of the laser-induced fluorescence to study local characteristics of a gas-liquid flow in rectangular microchannel //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2021. - Т. 2127. - №. 1. - С. 012008.
7. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental study of gas-liquid flow in a rectangular microchannel using LIF method //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2020. - Т. 1677. - №. 1. - С. 012050.
8. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental study of the gas-liquid flow characteristics in a rectangular channel with a large aspect ratio //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2020. - Т. 1677. - №. 1. - С. 012049.
9. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental investigation of gas-liquid flow characteristics in slit rectangular and circular channels //Journal of Physics: Conference Series. - IOP Publishing, 2019. - Т. 1382. - №. 1. - С. 012072.
10. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Experimental studying of local characteristics of gas-liquid flow in microchannels by optical methods //AIP Conference Proceedings. - AIP Publishing LLC, 2018. - Т. 1939. - №. 1. - С. 020001.

11. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Local Characteristics of Two-Phase Gas-Liquid Flow in a Microchannel Downstream of T-Shaped Mixer // Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16. - Begell House, 2018. - P. 6255-6261.
12. Bartkus G. Experimental study of gas-liquid flow local characteristics in rectangular microchannel //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 115. – С. 05015.
13. Bartkus G., Kozulin I., Kuznetsov V. Experimental investigation of two-phase gas-liquid flow in microchannel with T-junction //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 159. – С. 00004.
14. Bartkus G. V., Kuznetsov V. V. Film thickness measurement for elongated bubble flow in microchannel using LIF //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 84. – С. 00005.

Апробация работы.

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

16th International Heat Transfer Conference IHTC-16 (Beijing, 2018); International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer» (Novosibirsk, 2016); Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2021); 7^{ая} Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-7 (Москва, 2018); Международная конференция СибОптика (Новосибирск, 2015, 2016, 2017, 2018); V и VI Международный семинар с элементами научной школы для молодых ученых «Проблемные вопросы тепломассообмена при фазовых превращениях и многофазных течениях в современных аппаратах химической технологии и энергетическом оборудовании» ISHM V, ISHM VI (Novosibirsk, 2016); Российская конференция "Многофазные системы: модели, эксперимент, приложения" (Уфа, 2020); XXXIII, XXXV и XXXVI Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2019, 2020, 2021); XXI и XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2019); XIV, XV и XVII Всероссийский семинар «Динамика Многофазных Сред» с участием иностранных ученых (Новосибирск, 2015, 2017, 2021); XIV и XVI Всероссийская Школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2016, 2020); LIV и LV Международная Научная Студенческая Конференция МНСК (Новосибирск, 2016, 2017).

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация Барткус Г.В., посвященная экспериментальному исследованию капиллярной гидродинамики и межфазного массообмена для газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах, получению закономерностей режимов течения и определению границ режимов, измерению локальных характеристик течения и коэффициента массоотдачи, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» для физико-математических наук.

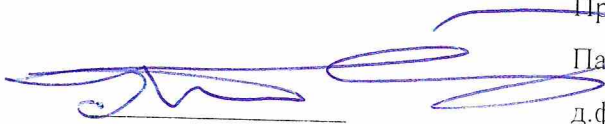
Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Экспериментальное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах» Барткус Германа Васильевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании секции 1 «Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством руководителя секции члена-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В качестве замечаний высказано: описать для каждого члена в модели массообмена соответствующий механизм массоотдачи, обсудить и сопоставить соответствие режимов течения для больших каналов, миниканалов и микроканалов, четко конкретизировать выводы по работе.

Присутствовало на заседании 12 человек из 21 членов списочного состава секции №1, в том числе 2 члена-корреспондента РАН, 10 докторов наук, 2 кандидата наук. Результаты голосования: «за» – 12 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 4 от 13 сентября 2022 года.

Председатель семинара


Павленко Александр Николаевич, чл. -корр. РАН,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН

Секретарь семинара


Пахомов Максим Александрович, д.ф.-м.н., проф.
РАН, ведущий научный сотрудник ИТ СО РАН