

На правах рукописи



Барткус Герман Васильевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ В
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ И ЩЕЛЕВЫХ МИКРОКАНАЛАХ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Владимир Васильевич

Официальные оппоненты: Губайдуллин Амир Анварович -
д.ф.-м.н., профессор, руководитель научного направления
«Математическое моделирование в механике»
Тюменского филиала Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института теоретической
и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук

Иванова Наталья Анатольевна –
к.ф.-м.н., доцент, заведующая лабораторией «Фотоники и
Микрофлюидики» Федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего
образования "Тюменский государственный университет"

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Защита состоится «1» февраля 2023 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 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 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

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



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время капиллярная гидродинамика двухфазного течения и процессы тепломассобмена в микроканалах являются активно развивающимися направлениями науки и техники. При данном течении две среды, которыми могут быть как газ, жидкость или твердые частицы, движутся совместно с определённой скоростью в заданной геометрии канала. Среди всего разнообразия различных двухфазных течений значительное внимание уделяется газожидкостным смесям и смесям жидкость-жидкость.

Для газожидкостного течения в микроканале, размер которого обычно меньше капиллярной постоянной δ_c , определяющими являются капиллярные, межфазные, инерционные и вязкостные силы. Получившиеся распределения фаз в микроканале принимают различные формы, реализуются разные режимы течения в зависимости от доминирования определенной силы, отличающиеся от течений в больших каналах. Исследование режимов течения и их локальных характеристик является в настоящее время актуальной задачей, так как связано с широким применением газожидкостных и двухжидкостных 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.

Основным преимуществом микроканалов является большие площади поверхности фаз. 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 с соотношением сторон до 10 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 является 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 исследовательскими группами представлены результаты по гидродинамике и тепло- и массообмену при двухфазном течении в каналах микроразмера для разного типа геометрий. Растет число публикаций на данную тематику и проводятся многочисленные специализированные конференции по вопросам гидродинамики и теплообмена 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 расходов фаз и соотношения сторон канала.

В этой связи **актуальным** являются проведение экспериментальных исследований капиллярной гидродинамики и межфазного массообмена при газожидкостном течении в микроканалах прямоугольного сечения с соотношением сторон до 10, 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.

Целью данной работы является развитие методов измерения и обработки данных, проведение комплексных экспериментальных исследований капиллярной гидродинамики и межфазного массообмена при газожидкостном течении в горизонтальных микроканалах с различным соотношением сторон и при изменении физических свойств жидкости.

В соответствии с указанной целью были решены следующие **задачи**:

1. Развитие экспериментальных методик и исследование структуры двухфазного газожидкостного течения в каналах прямоугольной (соотношение сторон $\alpha_c=2$) и щелевой геометрии (соотношение сторон $6<\alpha_c<10$) с гидравлическими диаметрами от 253 до 364 мкм с помощью высокоскоростной видеосъемки и лазерного сканирования для каналов с разными типами смесителей и используемых жидкостей.

2. Определение основных режимов и статистических характеристик течения, построение карт режимов течения на их основе. Разработка метода смешения фаз на входе в щелевой микроканал.

3. Развитие методики измерения локальных характеристик течения методом лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), установление с его помощью локальных характеристик течения, включая локальную и среднюю толщину пленки жидкости, ее распределение вдоль широкой стороны канала, структуру волн на поверхности пленки жидкости. Определение закономерностей газожидкостного течения на основе данного метода и сравнение с существующими теоретическими моделями.

4. Определение объемного коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале по измерению изменения объема газового пузыря CO_2 вдоль канала, проверка применимости существующих моделей и их доработка для случая прямоугольной геометрии.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

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

С помощью метода высокоскоростной визуализации и лазерного сканирования получены основные режимы газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах для соотношения сторон канала $\alpha_c=2, 6$ и 10 с различными смесителями на входе при изменении физических свойств жидкостей, установлены границы периодического снарядного режима течения для микроканалов с различным соотношением сторон. Впервые показано значительное влияние гидрофилизации стенок микроканала на границы периодического снарядного режима течения для смеси с повышенной вязкостью.

Впервые с помощью метода 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 углам канала под действием капиллярных сил, определен размер зоны менисков на короткой стороне канала. Выявлено влияние волн на интенсивность поперечных перетоков жидкости, получено выравнивание поверхности пленки жидкости при высоких скоростях газа, вследствие образования трехмерных волн.

Используя визуализацию течения с высоким разрешением для измерения объема пузыря газа экспериментально получены объемные коэффициенты массоотдачи для абсорбции CO_2 при газожидкостном течении в прямоугольном микроканале. Предложен новый подход к определению коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале на основе моделей Van Baten & Krishna (2004) и Butler и др. (2016), учитывающий локальную структуру циркуляционного течения в перемычке жидкости.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты по экспериментальному определению границ режимов течения в горизонтальных прямоугольных и щелевых микроканалах, полученные методом лазерного сканирования и высокоскоростной визуализацией.

2. Результаты по применению перекрестного смесителя для формирования газожидкостного течения в микроканалах с большим отношением сторон.

3. Результаты по экспериментальному определению локальных характеристик течения с использованием метода лазерно-индуцированной флуоресценции, измерению локальной и средней толщины пленки жидкости и определению областей менисков в углах канала.

4. Результаты по экспериментальному определению объемного коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале и новый подход для расчета коэффициента массоотдачи при снарядном режиме течения в прямоугольном микроканале.

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.

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 технологических устройств, основанных на микроканальных системах. Метод LIF позволяет получать более полные данные о структуре распределения фаз в течении и о тонкой пленке жидкости, что является критически важным в массообменных микрореакторах и микроканальных радиаторах. Полученные результаты могут быть использованы при разработке компактных тепломассообменных устройств в энергетике, химической технологии и системах утилизации диоксида углерода.

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 (LIF). Все экспериментальные данные, включенные в диссертацию, обработка экспериментальных данных, их анализ, разработка программы для получения локальных характеристик течения методом LIF выполнены соискателем лично. Написание статей по материалам исследования выполнено совместно с научным руководителем.

Данная работа выполнена в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН в соответствии с планом работ лаборатории и при финансовой

поддержке РФФИ (№19-38-90255, 18-08-01282) и РНФ (№16-19-10519, 21-19-00626).

Апробация работы. Материалы диссертации были представлены 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); 7ая 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).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 39 печатных изданиях, 14 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 25 – в тезисах докладов и трудах конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 113 наименований. Диссертация изложена на 128 страницах, включает 14 таблиц и 66 рисунков.

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 пяти разделов, включающих обзор современного состояния исследований по теме диссертации.

В *разделе 1.1* представлен обзор работ, в которых рассматривался критерий перехода к микроканальности, показана классификация каналов по размерам, и приведены основные безразмерные числа, используемые при описании гидродинамики газожидкостных течений в микроканалах.

Раздел 1.2 включает работы, в рамках которых рассматривались режимы течения в каналах различной геометрии. Показаны характерные режимы течения, реализующиеся в больших каналах и каналах микронного размера [Kuznetsov et al., 1992; Чиннов и Кабов, 2006; Kandlikar et al., 2005; Abiev, 2013 и др.]. Описаны наиболее часто используемые смесители для формирования двухфазного течения в микроканалах и приведен обзор по режимам течений в каналах с различным отношением сторон и типом смесителя на входе.

В *разделе 1.3* представлены и описаны корреляции для моделей перепада давления гомогенного и раздельного течения наиболее часто встречающиеся в работах при изучении давления в микроканалах.

Раздел 1.4 описывает известные на данный момент контактные и бесконтактные методики измерения локальных характеристик течения, такие как распределение фаз и толщина пленки жидкости, реализующиеся между газовым пузырем и стенкой канала при газожидкостном течении, являющиеся определяющими в вопросах теплообмена [Tibirica и др., 2010; Alekseenko и др., 2012]. Представлены основные корреляции для определения толщины пленки жидкости в каналах круглого и квадратного сечений. Показано, что на данный момент наблюдается дефицит работ по изучению структуры и распределения фаз в прямоугольных микроканалах с использованием бесконтактных методов, что определяет предмет данной диссертации.

В *разделе 1.5* рассматриваются различные способы изучения процессов межфазного массообмена в микроканалах и описаны механизмы моделирования таких процессов при снарядном режиме течения. Приведены основные модели массообмена наиболее часто используемые в литературе. Сравнение моделей показывает сильное расхождение в прогнозировании коэффициента массоотдачи, что говорит о необходимости детального изучения процесса массоотдачи с целью его точного прогнозирования с учетом локальных характеристик течения.

Во второй главе представлено описание экспериментальных установок и используемых методик исследования двухфазных потоков, примененных в диссертационной работе. В *разделе 2.1* описана экспериментальная установка, приведены схемы для экспериментов без физической абсорбции и при изучении процессов массообмена. Эксперименты проводились на стенде

для изучения газожидкостных течений в микроканалах. Газ поступал из баллона высокого давления через редуктор на вход контроллера расхода газа Bronkhorst EL-FLOW и далее в смеситель микроканала для формирования газожидкостного течения. Перед входом в микроканал устанавливался тройник, одно плечо которого шло на датчик давления HoneyWell 40РС. Перед измерением перепада давления датчик давления калибровался, в процессе измерений сигнал с датчика давления записывался с помощью высокоскоростного АЦП ZETLab 210 с частотой 26.6 кГц и затем обрабатывался. Измерение перепада давления позволило определить приведенную скорость газа J_{gas} в нужном сечении микроканала в предположении линейности падения давления по длине канала. Приведенные скорости фаз определены как отношение расхода фаз к поперечному сечению микроканала. Жидкость под избыточным давлением, создаваемым газом-азотом, поступала из емкости в термо-массовый регулятор расхода жидкости Bronkhorst LIQUI-FLOW и далее в смеситель микроканала. В работе использовалось 3 типа смесителей для формирования газожидкостного течения, описанные ниже. На выходе из микроканала газожидкостная смесь стекала в открытый бак, при этом газ уходил в атмосферу. Жидкость после эксперимента выливалась и для проведения экспериментов всегда использовалась новая жидкость. В качестве рабочей жидкости с различными физическими свойствами использовались: дистиллированная вода, 95% водный раствор этанола, 20.9% водный раствор глицерина; в качестве газовой фазы – азот (N_2), углекислый газ (CO_2). Для экспериментов по изучению процессов массообмена использовался 90% водный раствор этанола.

Для регистрации локальных характеристик газожидкостного течения по длине микроканалов были использованы бесконтактные методы регистрации: высокоскоростная визуализация, лазерное сканирование потока [Козулин и Кузнецов, 2011], метод лазерно-индуцированной флуоресценции [Fries и др., 2008]. Регистрация газожидкостного течения производилась с помощью камеры Optronis CR600x2 и объективов разного увеличения: 6.3x ausJENA Planachromat, 10x Mitutoyo Plan Apo. Визуализация течения проводилась в области смешения фаз, по длине микроканала и на выходе из него с целью получения данных о механизме формирования течения и для определения характерных режимов течения. Камера и LED-свет располагались по разные стороны микроканала по нормали к его поверхности, что позволило получить данные с разрешением до 3.5 мкм/пикс при высокой скорости записи 2000 кадр/с и вариации приведенных скоростей газа и жидкости. Методы лазерного сканирования и лазерно-индуцированной флуоресценции применялись после высокоскоростной визуализации для аналогичных скоростей фаз из-за невозможности одновременного измерения.

Раздел 2.2 описывает технологии изготовления микроканалов. Каналы с соотношением сторон $\alpha_c=2$ (400×200 , 380×190 мкм²) и с Т-образными смесителями бокового и прямого типов изготавливались методом мягкой литографии из полидиметилсилоксана (PDMS) в лаборатории Нанобиотехнологий в Санкт-Петербургском национальном исследовательском Академическом университете РАН. Каналы с соотношением сторон $\alpha_c=6$ и 10 (1205×200 и 2045×200 мкм²) и перекрестным смесителем изготавливались самостоятельно путем зажатия металлической пластины с прорезью между двумя стеклянными пластинами. Метод лазерного сканирования потока детально представлен в *разделе 2.3*, схема метода показана на Рисунке 1(а). Лазерный луч малой мощности просвечивает насквозь прозрачный микроканал и с обратной стороны микроканала происходит регистрация лазерного излучения при использовании фотодиода с последующей записью сигнала на АЦП. С помощью данного метода получены статистические характеристики газожидкостного течения для разных режимов.

В *разделе 2.4* описано применение метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), схема которого показана на Рисунке 1(б). Метод основан на добавлении в жидкую фазу флуоресцентного красителя Родамин 6Ж и последующего возбуждения флуоресценции с помощью лазерного излучения. В работе использовались твердотельный лазер с диодной накачкой на кристалле неодима DTL-314QT с длиной волны равной $\lambda=532$ нм. Частота лазера регулировалась с помощью генератора Hewlett Packard 214B.

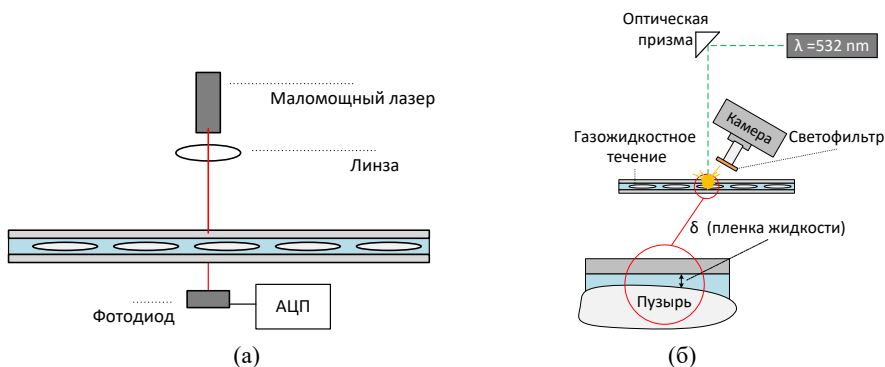


Рисунок 1. (а) Схема метода лазерного сканирования потока. (б) Схема метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF).

Интенсивность флуоресценции, имеющей отличную от лазера длину волны, пропорциональна концентрации C и толщине слоя жидкости, что позволило с помощью калибровки восстановить толщину пленки δ при газожидкостном

течении. Светофильтр ОС-12 был использован с целью отсекающей длины волны лазера на изображениях от длины волны флуоресценции. Регистрация газожидкостного течения производилась с помощью камеры Optronis CR600x2. Для данного метода проведена калибровка и показана его применимость для измерения тонких пленок жидкости в микроканале. В *разделе 2.5* указаны основные источники неопределенности измерения толщины пленки: неопределенности измерения размеров сечения микроканала, расходов газовой и жидкой фаз, погрешность датчика давления, неопределенность измерения интенсивности флуоресценции на LIF-изображениях; и приведены их значения. Относительная погрешность определения расхода жидкости была минимизирована проведением калибровки контроллера.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольных ($\alpha_c=2$) и щелевых микроканалах ($6<\alpha_c<10$), расположенных длинной стороной вверх, с различными типами смесителей для формирования течения. Были получены характерные режимы течения в прямоугольных микроканалах для течения смесей 95% этанол-азот и 20.9% глицерин-азот: снарядный периодический, переходной (непериодический), расслоенный, расслоенный волновой и кольцевой режимы течения. Примеры визуализации характерных режимов течения показаны на картах режимов, представленных на Рисунках 2, 5 и 6.

Проведены эксперименты в микроканалах с отношением сторон $\alpha_c=6$ и $\alpha_c=10$ с перекрестным смесителем на входе для формирования течения. Рисунок 2(а) демонстрирует процесс формирования газового пузыря при смыкании расположенных друг напротив друга областей жидкости, перекрывая газовый поток. Показана целесообразность использования перекрестного смесителя в микроканалах с большим отношением сторон для создания повторяющегося периодического снарядного режима течения в широком диапазоне приведенной скорости газа. На Рисунке 2(б) представлена карта режимов течения для смеси этанол-азот в микроканале 2045×200 мкм² с выделенной границей перехода от периодического снарядного в переходному (непериодическому) режиму течения.

С использованием метода лазерного сканирования потока получены и в дальнейшем обработаны сигналы для характерных режимов течения. Основываясь на обработанных данных, были построены гистограммы распределения длин газовых пузырей (L_{gas}) и перемычек жидкости (L_{liq}) для снарядного периодического и переходного режимов течения. На Рисунке 3 показаны примеры распределений для снарядного периодического (Рисунок 3(а)) и для переходного (непериодического) режимов течения (Рисунок 3(б)). Получено, что для периодического снарядного течения длины газовых пузырей и перемычек изменяются в узком диапазоне, а при увеличении

приведенной скорости газа разброс по длинам пузырей становится значительно шире, в дальнейшем это использовалось при определении границ режимов течения.

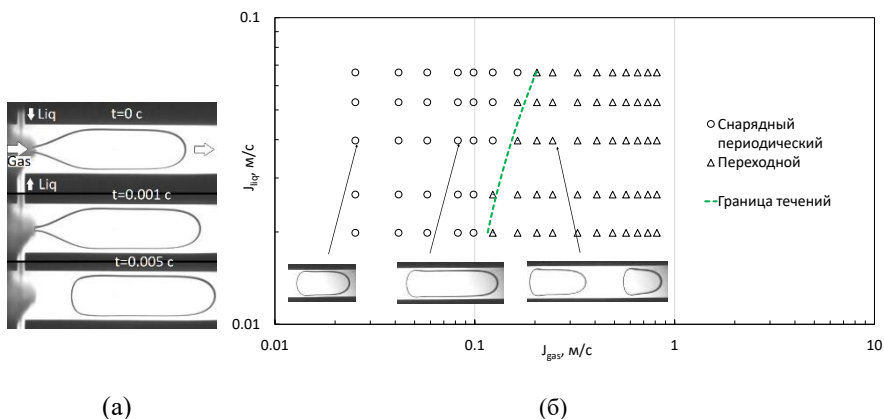


Рисунок 2. (а) Фотографии области смешения в канале $2045 \times 200 \text{ мкм}^2$ для течения смеси этанол-азот при скоростях $J_{liq}=0.041 \text{ м/с}$, $J_{gas}=0.084 \text{ м/с}$, показывающие механизм процесса формирования газового пузыря. (б) Карта режимов течения для смеси этанол-азот в канале $2045 \times 200 \text{ мкм}^2$.

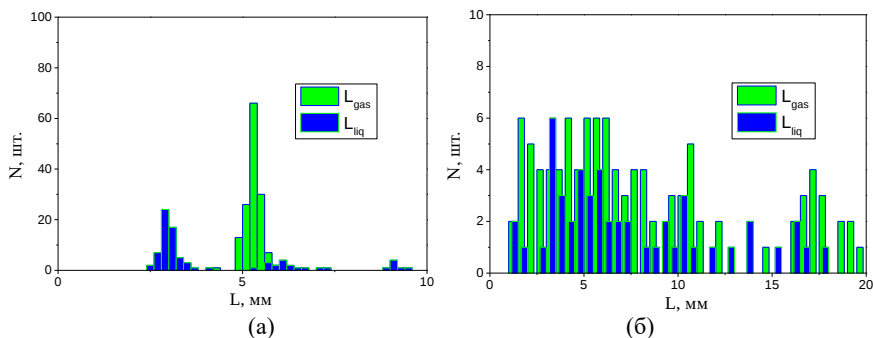


Рисунок 3. Гистограммы распределения длин газовых пузырей (L_{gas}) и перемычек жидкости (L_{liq}) для снарядного периодического режима течения смеси этанол – азот для приведенных скоростей $J_{liq}=0.041 \text{ м/с}$, $J_{gas}=0.084 \text{ м/с}$ (а) и переходного (непериодического) режима течения - $J_{liq}=0.041 \text{ м/с}$, $J_{gas}=0.25 \text{ м/с}$ в микроканале с сечением $2045 \times 200 \text{ мкм}^2$.

Используя гистограммы распределений, были построены зависимости среднеквадратичного отклонения длины сигнала, соответствующего газовым пузырям, от приведённой скорости газа с целью определения границы

перехода режимов течения (Рисунок 4). Показано, что снарядному периодическому течению для малых приведенных скоростей газа соответствует малое значение среднеквадратичного отклонения. Резкое увеличение среднеквадратичного отклонения и дальнейший рост связаны с переходом к неперiodическому режиму течения, условия перехода к которому показано на Рисунке 4 вертикальной линией.

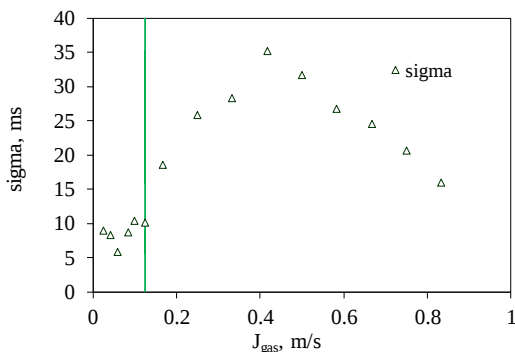


Рисунок 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения распределений длительности сигнала, соответствующего газовым пузырькам, от приведенной скорости газа при $J_{liq} = 0.041$ м/с в микроканале с сечением 2045×200 мкм².

На основе полученных статистических характеристик газожидкостного течения и высокоскоростной визуализации были построены карты режимов для разных типов газожидкостных смесей и типов смесителей (Рисунок 5). Получено, что для течения 95% этанол-азот при Т-образном смесителе бокового типа переходной режим наступает позднее и дольше реализуется снарядное периодическое течение.

Построена карта режимов для течения смеси 20.9% глицерин-азот в микроканале с модифицированной гидрофильной поверхностью стенок с целью улучшения смачиваемости при течении раствора глицерина. Получено, что гидрофилизация поверхности позволила расширить область существования снарядного периодического режима течения до приведенных скоростей газа $J_{gas} = 0.75$ м/с, также наблюдалось сужение задней части пузыря для жидкости с повышенной вязкостью (Рисунок 6).

Для обобщения экспериментальных данных для всех наборов смесей и типов смесителей построены карты режимов течения в координатах безразмерного комплекса чисел Вебер и Рейнольдса $Re^{0.2}We^{0.4}$ [Waelchli и др., 2006], где $Re = J \cdot D_h / \nu$, $We = J^2 \cdot D_h \cdot \Delta \rho / \sigma$, $\Delta \rho = \rho_{liq} - \rho_{gas}$, что позволяет учесть изменение свойств жидкости. Было получено, что для течения смесей 20.9% раствор глицерина и 95% этанол-азот для одного и того же канала данные не

обобщаются для комплекса $\text{Re}^{0.2}\text{We}^{0.4}$ в области границы режимов течения «снарядный периодический – переходной».

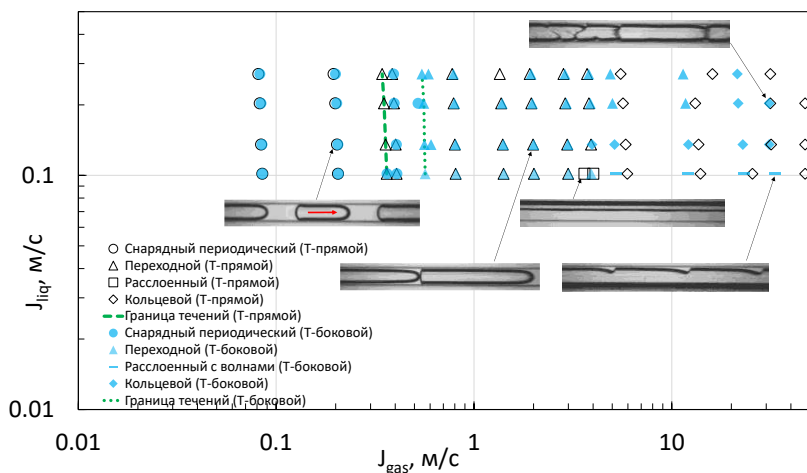


Рисунок 5. Карта режимов с фотографиями течений в прямоугольном микроканале сечения $400 \times 200 \text{ мкм}^2$ с Т-образными смесителями прямого и бокового типов при течении смеси 95% этанол-азот.

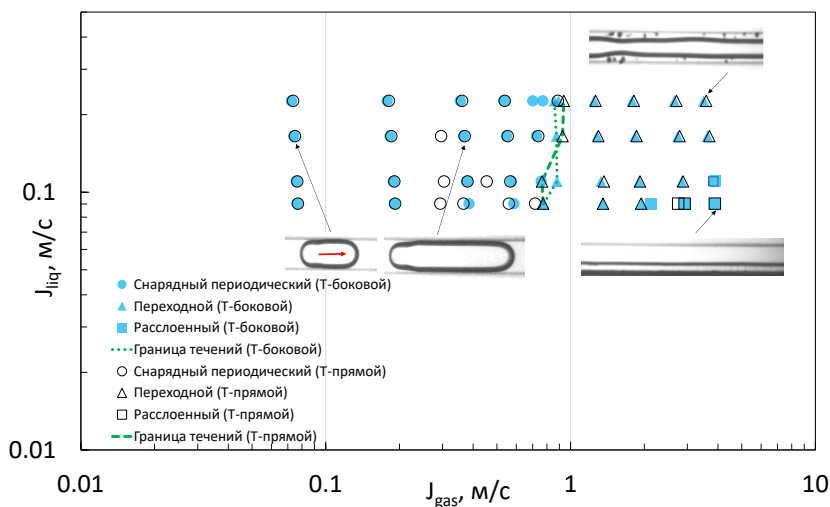


Рисунок 6. Карты режимов с фотографиями течений в прямоугольном микроканале сечения $400 \times 200 \text{ мкм}^2$ при гидрофильной модификации поверхности с Т-образными смесителями прямого и бокового типов при течении смеси 20.9% глицерин-азот.

Проведено сравнение карт режимов течения с границами режимов течения, полученных другими авторами для каналов большого размера, в координатах приведенных скоростей. На Рисунке 7 представлено сравнение карты режимов, полученной для щелевого микроканала $1205 \times 200 \text{ мкм}^2$ для течения этанол-азот, с границами режимов течения, полученных в работе Mandhane и др. (1974) при горизонтальном течении в каналах круглого сечения с диаметром $D=1.27\text{--}16.5 \text{ см}$, показанными сплошными линиями с подписями областей режимов течения. Показано, что границы перехода не совпадают для больших каналов и микроканалов; в области приведенных скоростей, отвечающей расслоенному режиму течения в больших каналах, в микроканале реализуется снарядный периодический и переходной режимы течения. Кольцевой режим в микроканалах наступает при меньших приведенных скоростях газа.

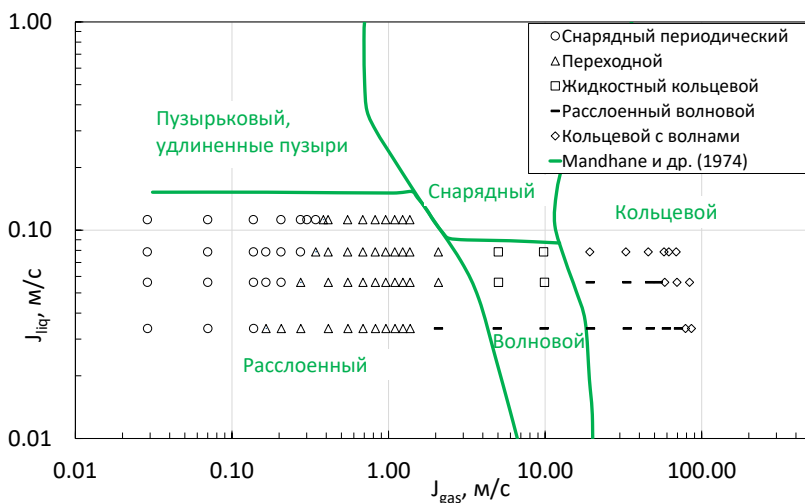


Рисунок 7. Сравнение карты режимов для течения смеси этанол-азот в щелевом микроканале с сечением $1205 \times 200 \text{ мкм}^2$ с границами режимов течения, полученными в работе Mandhane и др. (1974).

Выполнены измерения перепада давления при газожидкостном течении в щелевом микроканале $1205 \times 200 \text{ мкм}^2$, проведено сравнение с корреляциями моделей гомогенного и раздельного течения. Получено, что наилучшее предсказание перепада давления, определенное по наименьшему значению средней абсолютной ошибки (MAE), для гомогенной модели дает корреляция Dukler и др. (1964), $\text{MAE}=12\%$ при течения смеси вода-азот, $\text{MAE}=15\%$ при течения смеси этанол-азот. Для модели раздельного течения – наилучшее предсказание перепада давления дает корреляция Hwang & Kim (2006),

MAE=12% для течения смеси вода-азот, 22.1% при течении смеси этанол-азот.

Четвертая глава содержит результаты измерения локальных характеристик газожидкостного течения: толщины пленки жидкости и ее распределения вдоль широкой стороны микроканала – для разных режимов течений, полученные методом лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF) в прямоугольных и щелевых микроканалах. Толщина пленки жидкости вдоль длинной стороны канала является значимой характеристикой газожидкостного течения, необходимой для моделирования процессов теплообмена. Рисунок 8 показывает изменение толщины пленки жидкости в поперечном сечении канала при прохождении газового пузыря в снарядном периодическом режиме течения. Области менисков и тонкой пленки жидкости обозначены подписями; получено, что при прохождении газового пузыря зона менисков и толщина пленки жидкости уменьшаются от начала пузыря.

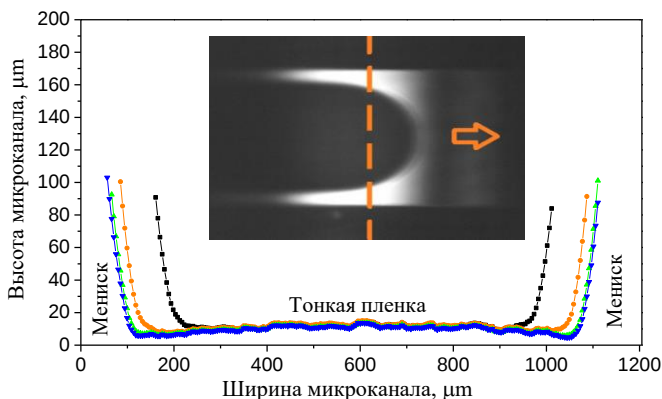


Рисунок 8. Распределение толщины пленки жидкости вдоль длинной стороны микроканала ($1205 \times 200 \text{ мкм}^2$) для течения этанол-азот при приведенных скоростях $J_{ig}=0.056 \text{ м/с}$, $J_{gs}=0.07 \text{ м/с}$. Пунктирной линией на изображении и точками показано место LIF измерения вдоль пузыря и распределение толщины пленки жидкости в этом сечении.

На Рисунке 9 представлено распределение толщины пленки жидкости для течения этанол-азот для кольцевого режима течения с волнами. Было обнаружено, что при увеличении приведенной скорости газа все больше жидкости вытесняется из области менисков в пленку жидкости. Пленка жидкости в кольцевом режиме имеет большую толщину по сравнению со снарядным периодическим режимом течения. Получено, что на короткой и длинной сторонах микроканала формируются двухмерные и трехмерные волны различной амплитуды и длины. При кольцевом режиме по пленке

жидкости пробегают волны, которые могут увеличить локальную толщину жидкостного слоя на широкой стороне канала до двух раз.

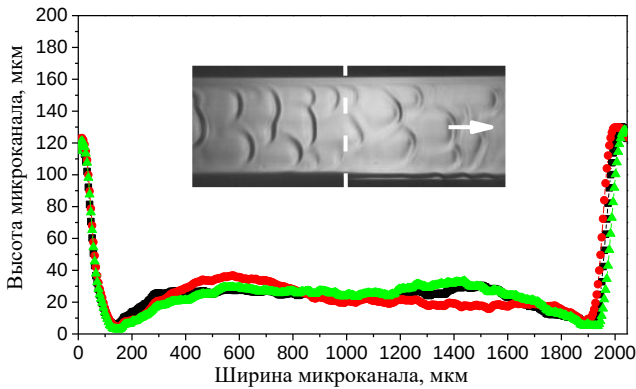


Рисунок 9. Распределение толщины пленки жидкости для течения этанол-азот в микроканале 200×2045 $\mu\text{м}^2$ при скоростях $J_{\text{lig}}=0.022$ м/с, $J_{\text{gas}}=29.02$ м/с и кадр высокоскоростной визуализации течения при тех же скоростях.

Для снарядного режима течения в прямоугольном микроканале определена средняя толщина пленки δ_{aver} между менисками по формуле

$$\delta_{\text{aver}} = \frac{\sum_{i=\text{левый_мениск}}^{\text{правый_мениск}} \delta_i}{W_{\text{пленки}}} \quad (1)$$

и проведено сравнение с известными корреляциями. На Рисунке 10 представлен график зависимости безразмерной средней толщины пленки от капиллярного числа $\text{Ca} = U_{\text{bub}} \mu / \sigma$. Данные для одного и того же капиллярного числа отвечают толщине пленки на различном расстоянии от начала пузыря: $L/a < 1$ и $L/a > 1$, где L – расстояние от начала пузыря до точки измерения толщины пленки, a – ширина микроканала. Получено, что толщина пленки жидкости максимальна в начале пузыря, и убывает с ростом расстояния от начала пузыря из-за стягивания жидкости капиллярными силами в углы канала.

Как видно, измеренная безразмерная средняя толщина пленки жидкости, представленная для 3 каналов с поперечными сечениями 2045×200 $\mu\text{м}^2$, 1205×200 $\mu\text{м}^2$ и 400×200 $\mu\text{м}^2$ для снарядного режима течения не соответствует закону Тейлора [Taylor, 1961; Aussillous & Quere, 2000] и имеет более высокие значения, как в начале пузыря $L/a < 1$, так и при удалении $L/a > 1$. Тенденция к совпадению средней безразмерной толщины пленки

жидкости с законом Тейлора наблюдается только при уменьшении толщины пленки в задней части пузыря.

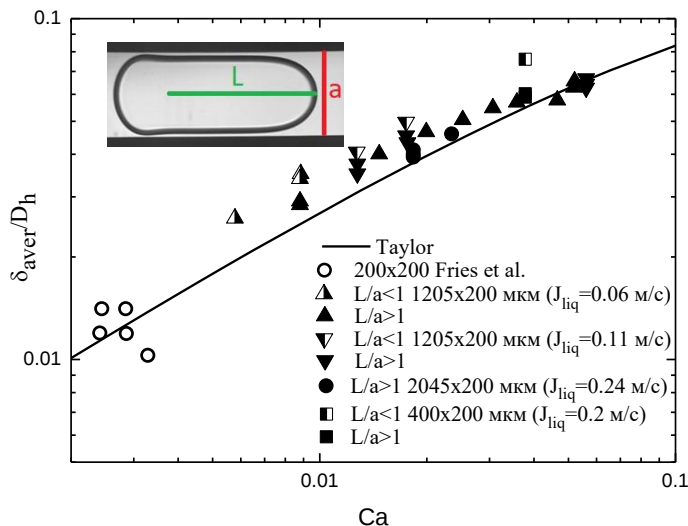


Рисунок 10. Зависимость безразмерной средней толщины пленки жидкости от капиллярного числа при течении смеси этанол-азот.

Совпадение экспериментально измеренной безразмерной средней толщины пленки с законом Тейлора наблюдается для капиллярных чисел $Ca > 0.05$, соответствующих переходному режиму течения.

Пятая глава описывает результаты исследования межфазного массообмена при течении смеси 90% (м) этанол-диоксид углерода для снарядного режима течения в прямоугольном горизонтальном микроканале, расположенном на длинной стороне канала.

Проведены эксперименты, направленные на разработку метода измерения объема снарядов при течении смеси этанол-азот, основанного на цифровой обработке изображений потока, получена неопределённость для измерения объема газового снаряда при визуализации течения сверху. Получено, что неопределённость в определении объема снаряда по разработанной методике возрастает при увеличении расхода газа и не превышает 10% для всего диапазона измерений. Измерения зависимости скорости снаряда от приведенной скорости смеси показали, что коэффициент скольжения в микроканале $W = ((U_{bub} - U_{tp}))/U_{bub}$ зависит от приведенной скорости смеси и равен 0.2 для приведенной скорости смеси 0.5 м/с.

Измерение коэффициента массоотдачи выполнено для периодического снарядного режима течения для смеси этанол-диоксид углерода в диапазоне приведенных скоростей газа и жидкости, рассмотренном для течения смеси

этанол-азот. Определение объемного коэффициента массоотдачи осуществлялось по измерению изменения объёма снаряда в начале и конце канала в рамках модели элементарной ячейки с равномерной концентрацией по следующей формуле

$$k_L a = (1 - \varphi) \frac{U_{bub}}{L_{chan}} \ln \left(\frac{C_* - C_0}{C_* - C_1} \right) \quad (2)$$

здесь L – длина участка измерения массоотдачи, C_i – мольная концентрация растворенного газа в жидкости, индексы *, 0 и 1 соответствуют равновесной концентрации растворенного газа, начальной и конечной концентрации на длине участка измерения, соответственно. На Рисунке 11 приведена зависимость объемного коэффициента массоотдачи от приведенной скорости газа и показано увеличение коэффициента массоотдачи при увеличении приведенной скорости газа с выходом на насыщение.

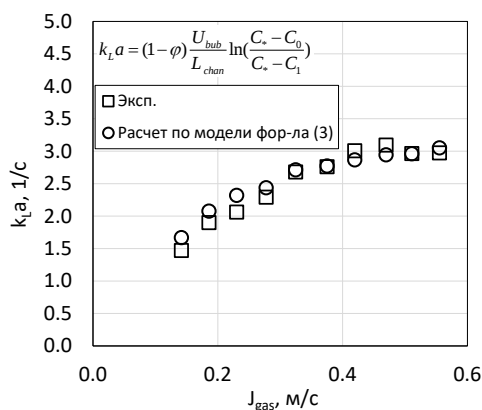


Рисунок. 11. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи, рассчитанного по (2), от приведенной скорости газа в сравнении с расчетом по модели (3).

Разработан метод расчета коэффициента объемной массоотдачи в прямоугольном микроканале, основанный на модели Butler и др., 2016 для канала с круглым сечением. Метод расчета учитывает массоперенос в головной и хвостовой частях снаряда при наличии циркуляционного течения в жидкой перемычке, массоперенос в пленке жидкости в области снаряда по модели Higbie (1935) и тонком пристенном слое жидкости в области жидкой перемычки, ограниченном изолинией скорости, соответствующей границе зоны циркуляции. Он основан на решении уравнений для расчета концентрации растворенного газа в перемычке жидкости C_{slug} и концентрации растворенного газа в пленке и слое жидкости на стенке C_{film} . Средняя концентрация растворенного газа в элементарной ячейке рассчитывается как сумма концентраций C_{slug} и C_{film} , определенных в

результате численного решения уравнений, с учетом соответствующих объемов, и используется далее для определения полного объемного коэффициента массоотдачи по (2).

В рамках предложенной модели учитывались следующие характеристики циркуляционного течения в канале прямоугольного сечения, полученные Abadie и др., 2013:

1) при расчете коэффициента массоотдачи вместо полной передней и задней торцевой площади пузыря S_{caps} использовалась площадь S_{caps_lim} , отвечающая зоне рециркуляции в перемычке жидкости, показанной на Рисунке 12(а), как области массообмена с наибольшей интенсивностью. Пунктиром на Рисунке 12(а) проведены линии через центры зоны рециркуляции, проекция которых на головную и хвостовую части снаряда близки к положению разделяющей изолинии. Контур области в поперечном сечении микроканала, проведенный через центры циркуляции в перемычке жидкости, представлен на Рисунке 12 (б);

2) при определении времени контакта θ использовались скорость циркуляции U_{circ} и длина дуги L_{cap} , показанная Рисунке 12 (в), полученные Abadie и др., 2013 для прямоугольного канала с соотношением сторон 2.5 при коэффициенте скольжения $W=0.2$, которые соответствуют условиям экспериментов.

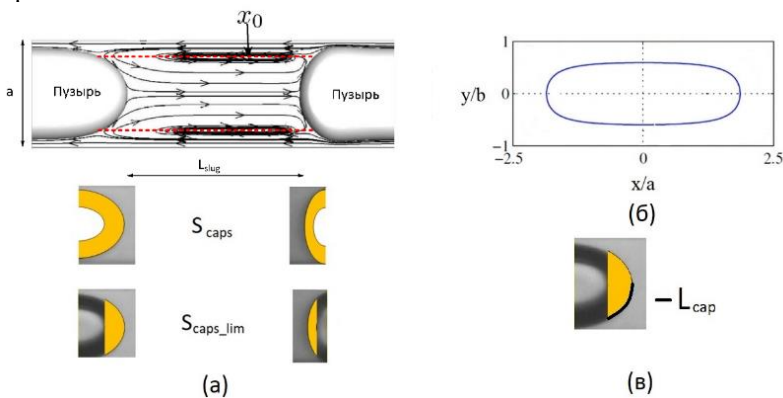


Рисунок 12. (а) Схематичное представление перемычки жидкости при снарядном режиме течения с выделением области циркуляции и направлением скорости жидкости внутри нее [Abadie и др., 2013]; разделяющая изолиния скорости циркуляции выделяет на торцевых частях пузыря области S_{caps_lim} , соответствующие внутренней зоне рециркуляции, (б) контур области, ограничивающий внутреннюю зону циркуляции в перемычке жидкости для микроканала с соотношением сторон $\alpha_c=2.5$ при коэффициенте скольжения $W=(U_{bub}-U_{tp})/U_{bub}=0.2$. [Abadie и др., 2013], (в) дуга L_{cap} , определенная по форме поперечного сечения внутренней рециркуляционной зоны.

Для определения объемного коэффициента массоотдачи использовались следующие коэффициенты массоотдачи для передней и задней части снаряда, плёнки жидкости и тонкого слоя на стенке в жидкой перемычке:

$$(k_L)_{caps} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_{diff} U_{circ}}{L_{cap}}} \quad (3)$$

$$(k_L)_{film_bub} = \frac{2}{16\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_{diff} U_{bub}}{L_{film_bub}}} \quad (4)$$

$$(k_L)_{film_slug} = 4.11 \frac{D_{diff}}{D_h} \quad (5)$$

В этих соотношениях корректирующий множитель для коэффициента массоотдачи в пленке жидкости, равный 1/16, выбран из условия наилучшего согласия экспериментальных данных с расчетом (минимальная средняя абсолютная ошибка равна 5.6%). Его введение связано с тем, что при расчете массообмена в пленке жидкости необходимо учитывать ее концентрационную неоднородность, что приводит к занижению потока растворяющегося компонента на границе газ-жидкость. Сравнение экспериментальных данных с расчетом представлено на Рисунке 11. Как видно, расчет хорошо обобщает экспериментальные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено комплексное исследование локальных характеристик горизонтального газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах в диапазоне соотношения сторон канала от 2 до 10 (200×400, 380×190, 1205×200 и 2045×200 мкм²) с использованием лазерных методов определения статистических характеристик течения и локальной толщины пленки жидкости для безволнового и волнового режимов течения. Получены и проанализированы данные на основе высокоскоростной визуализации режимов течения. Обработаны сигналы лазерного сканирования газожидкостного течения и выполнены измерения методом LIF. Проведены эксперименты по определению объемного коэффициента массоотдачи в канале прямоугольной геометрии.

По итогам работы получены следующие основные результаты:

1. С помощью метода высокоскоростной визуализации и лазерного сканирования получены основные режимы течения и их границы в прямоугольных и щелевых микроканалах для соотношения сторон канала $\alpha_c=2, 6$ и 10 с Т-образными и перекрестным смесителями и при вариации

физических свойств жидкостей. Установлены границы периодического снарядного режима течения для микроканалов с различным соотношением сторон. Получено увеличение диапазона снарядного периодического режима течения для смеси 20.9% глицерин-азот благодаря гидрофилизации стенок микроканала.

2. Методом лазерного сканирования потока проведены измерения статистических характеристик газожидкостного течения и построены гистограммы распределения длин газовых пузырей и жидких перемычек и показано, что для снарядного периодического режима течения их значения изменяются в узком диапазоне. При увеличении приведенной скорости газа (переходной режим) разброс по длинам становится значительно шире. Впервые для всех исследованных систем построены карты режимов на основе статистического анализа и данных визуализации. Показано, что карты, построенные в координатах $Re^{0.2}We^{0.4}$, не позволяют учесть свойства жидкости и дают плохое обобщение экспериментальных данных для прямоугольных каналов по границе перехода «снарядный периодический режим-переходной».

3. Впервые была применена перекрестная геометрия смесителя с равномерной подачей жидкости на боковые стенки микроканала для щелевого микроканала с целью получения устойчивого повторяющегося течения. Сравнение характерных режимов течения для прямоугольных и щелевых микроканалов показало наличие тех же самых режимов течения при использовании перекрестного устройства смешения, что говорит о целесообразности использования подобных смесителей в микроканалах с большим соотношением сторон.

4. Выполнено измерение перепада давления при двухфазном течении в щелевом микроканале 1205×200 мкм² и проведено сравнение с моделями гомогенного и раздельного течения для разных корреляций. Получено, что наилучшее предсказание давления, определенное по наименьшему значению средней абсолютной ошибки (MAE), для гомогенной модели дает корреляция Dukler и др., для модели раздельного течения – корреляция Hwang & Kim.

5. Впервые выполнено детальное экспериментальное изучение внутренней структуры горизонтального газожидкостного течения смеси этанол-азот для разных режимов течения методом LIF в прямоугольном и щелевых микроканалах. Построены распределения толщины пленки жидкости и вычислены средние значения толщины пленки между менисками. Показано убывание локальной и средней толщины пленки жидкости при удалении от начала пузыря. Выявлено влияние волн на интенсивность поперечных перетоков жидкости, получено выравнивание поверхности пленки жидкости при высоких скоростях газа, вследствие образования волн на поверхности пленки. Построена безразмерная зависимость средней

толщины пленки жидкости в прямоугольных и щелевых микроканалах от величины капиллярного числа и показано, что значение толщины пленки в микроканалах для снарядного периодического режима течения выше, чем по предсказанию закона Тейлора и его можно использовать для оценки толщины. Для переходного режима течения закон Тейлора хорошо предсказывает безразмерную среднюю толщину пленки жидкости при $Ca > 0.05$.

6. Выполнено экспериментальное изучение процесса массообмена при течении смеси этанол-диоксид углерода для снарядного периодического режима течения в канале с соотношением сторон $\alpha_c = 2$. На основе результатов визуализации течения и предложенного метода измерения объема пузыря определен объемный коэффициент массоотдачи. Предложен физически обоснованный подход для расчета объемного коэффициента массоотдачи, основанный на моделях Van Baten & Krishna и Butler и др., в котором учитывается локальная циркуляционная структура течения в перемычке жидкости и массообмен в пристенном слое жидкости. Установлено хорошее соответствие экспериментальных данных для прямоугольного микроканала с расчетом по предложенной модели массоотдачи.

Основное содержание диссертации изложено в следующих рецензируемых работах:

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. – Vol. 30. – №. 1. – P. 14–18. (из перечня ВАК)
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. (из перечня ВАК)
3. Барткус Г. В., Кузнецов В. В. Экспериментальное изучение детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольном микроканале // *Вестник НГУ. Серия: Физика* – 2016. – Т. 1. – № 11. – С. 73-79. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 2119. – №. 1. – P. 012059. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 2119. – №. 1. – P. 012061. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 2127. – №. 1. – P. 012008. (из перечня ВАК)

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. – Vol. 1677. – №. 1. – P. 012050. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 1677. – №. 1. – P. 012049. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 1382. – №. 1. – P. 012072. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 1939. – №. 1. – P. 020001. (из перечня ВАК)
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. (из перечня ВАК)
12. Bartkus G. Experimental study of gas-liquid flow local characteristics in rectangular microchannel //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Vol. 115. – P. 05015. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 159. – P. 00004. (из перечня ВАК)
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. – Vol. 84. – P. 00005. (из перечня ВАК)

Подписано к печати 2022г. Заказ №
Формат 60х84/16. Объем 1.0 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

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