

Отзыв официального оппонента

о диссертации Барткуса Германа Васильевича «Экспериментальное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность диссертационной работы. В последние годы исследование двухфазных течений в микромасштабных системах становится одним из важнейших направлений в связи с широким применением микрофлюидных технологий в различных областях науки и техники. Микромасштабные жидкостные системы являются основой высокоэффективных исследовательских инструментов для широкого спектра современных биологических и медицинских исследований, разработки и тестирования химических реагентов повышения нефтеотдачи, измерения свойств жидких сред и много другого. Двухфазное течение в микроканалах применяют для создания высокоэффективных систем охлаждения для микро- и оптоэлектроники и энергетического оборудования. В этой связи актуальной является задача изучения механизмов формирования режимов двухфазного течения в микроканалах и установление ключевых факторов, влияющих на характер течения и процессы межфазного теплообмена в микромасштабе. Диссертация Барткуса Германа Васильевича нацелена на решение этой актуальной задачи. В диссертации представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики и межфазного массообмена газожидкостных течений при влиянии типа смесителя, геометрии микроканалов (прямоугольные и щелевые с различным соотношением сторон) и свойств жидкостей с использованием лазерных методов диагностики потоков и высокоскоростной видеорегистрации процесса. Полученные результаты имеют важную теоретическую и практическую ценность и позволяют глубже понять влияние микромасштабных эффектов и особенностей смешения фаз на механизмы структурирования газожидкостного течения.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что:

Установлены основные режимы газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах с разным соотношением сторон для различных типов входных смесителей и свойств жидкостей. Показано, что улучшение смачиваемости стенок микроканала приводит к расширению области существования периодического снарядного режима течения для смеси с глицерином.

Определены локальные характеристики горизонтального газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах с соотношением сторон от 2 до 10 на основе статистических характеристик и локальной толщины пленки жидкости для безволнового и волнового режимов течения.

Подтверждена неравномерность распределения локальной толщины безволновой и волновой пленки жидкости в поперечном сечении микроканала, которая обусловлена движением жидкости в область менисков под действием капиллярных сил. Выявлено влияние волн на интенсивность поперечных перетоков жидкости и показано, что при высоких скоростях газовой фазы происходит выравнивание поверхности пленки жидкости.

Предложен новый подход к определению объемного коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале, учитывающий локальную структуру циркуляционного течения в перемычке жидкости. Измерены объемные коэффициенты массоотдачи для абсорбции углекислого газа при газожидкостном течении в прямоугольном микроканале.

Научная и практическая значимость. Полученные в диссертационной работе новые закономерности распределения фаз в газожидкостном потоке в микроканалах, данные о влиянии типа смесителя на структуру течения, результаты измерения профиля плёнки жидкости, а также метод и модель измерения объемного коэффициента массоотдачи могут быть применены для усовершенствования математических и численных моделей

прогнозирования оптимальных режимов течения и проектирования микроканальных систем. Области применения полученных результатов включают теплотехнику, энергетику и химическую технологию.

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

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, указана научная новизна полученных в диссертации основных результатов, выносимых на защиту, обоснована их теоретическая и практическая значимость, отмечен личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** представлен подробный, аналитический обзор публикаций, посвященных исследованию капиллярной гидродинамики газожидкостного течения. Выполнен сравнительный анализ методик исследования таких характеристик газожидкостного течения как толщина жидкой пленки в микроканале и массообмен при физической абсорбции. В конце главы резюмируются основные проблемы в данной области исследований и формулируется развернутая цель работы.

Во **второй главе** дано описание экспериментального стенда, приведены технические характеристики экспериментального оборудования. Обоснован выбор методов и инструментов изучения характеристик газожидкостного течения, включающих высокоскоростную визуализацию потока, метод лазерного сканирования потока и метод лазерно-индуцированной флуоресценции. Подробно описана методика изготовления прямоугольных и щелевых микроканалов. Приведены результаты измерения свойств и характеристик материалов и жидкостей, использованных в экспериментах. Описана процедура калибровки методов и приведены соответствующие результаты, а также определены погрешности измерений.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования структуры газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых каналах с использованием методов высокоскоростной видеосъемки и лазерного сканирования потока. На основе статистического анализа и данных визуализации построены карты характерных режимов течения и определены их границы. Изучено влияние типа смесителя (прямой, боковой, перекрестный) и свойств жидкости на режимы течения. Показано, что применение смесителя бокового типа позволяет расширить область существования периодического снарядного режима течения по сравнению со смесителем прямого типа. Установлено, что применение перекрестного смесителя потоков жидкой и газовой фаз позволяет генерировать устойчиво повторяющиеся течения в щелевых микроканалах. Измерен перепад давления в щелевом микроканале и выполнено сравнение с моделями гомогенного и раздельного течения для разных корреляций.

В **четвертой главе** с помощью метода лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF метода) изучена внутренняя структура горизонтального газожидкостного течения смеси этанол-азот для разных режимов течения в прямоугольном и щелевых микроканалах. Построены профили толщины пленки жидкости вдоль длинной стороны микроканала, вычислены средние значения толщины пленки между менисками и выделены области менисков. Показано, что толщина пленки жидкости под пузырьком, движущемся в микроканале, уменьшается от начала пузыря к его корме. 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 толщина пленки в микроканалах для снарядного периодического режима течения выше, чем предсказано законом Тейлора из-за искривления поверхности жидкости капиллярными силами.

В пятой главе приведены результаты экспериментального исследования межфазного массообмена при физической абсорбции в прямоугольном микроканале. Проведена калибровка метода измерения объема пузыря, основанная на визуализации течения, на модельной смеси (этанол-азот) без абсорбции для снарядного режима течения. Показано, что ошибка в определении объема газового пузыря менее 10% для максимальных расходов по газу.

Изучен процесс массообмена для смеси этанол-диоксид углерода для снарядного периодического режима течения на основе визуализации течения. Выведено общее уравнение определения объемного коэффициента массоотдачи в рамках элементарной ячейки и вычислен объемный коэффициент массоотдачи. Предложена модель расчета коэффициента массоотдачи для канала прямоугольной геометрии на основе известных моделей Van Baten and Krishna и Butler, в которой учитывается рециркуляционная структура течения в перемычке жидкости и массообмен в пристенном слое жидкости. Показано хорошее согласие между измеренным объемным коэффициентом массообмена и предсказанным по предложенной модели.

В заключении приведены основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Результаты получены с применением высокоточных лазерных методов диагностики и современного исследовательского и измерительного оборудования. Детально разработаны и описаны методики измерений и обработки результатов, а также проанализированы основные источники погрешностей. Выполнены калибровочные эксперименты и оценены погрешности измерений. Показана хорошая воспроизводимость результатов и проведено их сравнение с теоретическими моделями и результатами исследований других авторов. Основные положения и выводы диссертации соответствуют цели и задачам исследования. В целом, достоверность полученных автором результатов и их обоснованность не вызывает сомнений.

Апробация работы и автореферат. Результаты, представленные в диссертационной работе Барткуса Г. В., прошли апробацию на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях и семинарах. Основные результаты диссертационного исследования изложены в 14 научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а также в 25 тезисах докладов и трудов конференций. Автореферат в полной мере отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации.

1. Свойства используемых жидкостей в таблице 2.1 были измерены или взяты из справочной литературы? Какой? Непонятно с чем связан выбор такой странной концентрации глицерина - 20.9%. В таблице 2.1 не приведены свойства 90% смеси этанола с водой, использованной в экспериментах с абсорбцией в главе 5.
2. Необходимо пояснить зачем нужен онлайн-конвертор для измерений, что конвертировали? Связано ли это с особенностями используемых приборов?
3. В экспериментальной части метод лазерного сканирования описан очень сжато по сравнению с LIF методом, отсутствуют результаты калибровки, не приведены характеристики лазерного пучка.
4. Не совсем понятно, как вычисляли среднюю толщину пленки жидкости (формула (4.1)). Будет ли она зависеть от того с каким шагом измеряется суммируемая локальная толщина пленки вдоль сечения канала?
5. В работе совершенно без внимания остался вопрос о влиянии смачиваемости боковых стенок микроканалов (ПДМС и металл) и их шероховатости (качества обработки поверхности) на процесс формирования менисков. Не показано, насколько отличаются краевые углы смачивания исследуемых жидкостей на стекле, ПДМС и металле и насколько существенно они изменяются после гидрофилизации.

Указанные замечания не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы и не имеют принципиального характера. Работа выполнена на высоком научном уровне.

Диссертация Барткуса Германа Васильевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую новые научные результаты. По объёму выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертация полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Барткус Герман Васильевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент: заведующий научно-исследовательской лабораторией фотоники и микрофлюидики, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

10 января 2023 г.



Иванова Наталья Анатольевна

Адрес: 625003, г. Тюмень, ул. Володарского 6, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики.

Тел.: +7 (3452) 59-74-00, доб. 17134

Адрес электронной почты: n.a.ivanova@utmn.ru

