

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**на диссертационную работу Барткуса Германа Васильевича
«Экспериментальное исследование локальных характеристик
газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа
и плазмы**

Актуальность темы диссертации связана с широким применением газожидкостных и двухжидкостных течений в различных современных технологиях, основанных на использовании каналов с характерными размерами порядка микрона, в частности, в мембранных топливных элементах, испарительно-конденсационных системах термостабилизации космических аппаратов др. Широкое распространение микроканалов в микроэлектронике, транспорте и энергетике объясняется, в частности, высокой эффективностью тепло- и массообмена.

В работе Барткуса Г. В. получены **новые научные результаты**. В частности, установлены основные режимы течения в прямоугольных и щелевых микроканалах с различными смесителями и разными составами газожидкостной смеси. Проведены измерения статистических характеристик газожидкостного течения и построены карты режимов на основе статистического анализа и данных визуализации. Выполнено детальное экспериментальное изучение внутренней структуры горизонтального газожидкостного течения смеси этанол-азот для разных режимов течения методом лазерно-индуцированной флуоресценции. Построены распределения толщины пленки жидкости и вычислены средние значения толщины пленки между менисками. Изучено влияние волн на пленке на интенсивность поперечных перетоков жидкости. Выполнено экспериментальное изучение процесса массообмена при течении смеси

этанол-диоксид углерода для снарядного периодического режима течения в канале и определен объемный коэффициент массоотдачи.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов работы обеспечивается использованием современных методов измерений, проведением калибровочных экспериментов и оценкой величины погрешности измерений, а также сопоставлением полученных результатов с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Научная и практическая значимость. Результаты данной работы являются весомым вкладом в развитие гидродинамики и теплофизики двухфазных течений в микроканалах. Полученные экспериментальные данные о режимах течения, о структуре распределения фаз в течении, о поведении пленки жидкости могут быть использованы при обосновании режимов работы технологических устройств, в частности, массообменных микрореакторов и микроканальных радиаторов. Результаты работы являются практически значимыми для разработки компактных тепломассообменных устройств в энергетике, химической технологии и системах утилизации диоксида углерода.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц, включая 66 рисунков, 14 таблиц и список литературы, состоящий из 113 наименований.

Во введении представлена общая характеристика работы. Показана актуальность выбранной темы исследования. Определены цели и задачи исследования. Сформулированы выносимые на защиту положения. Указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

Первая глава состоит из пяти разделов и посвящена детальному аналитическому обзору литературы. В результате сделан вывод о необходимости изучения структуры и распределения фаз в прямоугольных микроканалах с использованием бесконтактных методов и детального изучения процесса массоотдачи с учетом локальных характеристик течения.

Вторая глава состоит из четырех разделов и содержит описание экспериментальных установок и методик, использованных при проведении исследований двухфазных течений в микроканалах. Описана экспериментальная установка, а также приведены схемы для экспериментов без физической абсорбции и при изучении процессов массообмена. Представлен процесс изготовления микроканалов. Изложен метод лазерного сканирования потоков. Описано применение метода лазерно-индуцированной флуоресценции.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах, с различными типами смесителей для формирования течения. В экспериментах 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. Основываясь на обработанных данных лазерного сканирования потока, были построены гистограммы распределения длин газовых пузырей и перемычек жидкости для снарядного периодического и переходного режимов течения. На основе полученных статистических характеристик газожидкостного течения и высокоскоростной визуализации были построены карты режимов для разных типов газожидкостных смесей и типов смесителей. Проведено сравнение карт режимов течения с границами режимов течения, полученных другими авторами для каналов большого размера, в координатах приведенных скоростей. 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. Выполнены измерения перепада давления при

газожидкостном течении в щелевом микроканале, проведено сравнение с корреляциями моделей гомогенного и раздельного течения.

Четвертая глава содержит результаты измерения локальных характеристик газожидкостного течения, а именно, толщины пленки жидкости и ее распределения вдоль широкой стороны микроканала – для разных режимов течений, полученные методом лазерно-индуцированной флуоресценции в прямоугольных и щелевых микроканалах. Показано, что в поперечном сечении канала при прохождении газового пузыря в снарядном периодическом режиме течения зона менисков и толщина пленки жидкости уменьшаются от начала пузыря. Для кольцевого режима течения с волнами смеси «этанол-азот» было обнаружено, что при увеличении приведенной скорости газа все больше жидкости вытесняется из области менисков в пленку жидкости. В кольцевом режиме пленка имеет большую толщину по сравнению со снарядным периодическим режимом течения.

В пятой главе описаны результаты исследования межфазного массообмена в снарядном режиме течения смеси «этанол-диоксид углерода» в прямоугольном горизонтальном микроканале. Определение объемного коэффициента массоотдачи осуществлялось по измерению изменения объёма снаряда в начале и конце канала в рамках модели элементарной ячейки с равномерной концентрацией. Установлена зависимость объемного коэффициента массоотдачи от приведенной скорости газа и показано его увеличение при увеличении приведенной скорости газа с выходом на насыщение. Для расчета объемного коэффициента массоотдачи использовались коэффициенты массоотдачи для передней и задней части снаряда, плёнки жидкости и тонкого слоя на стенке в жидкой перемычке.

В конце каждой главы сформулированы выводы.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования.

Замечания по содержанию диссертации.

1. В исследовании получены и проанализированы различные режимы газожидкостных течений в микроканалах: снарядный, переходный, кольцевой. Наиболее детально изучен снарядный режим. Однако без объяснения причин из рассмотрения выпал пузырьковый режим.
2. В выводах главы 4 и в Заключение написано «значение толщины пленки в микроканалах для снарядного периодического режима течения выше, чем по предсказанию закона Тейлора и его можно использовать для оценки толщины». Создается впечатление, что можно использовать закон Тейлора, хотя это не так.
3. Некоторые подписи к рисункам недостаточно информативны. Например, подпись к рис. 5.4 не соответствует изображению, на рис. 5.12, 5.14 не ясно, где эксперимент, а где расчет.
4. Диссертация написана на русском языке, но при этом есть надписи на рисунках на английском.
5. В целом рукопись хорошо оформлена, изложена достаточно четко и ясно, тем не менее присутствуют опечатки, стилистические погрешности, жаргонные выражения. Например, «характеристики течения ...обладают различными свойствами», «длинной свободного пробега», В таб. 1.1: «Переходные микроканалы $1 \text{ мкм} \geq Dh > 0.1 \text{ мкм}$, Наноканалы $0.1 \text{ мкм} \geq Dh$ » (с.9), «в раздельном течении» (с.13), «представлены для работы Y. Zhao» (с.13), должно быть «в работе», такой оборот повторяется. Далее, «для последующего предсказывания» вместо «предсказания» (с.18), «имеет положительную производную наклона» (с.19), «для определения перепада давления на трение» (с.20, 74), «по определению двухфазного перепада давления» (с.73), «использовать весь объем жидкости в перемычке» (с.99), по смыслу должно быть «в ячейке», «что не является совсем правильным» (с.100) и др.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

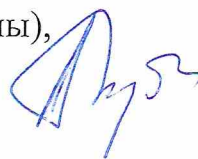
Заключение.

Работа является законченным диссертационным исследованием, выполнена на достаточно высоком научном уровне, а ее результаты имеют научно-практическую значимость. Основные результаты диссертации доложены на ряде международных и всероссийских конференций и опубликованы в научной печати, в том числе в 14 статьях в журналах, включенных в перечень ВАК РФ. Автореферат верно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа по актуальности, научной новизне, основным положениям и выводам соответствует 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 присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор

28.12.2022



А.А. Губайдуллин

Руководитель научного направления
«Математическое моделирование в механике»
ТюмФ ФГБУН Института теоретической
и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
625026, г. Тюмень, ул. Таймырская, д. 74
Тел. +7 (3452) 68-27-45, e-mail: A.A.Gubaidullin@yandex.ru

Подпись А.А. Губайдуллина удостоверяю
Ученый секретарь ТюмФ ФГБУН
Института теоретической и прикладной
механики им. С. А. Христиановича СО
РАН, кандидат физико-математических
наук



С.Л. Бородин