

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и трансферу
технологий ФГАОУ ВО НИ ТПУ,
доктор физико-математических наук

Сухих Л.Е.

15 января 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 диссертационной работы

Исследования теплофизических и гидродинамических процессов, происходящих в микроканалах, в последние два десятилетия ведутся достаточно интенсивно большой группой исследователей как в России, так и за рубежом. Особое внимание в последние годы привлекают газожидкостные течения в таких каналах в связи с группой возможных практических приложений. В то же время отсутствие до настоящего времени общей теории течения и теплопереноса двухфазных и гетерогенных сред в микроканалах, несмотря на достаточно интенсивные эксперименты в этой области, наглядно иллюстрирует неполноту основополагающих физических представлений о процессах, происходящих в микроканалах при течении неоднородных жидкостей. Очевидно, что пока не хватает полученной в экспериментах достоверной информации о закономерностях таких физических процессов. В связи с вышеизложенным тема диссертации Г.В. Барткуса, целью которой 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 размеров сторон и при изменении физических свойств жидкости, является актуальной.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 113 источников. Рукопись диссертации изложена на 128 страницах, включает 66 рисунков и 14 таблиц.

Во введении диссертации автор в соответствии с общепринятым стилем изложения обосновывает актуальность своего диссертационного исследования, формулирует цель и задачи, защищаемые положения, обосновывает новизну и практическую значимость диссертации.

В первой главе автор проводит анализ современного состояния механики газожидкостных течений в круглых, прямоугольных и щелевых микроканалах. Эта глава разделена на пять разделов, в каждом из которых проанализированы методики исследований процессов течения в каналах различного поперечного сечения, описаны наиболее распространенные способы изучения процессов межфазного массообмена в микроканалах и известные механизмы таких процессов при снарядном течении. Приведено описание характерных режимов течения в микроканалах, установленные ранее группой авторитетных исследователей. Одним из наиболее значимых выводов по этой главе является вывод о больших расхождениях в рассчитываемых по разным моделям коэффициентах массоотдачи. Последнее дает автору основание для заключения о необходимости детального изучения процессов массоотдачи с целью более адекватного описания основной характеристики этого процесса для течений, исследуемых в диссертации.

Вторая глава посвящена описанию используемых автором диссертации методик и экспериментальных установок. Автор достаточно подробно описывает процессы работы использовавшихся им экспериментальных установок и средств регистрации основных характеристик исследовавшихся

процессов и основных варьируемых в экспериментах факторов. Также в этой главе описаны технологии изготовления микроканалов с различным соотношением размеров сторон. Использовались Т-образные смесители бокового и прямого типа. В заключительном разделе этой главы приведено описание применения современного и достаточно сложного в реализации метода лазерно-индуцированной флуоресценции. Во второй главе рукописи также приведены основные источники неопределенностей (погрешности по старой терминологии) измерения толщины пленки жидкости. Автором предприняты определенные усилия для минимизации погрешностей определения расхода жидкости.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований детальной структуры газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых каналах, расположенных длинной стороной вверх, с различными типами смесителей для формирования течения. Выделены характерные режимы течения в прямоугольных микроканалах для смесей жидкостей и газов двух типов. По результатам экспериментов построены гистограммы распределения длин газовых пузырей и перемычек жидкости для снарядного периодического и переходного режимов течения. Построены зависимости среднеквадратичного отклонения длины сигнала, соответствующего газовым пузырям, от приведенной скорости газа с целью определения границ перехода от одного режима к другому. С использованием полученных в экспериментах статистических характеристик газожидкостного течения и результатов высокоскоростной визуализации построены карты режимов для разных типов газожидкостных смесей и типов смесителей. С целью обобщения результатов экспериментов для всех наборов смесей и типов смесителей построены карты режимов течения в координатах комплекса, составленного из чисел Рейнольдса и Вебера. Также выполнены измерения перепада давления при газожидкостном течении в щелевом микроканале с достаточно представительными размерами сторон. По результатам сравнения корреляций моделей гомогенного раздельного

течения установлено, что наиболее адекватный прогноз перепада давления для гомогенной модели обеспечивает корреляция Dukler с соавторами (работа 1964г.) при течении исследовавшихся в диссертации смесей.

В четвертой главе приведены 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 в прямоугольных и щелевых микроканалах. Эксперименты показали, что на короткой и длинной сторонах микроканала формируются двумерные и трехмерные волны различной амплитуды и длины. Установлено, что при кольцевом режиме течения по пленке жидкости пробегают волны, которые могут увеличивать локальную толщину слоя жидкости на широкой стороне канала почти в два раза. Построены по результатам экспериментов зависимости средней безразмерной толщины пленки жидкости от капиллярного числа при течении смеси «этанол – азот». Показано, что с использованием закона Тейлора можно описать среднюю безразмерную толщину пленки жидкости только при уменьшении толщины пленки в задней части пузыря.

Пятая глава содержит описание результатов исследований процессов межфазного массообмена при течении смеси «этанол – диоксид углерода» при снарядном режиме течения в прямоугольном горизонтальном микроканале. Целью экспериментов была разработка метода измерения объема снаряда при течении смеси «этанол – азот», основанного на цифровой обработке изображений потока. Проведена оценка неопределенности измерения объема газового снаряда при визуализации течения сверху. Установлено, что для всего диапазона измерений основных параметров процесса эта неопределенность не превышает 10%. Выполнено измерение коэффициента массоотдачи для периодического снарядного режима течения смеси «этанол – диоксид углерода» в диапазоне достигнутых в экспериментах скоростей газа и жидкости. Для определения объемного

коэффициента массоотдачи использовалась модель элементарной ячейки с равновесной концентрацией. Разработан метод расчета коэффициента объемной массоотдачи в прямоугольном микроканале, основанный на модели для канала круглого сечения (Butler и др.).

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования Г.В. Барткуса.

Общая методология и методика исследования.

При решении задач диссертации Г.В. Барткус выполнял, в основном, достаточно сложные и трудоемкие экспериментальные исследования, используя для обобщения результатов своих экспериментов модели и аппроксимации других авторов. Автор применил при проведении своих экспериментов группу новых приемов, обеспечивающих возможность получения экспериментальных данных, в полной мере соответствующих критерию новизны. При анализе полученных результатов автор использовал современные представления о физике процессов течения однородных жидкостей и газожидкостных смесей в микроканалах, продемонстрировав хорошие знания не только современной литературы по тематике диссертации, но также и знания установленных много лет назад (в середине прошлого столетия) закономерностей.

Научная новизна результатов, выводов и защищаемых положений.

Г.В. Барткус выполнил большой объем оригинальных экспериментальных исследований и получил результаты, соответствующие современному критерию новизны. К наиболее значимым можно отнести следующие.

1. Установлены локальные характеристики горизонтального газожидкостного течения в прямоугольных микроканалах в диапазоне отношения размеров сторон канала от 2 до 10 с использованием лазерных методов определения статистических характеристик и локальной

толщины пленки жидкости в условиях волнового и безволнового режимов течения.

2. Выделены основные режимы газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах для соотношения сторон 2, 6, 10 с разными смесителями на входе при изменении физических свойств жидкостей.
3. Установлены границы периодического снарядного режима течения для микроканалов с различным соотношением сторон.
4. Экспериментально обосновано значительное влияние гидрофилизации стенок микроканала на границы периодического снарядного режима течения для смесей с повышенной вязкостью.
5. Методом лазерно-индуцированной флуоресценции установлено распределение локальной толщины безволновой и волновой пленки жидкости в поперечном сечении прямоугольного микроканала.
6. Экспериментально установлены объемные коэффициенты массоотдачи для абсорбции углекислого газа при газожидкостном течении в прямоугольном микроканале.
7. Предложен новый подход к определению коэффициента массоотдачи в прямоугольном микроканале, учитывающий локальную структуру циркуляционного течения в перемычке жидкости.

Новизна основных результатов диссертационного исследования Г.В. Барткуса, выводов и защищаемых положений достаточно убедительно подтверждается многочисленными публикациями в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, а также большим числом докладов на авторитетных международных и всероссийских конференциях.

Практическая значимость.

Практическая значимость диссертационной работы Г.В. Барткуса определяется тем, что полученные автором результаты фундаментальных экспериментальных исследований раскрывают механизмы газожидкостных

течений на микромасштабе, которые могут быть использованы при обосновании работы технологических устройств, и являются базой для выполнения в дальнейшем опытно-конструкторских работ по созданию новых технологий с использованием микроканалов. Результаты исследований Г.В. Барткуса режимов течения и распределений толщины пленки жидкости обосновывают возможность управления процессами тепломассообмена в микроканалах прямоугольного поперечного сечения. Представленные в диссертации результаты могут найти применение в образовательных и научных учреждениях, проводящих исследования и разработки по данной тематике, таких как Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича (г. Новосибирск), Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Московский энергетический институт и ряде других организаций.

Достоверность результатов исследований.

Достоверность результатов исследований Г.В. Барткуса обоснована использованием современных методов и средств регистрации основных характеристик исследовавшихся им процессов. Особо можно отметить систематический анализ неопределенностей (погрешностей по старой терминологии) результатов выполненных экспериментальных исследований (регистрации характеристик исследовавшихся процессов). Для некоторых диапазонов измерения размерных и безразмерных параметров проведено сопоставление с опубликованными результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

Замечания по диссертационной работе

1. Идентичные обозначения осей абсцисс и ординат на рис.3.15 осложняют анализ приведенных на этом рисунке результатов.
2. Использование предложенного ранее другими авторами комплекса $Re^{0,2}We^{0,4}$ для обобщения полученных автором экспериментальных

данных не является безусловно очевидным. Двойное описание сил инерции (в числителях чисел Re и We), скорее всего, является избыточным. Более того, информативны безразмерные комплексы, в которых сравниваются два физических процесса (или другими словами две группы сил, как в числе Re). Автор в рукописи своей диссертации не обосновывает физику использования такого неочевидного для неспециалиста комплекса.

3. В экспериментах используются газожидкостные смеси без обоснования выбора концентраций газов. Скорее всего, изменение этой концентрации должно влиять и на результаты экспериментов. Физического анализа возможного влияния этого фактора на исследовавшиеся процессы автор не проводит.
4. Отсутствие на изображениях газожидкостных течений характерного масштаба и направления потока осложняют понимание результатов.
5. В работе не отражены контактные углы смачивания для микроканалов, изготовленных из различных материалов.
6. В тексте диссертационной работы присутствуют грамматические ошибки.

Сделанные замечания не снижают высокой в целом оценки диссертации Г.В. Барткуса.

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.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Заключение

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации Г.В. Барткус «Экспериментальное исследование локальных характеристик газожидкостного течения в прямоугольных и щелевых микроканалах» можно сделать обоснованное заключение о ее соответствии требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых

степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Герман Васильевич Барткус заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Настоящий отзыв обсужден и утвержден на расширенном семинаре Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАОУ ВО НИ ТПУ (протокол № 7 от «09» января 2023 г.)

Ведущая организация

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ),
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; сайт: <https://tpu.ru/>,
телефон: +7 (3822) 60-63-33, +7 (3822) 60-64-44, e-mail: tpu@tpu.ru

Отзыв составили:

Руководитель Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»
профессор, доктор технических наук

 Заворин Александр Сергеевич

Подпись проф., д.т.н. Заворина А.С. заверяю
Ученый секретарь ТПУ

 Кулинич Е.А.

Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
профессор, доктор физико-математических наук

 Кузнецов Гений Владимирович

Подпись проф., д.ф.-м.н. Кузнецова Г.В. заверяю
Ученый секретарь ТПУ

 Кулинич Е.А.

