

На правах рукописи



Дементьев Юрий Анатольевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ
ТЕЧЕНИЙ В ПЛОСКИХ МИКРОКАНАЛАХ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2025

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
Чиннов Евгений Анатольевич

Официальные
оппоненты: Дедов Алексей Викторович, чл.-корр. РАН, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», директор Института тепловой и атомной энергетики НИУ «МЭИ»

Солнышкина Ольга Александровна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», старший научный сотрудник

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН)

Защита состоится 24 декабря 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН 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, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «___» ноября 2025 г.

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

Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. На протяжении более чем двух десятилетий наблюдается активный рост числа исследовательских работ, посвящённых течению двухфазного потока и теплообмену в микроканалах, благодаря ряду преимуществ по сравнению с каналами большого размера. С уменьшением характерного размера канала отношение эффективной площади поверхности к занимаемому объёму увеличивается, что делает применение микроканалов перспективным для процессов тепло- и массообмена. В связи с этим, микроканалы уже нашли своё применение в теплообменных системах, таких как микроканальные теплообменники, тепловые трубки, испарительно-конденсационные системы термостабилизации и другие. Кроме того, они широко используются в микрофлюидных и медицинских системах для решения задач, таких как эффективное перемешивание жидкостей, анализ крови, доставка лекарств, проведение биохимических реакций, генерация монодисперсных капель и других приложений.

Использование систем с фазовым переходом (кипение и испарение) в микроканалах особо актуально при охлаждении оборудования с интенсивным и сверхинтенсивным тепловыделением, поскольку при фазовых превращениях теплоотдача может значительно повышаться. Опубликовано большое число работ, посвященных способам интенсификации теплообмена в двухфазных системах (кипение на структурированных поверхностях, пленочные течения, применение аддитивных элементов, струйное и спрейное охлаждение). Разрабатываются новые виды поверхностей, изучаются и модифицируются различные геометрии каналов. Применение плоской геометрии каналов (каналы с очень большим соотношением сторон) с практической точки зрения перспективно для разработки систем охлаждения 3D-микрочипов с объемным тепловыделением, поскольку характерные размеры тепловыделяющих поверхностей чипов совпадают с характерными размерами плоских микроканалов. Более того, в современных системах охлаждения длины каналов строго ограничены. Оптимизация микроканальных систем охлаждения усложняется рядом проблем. В частности, с уменьшением размеров каналов происходит рост перепада давления (гидравлического сопротивления). Перепад давления – важнейшая характеристика, определяющая мощностные затраты на прокачку теплоносителя. В связи с этим требуется изучение гидравлического сопротивления в каналах для определения наилучшего режима течения, при котором достигается максимальная эффективность теплоотдачи при минимальном энергопотреблении на перекачку теплоносителя. Более того, для оптимизации теплоотводящих устройств необходимо понимание механизмов формирования режимов двухфазных течений как без нагрева, так и в условиях локального нагрева, знание гидравлических и локальных характеристик двухфазных течений. Знания о формировании газожидкостных течений без подвода теплоты актуальны, поскольку морфология двухфазного потока с нагревом схожа с адиабатным при одинаковых содержаниях паровой/газовой фазы.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование гидро-газодинамики и теплообмена двухфазных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот от 10 до 55 мкм; (шириной 10 мм) и выявление новых закономерностей двухфазных течений.

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

1. Создание комплекса рабочих участков с каналами высотой в диапазоне от 10 до 55 мкм и шириной 10 мм с использованием современных технологий фотолитографии, глубокого анизотропного травления, а также контролируемой УФ-склейки и термоанодной сварки для герметизации. Развитие экспериментальных методов и исследование особенностей структуры и режимов двухфазного газожидкостного течения в каналах высотой 10–55 мкм и шириной 10 мм, включая условия локального нагрева, с применением оптической шлирен-методики визуализации сверху, высокоскоростной видеосъёмки, цветной цифровой камеры для визуализации течений при малых скоростях, а также высокоскоростной визуализации течений снизу.

2. Определение режимобразующих факторов и классификация режимов газожидкостных течений в соответствии с выделенными факторами для исследуемой группы каналов. Построение, анализ и обобщение режимных карт в безразмерных координатах с определёнными критериями идентификации режимов. Сравнение с каналами большей высоты и выявление характерных особенностей течений в исследуемом диапазоне размеров микроканалов.

3. Измерение перепада давления однофазных и двухфазных течений в указанной группе каналов, определение особенностей измерений. Исследование влияния сжимаемости газовой фазы при изменении массовых скоростей газа и жидкости. Анализ экспериментально измеренного параметра межфазного взаимодействия для течений без подвода тепла. Модификация модели Локхарта-Мартинелли, позволяющей корректно предсказывать двухфазный перепад давления на трение в микроканалах с учётом сжимаемости газа на основе анализа параметра межфазного взаимодействия. Разработка собственной корреляции параметра межфазного взаимодействия в рамках модифицированной модели для предсказания двухфазного перепада давления на трение в исследуемом диапазоне высот каналов.

4. Исследование влияния плотности теплового потока на перепад давления двухфазных парогазожидкостных течений в плоском микроканале при вариации массовой скорости газа и фиксированной массовой скорости жидкости. Определение факторов, влияющих на перепад давления в двухфазном потоке на основе высокоскоростной визуализации течений снизу.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:

1. Выполнено комплексное экспериментальное исследование двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах высотой в диапазоне от 10 до 55 мкм и шириной 10 мм. Проведена характеристика микроканальных поверхностей, определены высоты микроканалов различными методами. Разработан и собран уникальный комплекс рабочих участков с использованием технологий фотолитографии, глубокого анизотропного травления, контролируемой УФ-склейки и термоанодной сварки для герметизации. Разработаны и созданы экспериментальные

стенды для исследования газожидкостных течений в широком диапазоне расходов газа и жидкости, включая условия локального нагрева.

2. С помощью оптической шлирен-методики определены новые особенности и неустойчивости двухфазного потока. Впервые предложена классификация режимов течений на основе обнаруженных особенностей потоков. Показано, что основной режимобразующей неустойчивостью является модифицированная неустойчивость Саффмана–Тейлора, проявляющаяся как в зоне смещения фаз, так и вдоль межфазных границ в потоке. Эта неустойчивость имеет капиллярно-модуляционную природу и обусловлена развитием пальцеобразования, вызванного нарушением устойчивости межфазных границ под действием локальных возмущений, связанных с инерцией газа.

Для исследуемого диапазона высот каналов определены безразмерные гидродинамические критерии подобия и их характерные значения, при которых границы режимов обобщаются в данных безразмерных координатах. Показано, что такими координатами являются капиллярное число жидкости Ca_l и число Вебера газа We_g , причём капиллярно-модуляционная неустойчивость реализуется при $Ca_l \ll 1$ и $We_g \ll 1$, что свидетельствует о её неклассическом характере, отличном от традиционного вязкого пальцеобразования в ячейках Хеле–Шоу. Впервые определены особенности течений в исследуемом диапазоне высот каналов, такие как отсутствие пузырькового режима течения, новая разновидность струйного режима, стабилизация вспененного режима в зоне несжимаемого течения и существенное влияние сжимаемости газовой фазы на границы режимов течений.

3. Проанализировано влияние квазисжимаемости газа на двухфазный перепад давления в микроканалах. Детально исследован экспериментальный параметр межфазного взаимодействия Чизхолма, и с помощью шлирен-визуализации выделены механизмы, влияющие на него. На основе анализа параметра межфазного взаимодействия впервые модифицирована модель раздельного течения Локхарта–Мартинелли для предсказания двухфазного перепада давления на трение с учётом сжимаемости в микроканалах. Получена корреляция параметра межфазного взаимодействия для исследуемой группы каналов в рамках модифицированной модели для предсказания двухфазного перепада давления на трение, которая предсказывает двухфазный перепад давления со средним абсолютным отклонением 12%.

4. Показано влияние плотности теплового потока на перепад давления двухфазных парожидкостных течений при локальном нагреве в плоском микроканале. На основе визуализации, впервые выделены механизмы, влияющие на перепад давления в плоском микроканале при увеличении плотности теплового потока.

Научная и практическая значимость работы связана с получением новых закономерностей газожидкостных течений от 10 до 55 микрон и представляет собой новые экспериментальные данные о характерных особенностях режимов двухфазных газожидкостных течений, а также особенностях эволюции перепада давления. Модифицированная в данной работе модель раздельного течения может стать основой для обобщения большого объёма данных по перепаду давления в микроканалах различной геометрии, представленных в литературе, и разработки универсальных корреляций для предсказания двухфазного перепада давления на

трение в газожидкостных течениях в условиях микромасштаба. Разработанная корреляция позволит предсказывать двухфазный перепад давления в плоских микроканалах, что может быть использовано при разработке микроканальных систем охлаждения. Полученные в работе данные могут быть применены при разработке новых микроэлектромеханических систем (МЭМС), микроканальных систем охлаждения, микротеплообменниках, для оптимизации работы охлаждающих устройств с использованием двухфазного теплоносителя, а также для микрофлюидных устройств.

Оптический шпирен-метод визуализации с использованием цветной видеосъёмки обеспечивает полную информацию о распределении жидкости и газа в канале, что является критически важным для эффективного перемешивания компонентов при биокаталитических и других медицинских реакциях.

Результаты, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования режимов и особенностей двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот 10-55 мкм, а также анализа и обобщения карт режимов течений в безразмерных координатах.

2. Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах диапазоне высот 10-55 мкм, в том числе, в условиях локального нагрева.

3. Результаты модификации модели раздельного течения для предсказания двухфазного перепада давления в микроканалах с учётом сжимаемости газовой фазы и разработки обобщающей корреляции параметра межфазного взаимодействия в плоских микроканалах в диапазоне высот 10 - 55 мкм в рамках модифицированной модели.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методов измерений и визуализации, проведением калибровок контрольно-измерительного оборудования, анализом неопределённостей, повторяемостью полученных данных. Используемые методики предварительно тестировались, а результаты сравнивались с известными теоретическими зависимостями. Достоверность полученных данных обусловлена также публикацией результатов исследований в жестко рецензируемых научных журналах, в том числе журналах из первого квартиля.

Личный вклад соискателя. Все научные результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя включает: разработку и сборку экспериментальных стендов и рабочих участков, организацию и непосредственное выполнение всех описанных в работе исследований, настройку контрольно-измерительного оборудования, а также всестороннюю обработку и интерпретацию полученных данных. Кроме того, вклад заключается в подготовке к публикации статей в рецензируемых научных изданиях, а также в представлении результатов на российских и международных научных конференциях. Общая концепция исследования, постановка задач и выбор методологической основы были предложены научным руководителем — доктором физико-математических наук Чинновым Евгением Анатольевичем.

Апробация результатов. Материалы диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях: Сибирский Теплофизический Семинар (Новосибирск, 14–16 сентября 2021; 29–31 августа 2022; 28–31 августа 2023, 20–23 августа 2024), Восьмая Российская Национальная конференция по теплообмену (17–22 октября 2022, Москва), XXIV Школа-семинар молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (23–27 мая 2023, Казань), XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (21–25 августа 2023, Санкт-Петербург), XVII Минский международный форум по тепломассообмену (20–24 мая 2024, Минск, Беларусь), IV Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (21–25 октября 2024, Москва, Россия), XVIII Всероссийская школа-конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (30 июня–4 июля 2025, Москва, Россия).

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа, включая 15 статей в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 111 страниц с 56 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе отражено современное состояние исследуемой области науки, приведён аналитический обзор известных экспериментальных исследований, посвящённых режимам течений в мини- и микроканалах различной геометрии, режимобразующим неустойчивостям и перепаду давления в однофазных и двухфазных потоках в условиях микромасштаба. Из анализа литературы можно сделать следующие выводы:

Обзор литературы показывает достаточно хорошую изученность режимов двухфазного течения в трубах и мини- и микроканалах круглого (вплоть до 20 мкм), квадратного и прямоугольного сечений с небольшим соотношением сторон. Пузырьковый, кольцевой и снарядный режимы характерны для всех геометрий каналов. Обнаружены также режимы течений или разновидности уже известных режимов течения: вспененный, струйный, отдельный, волновой, капельный и др. Однако сама идентификация режимов и границы между режимами существенно отличаются в зависимости от условий эксперимента.

Хорошо изучены режимы течений в мини- и микроканалах с большим соотношением сторон (плоские каналы) высотой от 1000 до 50 мкм и шириной от 9 до 40 мм. В данной группе каналов наблюдались следующие режимы: струйный, пузырьковый, вспененный, отдельный и кольцевой. Фронтальная и боковая неустойчивости рассматривались как режимобразующие факторы. При анализе данных неустойчивость, связанная с пальцеобразованием наблюдалась в канале $0.05 \times 10 \text{ мм}^2$, однако не рассматривалась как режимобразующий фактор и не

исследовалась. Анализ данных по перепаду давления показывает изобилие корреляций в рамках двух классических моделей по предсказанию двухфазного перепада давления на трение (гомогенной и раздельной). Однако не существует ни экспериментальных данных, ни моделей, для предсказания двухфазного перепада давления, учитывающих сжимаемость газа в двухфазных потоках.

Более того, не изучена область плоских каналов, в диапазоне высот 10 - 55 мкм, где неустойчивости межфазных границ, связанные с пальцеобразованием и сжимаемостью газа, могут являться режимообразующими. Не исследовано гидравлическое сопротивление в указанном диапазоне высот каналов и не существует корреляций для предсказания двухфазного перепада давления на трение. Также не исследовано влияние плотности теплового потока на перепад давления при теплообмене в газожидкостных течениях в указанном диапазоне высот каналов.

Таким образом, остается неизученной область двухфазных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот от 10 до 55 мкм, где ожидаются новые эффекты, не обнаруженные ранее.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных стендов, рабочих участков с микроканалами, методик измерения и визуализации потоков, а также характеристики поверхностей микроканалов и методам определения высот каналов. Исследование выполнялось на двух стендах, оснащённых современным передовым оборудованием. Первый стенд использовался для исследования потоков в микроканалах высотой 17,5 и 29,3 мкм без нагрева, а второй — для исследования потоков в канале высотой 51,2 мкм, включая условия локального нагрева. Основными отличиями этих двух стендов являлись конструкция рабочих участков, наличие оборудования для бесконтактного измерения усреднённой температуры нагревателя, а также наличие оборудования для контроля массового расхода жидкости в замкнутом контуре. В остальном, стенды были идентичными.

Схема стенда для исследования двухфазных потоков в плоских микроканалах высотой 51,2 мкм шириной 10 мм и длиной 50 мм, включая условия локального нагрева, представлена на Рисунке 1. Газ подавался в рабочий участок (1) из баллона (2) через регулятор массового расхода газа Bronkhorst® EL-FLOW F-211CV (3) (использовались две модели с диапазонами расходов от 2 до 100 мл_н/мин и от 20 до 1000 мл_н/мин для азота). Для инъекции жидкости была создана замкнутая система. Массовый расход жидкости точно контролировался с помощью кориолисового регулятора массового расхода Bronkhorst® mini-CORI FLOW M14 (4). Регулятор был подключён в паре с шестеренчатым насосом (5) для поддержания постоянного массового расхода жидкости, несмотря на изменения нагрузки системы (например, изменения расхода газа). При изменении нагрузки в системе регулятор автоматически подстраивал число оборотов насоса таким образом, чтобы массовый расход жидкости оставался постоянным.

Жидкость из регулятора (4) проходила через теплообменник (6), подключённый к термостату (7), для точной установки начальной температуры жидкости на входе в рабочий участок. При низких скоростях потока регулятор расхода жидкости с шестеренчатым насосом заменялся цифровым шприцевым насосом Cole-Parmer® EW-74905–54 (8) с шприцевым мембранным фильтром с

пропускной способностью 5 мкм (9).

После смешивания и прохождения двухфазного потока через канал парогазожидкостная смесь поступала в алюминиевый конденсатор (10), а затем в ёмкость с небольшим отверстием для выпуска азота (11). После этого жидкость, проходя через мембранный фильтр (12) с пропускной способностью 5 мкм, возвращалась в шестеренчатый насос. Контроллеры National Instruments® DAQ-mx USB-6001 и NI® 9214 (13) использовались для управления и считывания данных с регуляторов массового расхода газа (3) и жидкости (4), датчиков давления BD sensors® DMP 330 (15,16,17) и входной термопары (18), подключённых к компьютеру (14) с разработанной программой в программном обеспечении NI® LabVIEW.

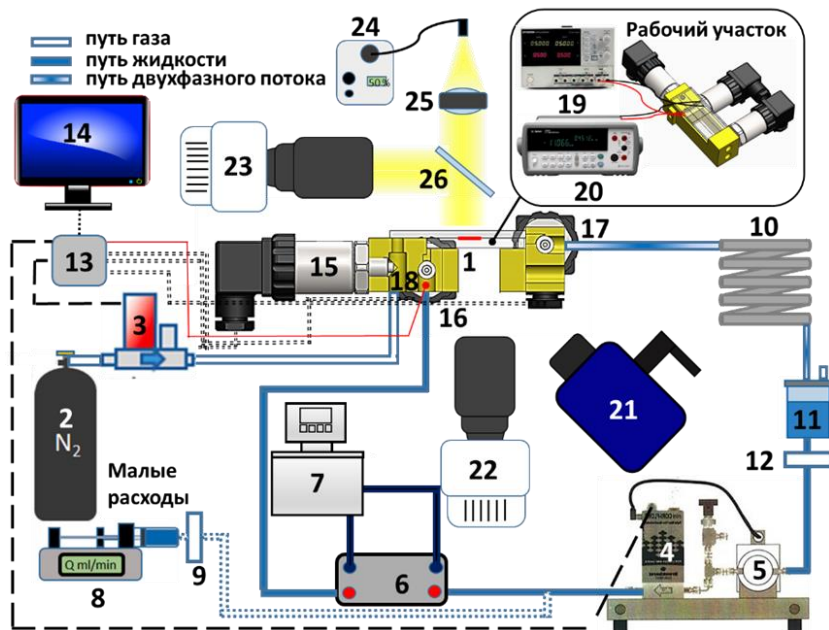
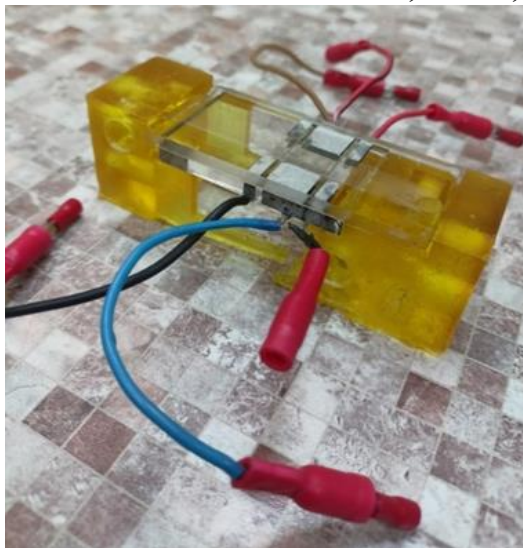


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда для исследования двухфазных потоков в том числе в условиях локального нагрева в микроканале высотой 51.2 мкм, шириной 10 мм и длиной 50 мм.

На нижней стенке канала, изготовленной из сапфира (прозрачного для ИК-излучения), был напылён тонкоплёночный (толщиной 0,3 мкм) прозрачный нагреватель из оксида индия-олова (ITO), размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$. На расстоянии 1 мм до нагревателя во всю ширину канала был также напылён никелевый терморезистор (толщина плёнки около 0,3 мкм) для более точного контроля температуры. Нагрев осуществлялся подачей электричества на контакты ITO-нагревателя с помощью источника питания постоянного тока GW Instek® PSW7 160-21,6 (19). Контроль сопротивления терморезистора производился с помощью мультиметра Keysight® 34970A (20). Средняя температура тонкоплёночного ITO-нагревателя также контролировалась с помощью ИК-камеры FLIR® Titanium HD 570M (21).

Оптическая визуализация потока производилась с помощью двух методик. Первая – с использованием высокоскоростной камеры Phantom® VEO 410 (частота съемки 6000 кадров в секунду) с объективом Nikon® AF-S VR Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED (22) при визуализации снизу проходящего от источника света (на просвет). Вторая – оптическая шлирен-методика, которая



Подробные схемы и фотографии рабочих участков с каналами высотой 17,5 и 29,3 мкм представлены на Рисунке 2, а для микроканала высотой 51,2 мкм — на Рисунке 3, соответственно.

Перед процессом фотолитографии в нижней стеклянной пластине были просверлены отверстия диаметром 10 мм для инъекции фаз и удаления

двухфазной смеси. Затем с помощью глубокого анизотропного травления была протравлена V-образная канавка глубиной 440–470 мкм, которая служила форсункой для подачи жидкости в канал. Далее в кремниевой пластине с помощью лазера были выполнены отверстия для формирования входа газа и выхода двухфазной смеси. После изготовления всех микроструктур пластины герметизировались друг с другом поочередно методом термоанодной сварки. Герметизация проточной ячейки с инъекционным корпусом производилась с помощью цианоакрилатного клея Loctite®460 (без «блужащего эффекта»).

Во втором случае (Рисунок 3) рабочий участок состоял из инъекционного корпуса, напечатанного на 3D-принтере ANYCUBIC® Photon с использованием высокотемпературной акриловой фотополимерной смолы HT100, и двух стеклянных пластин, плотно прижатых друг к другу.

Первая пластина была изготовлена из сапфира размерами $50 \times 30 \times 5$ мм³, на которую был напылён тонкоплёночный нагреватель размером 10×10 мм² из оксида индия-олова (ИТО) для исследования теплообмена двухфазного потока в канале. Вторая пластина была выполнена из боросиликатного оптического стекла Borofloat®33 размерами $70 \times 30 \times 5$ мм³, в которой был протравлен микроканал глубиной 50 мкм и шириной 10 мм с помощью фотолитографии по всей длине. Зазор между пластинами герметизировали УФ-клеем SM Chemie® 301+ (низковязким), нанесённым с помощью игольчатого дозатора под монохроматическим светом, чтобы избежать полимеризации под действием дневного света. Благодаря балансу капиллярных сил и атмосферного давления пластины были склеены таким образом, что клей не проникал в микроканал, а полностью заполнял технологический зазор. Для отверждения клеевого соединения его подвергали воздействию УФ-света в течение 20 минут.

Склеивание инъекционного модуля и стеклянных пластин производилось с помощью УФ-клея SM Chemie® 510. После контроля клеевых соединений их подвергали воздействию УФ-света в течение 40 минут, а затем высушивали в воздушном термостате при температуре 60 °С в течение двух часов. Последующие измерения высоты микроканала с помощью конфокального датчика Micro-Epsilon® IFS2405–0.3 показали, что толщина клеевого соединения не превышала 3 мкм.

В третьей главе приводятся описание обнаруженных режимов двухфазных течений и их особенности и на их основе предлагается классификация режимов, основанная как на качественных, так и на количественных характеристиках двухфазных потоков, анализируются полученные режимные карты, построенные в безразмерных координатах и выделяются особенности течений в сравнении с микроканалами большей высоты.

Раздел 3.1 посвящен описанию зарегистрированных с помощью оптический шпирен системы режимов течений в исследуемом диапазоне высот каналов.

На Рисунке 4 представлены шпирен-изображения режимов двухфазного течения HFE-7100–воздух в плоском микроканале размером $0,0175 \times 10 \times 25$ мм³. Рисунок 4а демонстрирует струйно-вспененный режим при массовых скоростях газа $G_g = 0,2$ кг/(м²с) и жидкости $G_l = 101,4$ кг/(м²с). Цифрой 1 обозначена жидкость, 2 — осушенные области, 3 — жидкостная пленка на верхней стенке

канала. Данный режим наблюдается при высоких массовых скоростях жидкости и характеризуется наличием капиллярного мениска в зоне смешения фаз и одной или двумя боковыми газовыми струями, которые при обтекании мениска сильно сжимаются. Жидкостной столб при этом локализован в центральной части канала. Сжатый газ, движущийся вдоль боковых стенок, расширяется по направлению к центру, инициируя пальцеобразование на межфазных границах и формируя газовые конгломераты, содержащие плоские капли, образующиеся в результате отрыва от жидких «пальцев». Как будет показано в разделе 3.3, данное пальцеобразование — как в зоне смешения фаз, так и вдоль потока — имеет не классическую природу (неустойчивость Саффмана–Тейлора, обусловленную вязким напором), а обусловлено капиллярно-модуляционной неустойчивостью, возникающей под действием инерции газа.

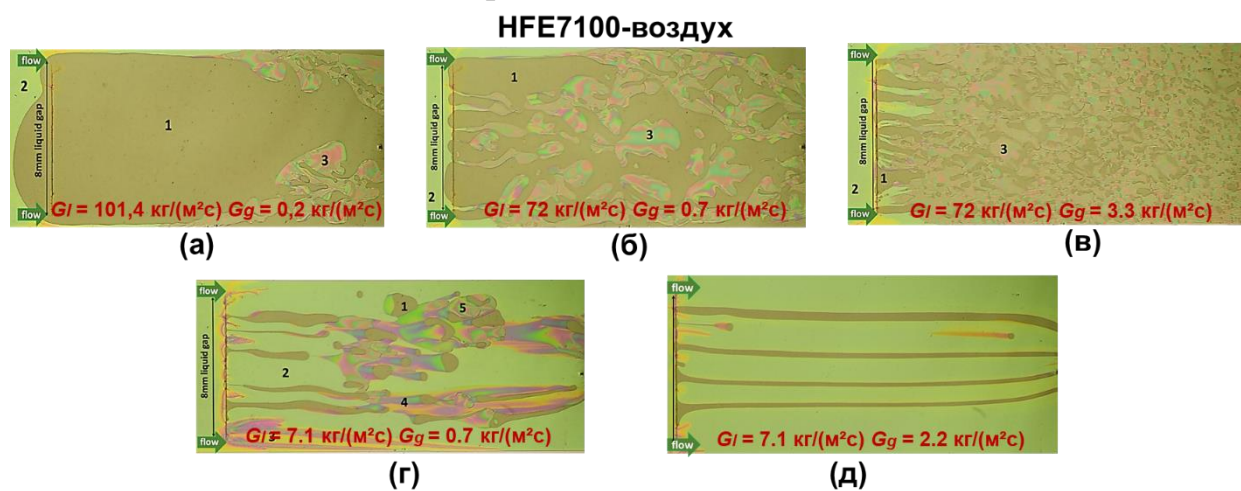


Рисунок 4 – Режимы течений в микроканале высотой 17,5 мкм.

С увеличением массовой скорости газа происходит прорыв мениска в сечении жидкостного зазора, что приводит к формированию дополнительных газовых струй по ширине канала. Такой режим классифицируется как вспененный. Пальцеобразование развивается как в зоне смешения, так и на межфазных границах вдоль потока и обусловлено той же капиллярно-модуляционной неустойчивостью. Режим характеризуется наличием жидкостных мостиков, разрывающих сплошную пленку в поперечном и/или продольном направлениях. При этом замкнутая пленочная структура не формируется, а объемные доли жидкости и газа становятся сопоставимыми, что делает невозможным четкое разделение на несущую и дисперсную фазы. Рисунок 4б демонстрирует вспененный режим при $G_g = 0,7 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ и $G_l = 72 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, где обозначения аналогичны: 1 — жидкость, 2 — осушенные области, 3 — пленка на верхней стенке.

При дальнейшем росте массовой скорости газа жидкостные мостики исчезают. В зоне смешения фаз наблюдается регулярное чередование жидкостных и газовых струй, вызванное капиллярно-модуляционной неустойчивостью. От жидкостных струй отрываются фрагменты и плоские капли произвольной формы, которые могут взаимодействовать и деформироваться, однако сохраняются в ядре потока и не разрушают сплошную жидкостную пленку. В самих каплях также развивается фрактальное пальцеобразование, приводящее под действием

капиллярно-модуляционной неустойчивости к их дроблению на более мелкие фрагменты. В этом режиме жидкостная пленка замкнута по поперечному сечению канала, а газ движется в ее центральной части. Такой режим классифицируется как капельно-кольцевой. Рисунок 4в иллюстрирует капельно-кольцевой режим при $G_g = 3,3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $G_l = 72 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (обозначения: 1 — жидкость, 2 — сухие области, 3 — пленка на верхней стенке).

При малых массовых скоростях обеих фаз реализуется струйно-капельный режим, характеризующийся чередованием жидкостных и газовых струй, от которых отрываются плоские капли произвольной или округлой формы. В этом случае сплошная пленка на верхней и нижней стенках канала не формируется; вместо этого наблюдается лишь локальное смачивание стенок в отдельных участках по ширине канала. Рисунок 4г показывает струйно-капельный режим при $G_g = 0,7 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $G_l = 7,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При дальнейшем увеличении массовой скорости газа межфазные границы стабилизируются вдоль потока, что приводит к формированию струйного режима. В этом режиме наблюдается множество конфигураций чередующихся жидкостных и газовых струй, зависящих от соотношения массовых скоростей фаз. При этом неустойчивости межфазных границ, способные инициировать образование пленок, отсутствуют. Рисунок 4д демонстрирует струйный режим при $G_l = 7,1 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и $G_g = 2,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Раздел 3.2 посвящён количественным и качественным критериям идентификации переходов между классифицируемыми режимами. Для определения количественных границ течения использовался алгоритм, разработанный в среде MATLAB®, который позволяет вычислить локальные характеристики потока после бинаризации по порогу яркости изображения в оттенках серого. Например, количественным критерием для перехода между струйным и вспененным режимами течений является появление плёнки на верхней стенке, то есть усреднённый по времени параметр $S_{film}/S_{channel} > 0$. На Рисунке 5 показан алгоритм определения локальной временной характеристики и эволюция параметра $S_{film}/S_{channel}$ при увеличении массовой скорости жидкости при постоянной массовой скорости газа, где S_{film} — площадь верхней плёнки, визуализированная в канале (белая область на Рисунке 5е), а $S_{channel}$ — оптически визуализированная область в канале во время визуализации шпирен-методом.

На первом этапе видео было разбито на кадры, затем фон (когда канал полностью заполнен жидкостью) (Рисунок 5б) был вычтен из исходного кадра (Рисунок 5а). Полученное изображение (Рисунок 5в) было преобразовано в изображение в оттенках серого (Рисунок 5г). Затем была применена процедура бинаризации на основе порога яркости к изображению в оттенках серого.

Таким образом, было получено бинарное изображение (Рисунок 5д), где белые пиксели представляли собой область верхних плёнок, над которыми находился газ, а чёрные пиксели — область, заполненную жидкостью. Затем алгоритм вычислял общую площадь белых пикселей, делил её на площадь всего изображения и нормализовал полученные значения по размерам исходного изображения. Таким образом, был определён параметр $S_{film}/S_{channel}$ для одного кадра. На заключительном этапе алгоритм повторял указанную процедуру для

каждого кадра видео, что позволило оценить динамику параметра $S_{film}/S_{channel}$ во времени и вычислить его усреднённое по времени значение (Рисунок 5е).

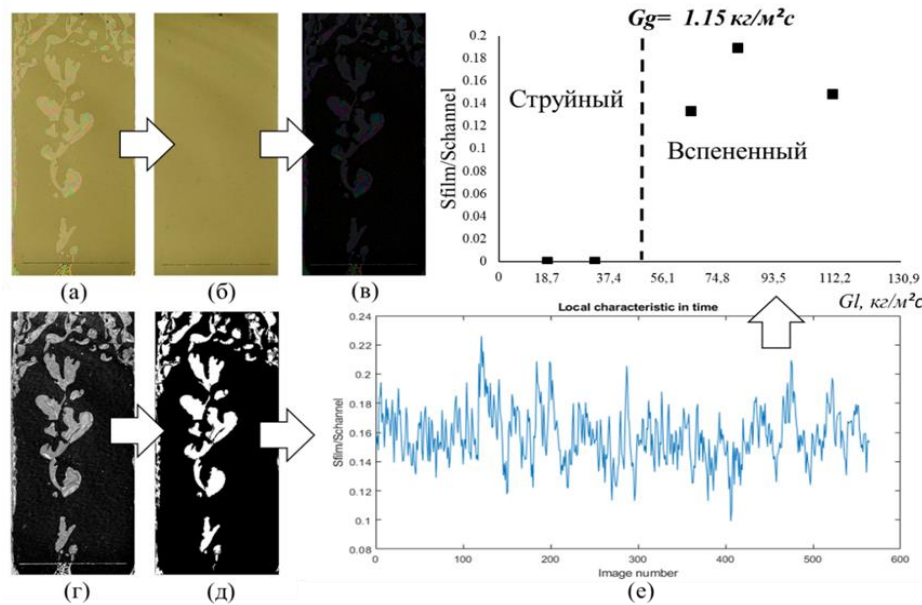


Рисунок 5 – Алгоритм расчета локальных характеристик для перехода от струйного ко вспененному режиму течения.

Раздел 3.3 посвящен анализу карт режимов течений, выделению особенностей течений и обобщению границ режимов в безразмерных координатах. На Рисунке 6 показана карта для всех режимов течений с использованием всех трёх исследуемых микроканалов и трёх рабочих жидкостей с различными физическими свойствами (HFE7100, 92,8% и 40% (масс.) водно-спиртовые растворы). В качестве координат используются капиллярное число жидкости Ca_l и число Вебера газа We_g , определённые следующим образом:

$$Ca_l = \frac{\mu_l G_l}{\rho_l \sigma} \quad (1)$$

$$We_g = \frac{G_g^2 D_h}{\rho_{0g} \sigma} \quad (2)$$

Число Вебера для газа We_g используется для несжимаемого случая, поскольку до наступления влияния сжимаемости на границы режимов, они уже сформированы. Области режимов, где доминируют инерционные силы и начинает проявляться сжимаемость ($We_g > 0,1$) выходят за рамки рассмотрения, поскольку влияние сжимаемости газа необходимо учитывать при определении числа Вебера.

Как видно из Рисунка 6, границы между режимами течения хорошо обобщаются в координатах капиллярного числа жидкости Ca_l и числа Вебера по газу We_g при использовании трёх жидкостей с различными физическими свойствами и трёх микроканалов разной высоты, охватывая практически весь исследуемый диапазон массовых скоростей жидкой и газовой фаз.

Формирование режимов течения с пальцеобразованием при $Ca_l \ll 1$ и $We_g \ll 1$ наблюдается независимо от физических свойств исследуемых жидкостей и геометрических размеров канала. Этот факт свидетельствует о неклассическом характере неустойчивости, в отличие от традиционной неустойчивости

Саффмана–Тейлора в ячейках Хеле–Шоу, где развитие вязких пальцев происходит при $Ca_l \geq 0.1-1$, когда вязкие силы превышают капиллярные и приводят к дестабилизации межфазной границы.

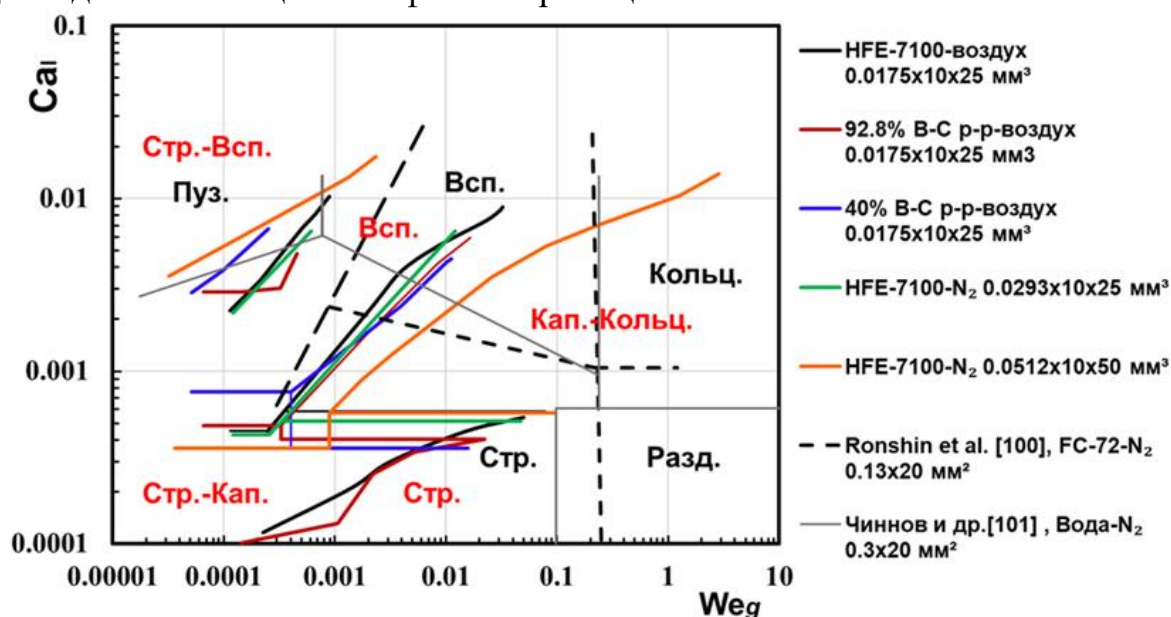


Рисунок 6 – Обобщённая карта режимов в безразмерных координатах.

Пальцеобразование в условиях $Ca_l \ll 1$, $We_g \ll 1$ и малого поверхностного натяжения обусловлено ослаблением капиллярных сил. Даже незначительные инерционные воздействия газа нарушают равновесие межфазной границы, вызывая её неустойчивость. В зоне смешения фаз сжимаемость газа и его последующее расширение приводят к локальному ускорению потока, усиливая гидродинамические возмущения и способствуя развитию неустойчивости на межфазных границах даже при малых значениях We_g .

Таким образом, механизм пальцеобразования в рассматриваемых условиях не связан с классическим вязким напором, а определяется капиллярно-модуляционной неустойчивостью (модифицированная неустойчивость Саффмана-Тейлора), вызванной нарушением устойчивости межфазной границы под действием локальных возмущений, обусловленных инерцией газа. При этом критическое состояние системы определяется не средним, а локальным балансом вязких, инерционных и капиллярных сил.

Несмотря на неклассическую природу неустойчивости, координаты Ca_l и We_g демонстрируют высокую обобщающую способность, выступая в роли масштабирующих параметров, отражающих чувствительность системы к соотношению определяющих сил. Это позволяет использовать их для построения карт режимов течения в микроканалах, включая режимы, обусловленные динамикой тонких плёнок и межфазных границ.

Более того, при высоте канала менее 55 мкм наблюдается интенсивное пальцеобразование как в зоне смешения, так и вдоль потока, что подавляет формирование устойчивых газовых пробок и объясняет отсутствие классического пузырькового режима.

На Рисунке 7а показано различие течений в канале высотой 29.3 мкм и канале высотой 130 мкм при близких значениях капиллярного числа жидкости и

числа Вебера газа ($Ca_{l\text{ FC-72}} = 9,77 \cdot 10^{-3}$, $We_{g\text{ FC-72}} = 2,9 \cdot 10^{-4}$ и $Ca_{l\text{ HFE7100}} = 11,2 \cdot 10^{-3}$, $We_{g\text{ HFE7100}} = 2,4 \cdot 10^{-4}$). В канале меньшей высоты в формирующиеся газовые включения уже на начальном этапе проникают жидкие пальцы, что указывает на раннее развитие капиллярно-модуляционной неустойчивости межфазных границ. В канале высотой 130 мкм подобное поведение не наблюдалось — фронт остаётся устойчивым с чётко выраженные пузырьками. Таким образом, высота канала оказывает существенное влияние на устойчивость межфазной границы, даже при схожих безразмерных критериях течения.

Особое проявление неустойчивости Саффмана–Тейлора в условиях микромасштаба позволило выделить новую разновидность струйного режима, не зарегистрированную ранее в каналах большей высоты. Данная разновидность характеризуется формированием чередующихся стабильных жидких струй в зоне смешения, обусловленных регулярным развитием пальцеобразных возмущений. На Рисунке 7б представлены изображения таких течений в канале высотой 17,5 мкм. Такое поведение свидетельствует о переходе от случайного пальцеобразования к квазипериодическому режиму, контролируемому локальным балансом инерционных, вязких и капиллярных сил в зоне смешения.

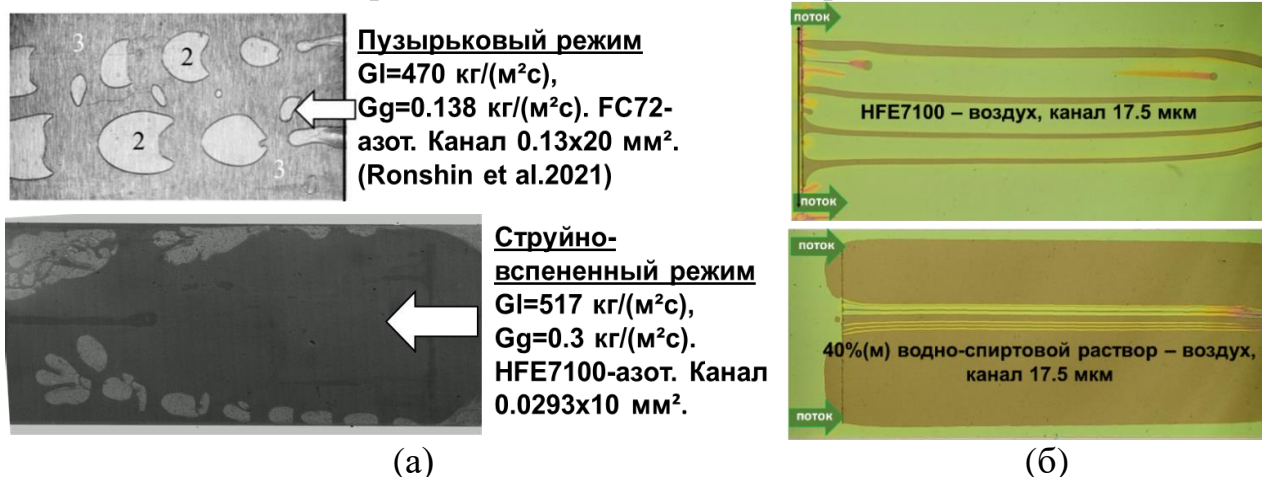


Рисунок 7 – Характерные особенности потоков в исследуемой группе каналов в сравнении с каналами большей высоты: (а) – отсутствие пузырькового режима, (б) – чередующиеся струи. Вид сверху, стрелки указывают направление потока.

Таким образом, диаграмму, представленную в диссертации Роньшина Ф.В. и задающую область перехода от мини- к микромасштабу на основании анализа особенностей двухфазных потоков в каналах высотой вплоть до 50 мкм можно расширить группой плоских микроканалов высотой от 10 до 55 мкм. Рисунок 8 показывает расширенную диаграмму с указанием особенностей двухфазных течений в плоских микроканалах, где по оси y отложена область вспененного режима течений на картах режимов, причём за сто процентов взят канал высотой 50 мкм, а по оси x – высота канала. Видно, что исследуемый диапазон высот каналов содержит особенности не обнаруженные ранее. Также показано, что в этом диапазоне область вспененного режима практически не меняется с уменьшением высоты канала.

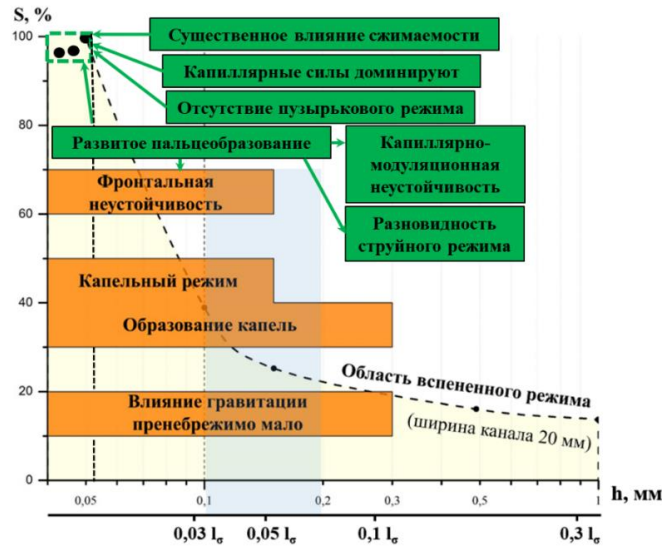


Рисунок 8 – Расширенная диаграмма с новыми особенностями течений в каналах с диапазоном высот от 10 до 55 мкм.

С уменьшением высоты микроканала (10–55 мкм) усиливается влияние капиллярных сил, что способствует более упорядоченному развитию неустойчивостей с регулярной структурой. Геометрическая стеснённость подавляет случайную коалесценцию, способствуя самоорганизации потока. В результате границы вспененного режима в координатах Ca_l и We_g становятся более воспроизводимыми, а сам режим выделяется как устойчивое гидродинамическое состояние с чётко ограниченной областью на карте режимов.

В четвертой главе приведены результаты систематических измерений перепада давления в плоских микроканалах для однофазных и двухфазных течений. Детально проанализирован параметр межфазного взаимодействия S и предложена модификация модели раздельного течения с учётом сжимаемости газа. В рамках предложенной модели была разработана корреляция для параметра S , который обеспечивает предсказание двухфазного перепада давления на трение в исследуемой группе каналов со среднеабсолютным отклонением 12 %. Кроме того, исследованы механизмы эволюции перепада давления с ростом плотности теплового потока при фиксированной массовой скорости жидкости и различных массовых скоростях газа.

Раздел 4.1 посвящен измерениям и анализу однофазных потоков жидкости и газа во всей исследуемой группе каналов. На Рисунке 9 показаны зависимости измеренного однофазного перепада давления от массовой скорости газа для всех трёх исследуемых микроканалов.

$$\left(\frac{dP}{dL} \right)_{fr} = f_D \frac{G^2}{2\rho D_h} \quad (3)$$

$$f_D Re = 96(1 - 1,3553AR + 1,9467AR^2 - 1,7012AR^3 + 0,9564AR^4 - 0,2537AR^5) \quad (4)$$

Согласно Рисунку 9, для газа с ростом массовой скорости наблюдается значительное отклонение экспериментально измеренного перепада давления от теоретических значений Шаха и Лондона (4) для развитого несжимаемого ламинарного течения. При течении газа перепад давления демонстрирует нелинейную зависимость от массовой скорости, тогда как теоретическая кривая для

несжимаемого течения лежит существенно выше экспериментальных данных. Этот эффект объясняется сжимаемостью газа в микроканалах, т.е. зависимостью плотности газа от давления.

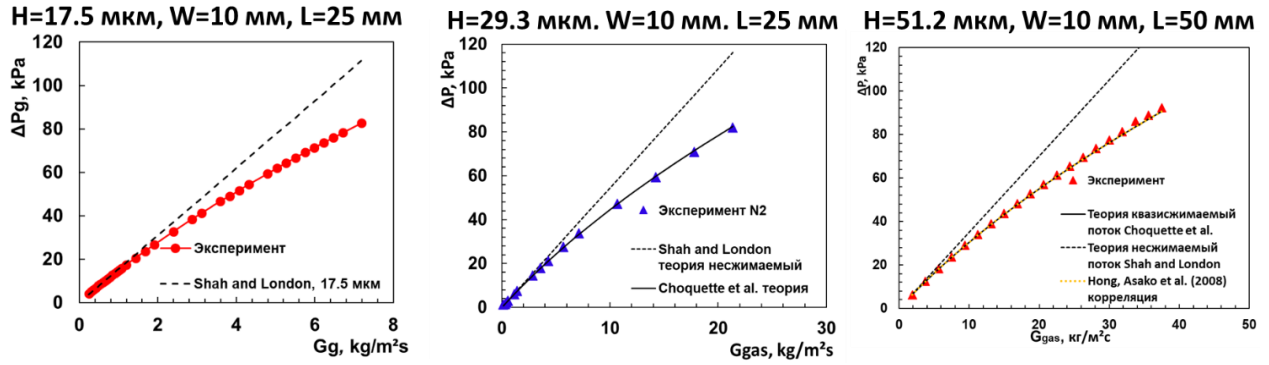


Рисунок 9 – Измерения однофазного перепада давления газа.

В данном случае использование уравнения (3) для несжимаемого потока некорректно, поскольку формула предполагает постоянную плотность флюида. Рисунок 9 также демонстрирует хорошее количественное согласие экспериментальных данных с неявной формулой Чокетта и др. (5) для изотермического ламинарного сжимаемого течения идеального газа, где для определения фактора трения Дарси f_D используется формула несжимаемого течения Шаха и Лондона. (4). Кроме того, данные согласуются с корреляцией Хонга и др. для определения $f_D Re_g$ (уравнение (6)) для 2D параллельных каналов, зависящей от чисел Маха и Кнудсена, определённых выражениями (7) и (8).

$$f_D \frac{\Delta L}{D_h} = \frac{P_{in}^2 - P_{out}^2}{RTG^2} - 2 \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (5)$$

$$P = \rho RT$$

$$f_D Re_g = \frac{96}{1+12Kn} + \frac{40.02Ma - 109.64Ma^2 + 658.25Ma^3}{(1+12Kn)^2} \quad (6)$$

Заметно, что эти две кривые прогнозирования перепада давления идентичны, поскольку усредненное значение произведения $f_D Re_g$ изменяется лишь незначительно с ростом числа Маха. Числа Кнудсена изменяются в диапазоне $4,35 \cdot 10^{-4} - 6,17 \cdot 10^{-4}$, что указывает на то, что эффект разрежения (скольжения) вносит пренебрежимо малую поправку в определение $f_D Re_g$.

$$Ma = G \left(\frac{2}{P_{in} + P_{out}} \right) \sqrt{\frac{RT}{\gamma}} \quad (7)$$

$$Kn = \frac{l_{free}}{D_h} = \sqrt{\frac{\pi\gamma}{2}} \frac{Ma}{Re_g} \quad (8)$$

Таким образом, экспериментальный перепад давления газа при малых усредненных числах Маха (измеряемый диапазон $1,82 \cdot 10^{-4} - 6,4 \cdot 10^{-2}$ для канала высотой 51,2 мкм) описывается неявной формулой Чокетта и др. (5) с использованием для определения усредненного значения $f_D Re_g$ выражения Шаха и Лондона. (4), поскольку сжимаемость влияет на $f_D Re_g$ только локально — вблизи входной и выходной зоны канала, в то время как усредненное значение $f_D Re_g$ вдоль длины канала остается практически постоянным. Такое описание перепада давления называется квазисжимаемостью.

Раздел 4.2 посвящен измерениям двухфазного перепада давления в микроканалах, детальному анализу параметра межфазного взаимодействия Чизхолма на примере потоков HFE7100–азот и вода–азот в микроканале высотой 51,2 мкм, а также модификации модели раздельного течения Локхарта–Мартинелли с учётом квазисжимаемости газа и разработке корреляции для параметра межфазного взаимодействия в рамках модифицированной модели для исследуемой группы каналов.

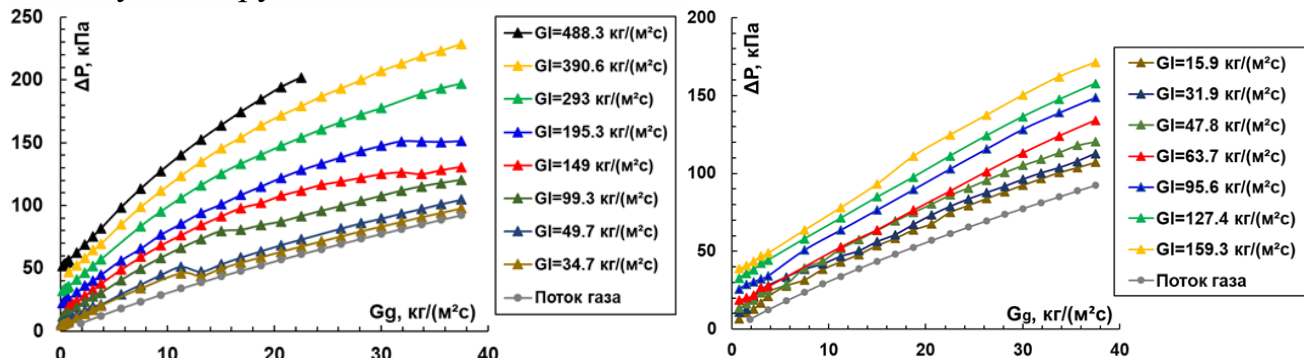


Рисунок 10 – Экспериментальный двухфазный перепад давления в микроканалах в зависимости от массовой скорости газа.

На Рисунке 10 изображен экспериментально измеренный двухфазный перепад давления потоков HFE7100–азот и вода–азот в канале высотой 51,2 мкм в зависимости от массовой скорости газа при фиксированных массовых скоростях жидкости. Видно, что с увеличением массовой скорости газа начинает проявляться эффект сжимаемости газа, и перепад давления для двухфазного потока демонстрирует нелинейный рост.

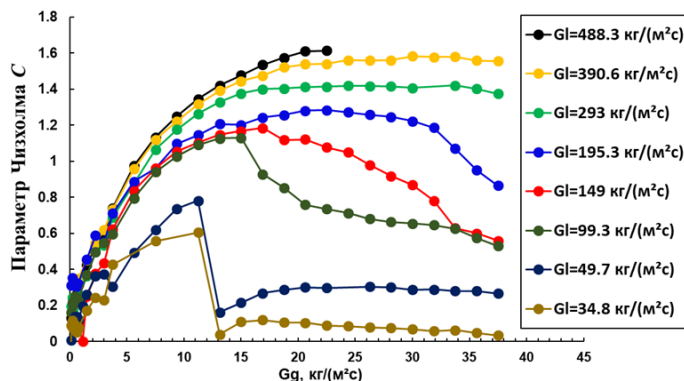


Рисунок 11 – Экспериментальный параметр межфазного взаимодействия (параметр Чизхолма) в зависимости от массовой скорости газа.

На Рисунке 11 показана эволюция экспериментального параметра межфазного взаимодействия C , определенного с помощью формулы (9) с увеличением массовой скорости газа при фиксированных массовых скоростях жидкости для потока HFE7100–азот в канале высотой 51,2 мкм. В группе кривых при $G_1 = 99,3 - 195,3$ кг/(м²с) эволюция параметра Чизхолма следовала нижеописанным механизмам, что подтверждалось шпирен-визуализацией течений.

$$C = \frac{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_p - \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l - \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g}{\sqrt{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g}} \quad (9)$$

Эволюция режимов течения с ростом массовой скорости газа при $G_l=149 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ представлена на Рисунке 12. При G_g примерно до $7,5 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ наблюдается почти линейное увеличение параметра Чизхолма из-за увеличения площади межфазного трения по ширине канала, обусловленное развитием пленочно-газового течения вдоль ширины канала. Последующее замедление параметра Чизхолма с ростом G_g связано с размазыванием плоских капель в плёнку жидкости в ядре потока, сопровождающимся небольшим увеличением площади межфазного трения и параметра C . Дальнейшее увеличение G_g до $18,8 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ и далее до $37,5 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ приводит к уменьшению параметра Чизхолма, что соответствует смене режима течения, плавным уменьшением области плёнки на верхней стенке и, как следствие, уменьшению площади межфазного трения.

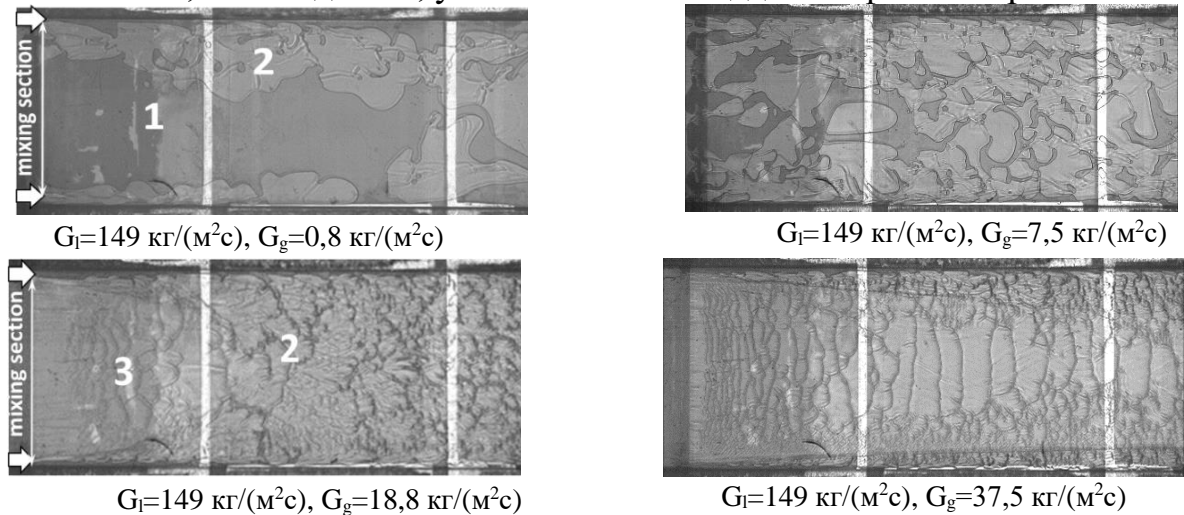


Рисунок 12 – Эволюция течения при $G_l=149 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ для течения HFE7100- N_2 . Направление потока слева направо. 1 – жидкость, 2 – пленка на верхней стенке канала, 3 – пленка на нижней стенке канала. Вид сверху.

Таким образом, экспериментальный параметр межфазного взаимодействия напрямую зависит от площади межфазного трения в канале и может быть корректно описан с помощью теоретических соображений.

Следуя определению модели раздельного течения Локхарта–Мартинелли в размерном виде, можно ввести модификацию этой модели с учётом сжимаемости газовой фазы (уравнения 10-17):

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{tp} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l + C \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g \quad (10)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_l = \frac{f_D G_l^2}{2 \rho_l D_h} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_g f_D \frac{L}{D_h} = \frac{P_{in}^2 - P_{out}^2}{RT G_g^2} - 2 \ln \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (12)$$

$$P = \rho R T \quad (13)$$

$$f_D = 96(1 - 1,3553AR + 1,9467AR^2 - 1,7012AR^3 + 0,9564AR^4 - 0,2537AR^5) / Re_{l,g} \quad (14)$$

$$Re_l = \frac{G_l D_h}{\mu_l} = \frac{G(1-x)D_h}{\mu_l} \quad (15)$$

$$Re_g = \frac{G_g D_h}{\mu_g} = \frac{G_x D_h}{\mu_g} \quad (16)$$

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l + \dot{m}_g} = \frac{G_g wh}{(G_l + G_g) wh} \quad (17)$$

На Рисунке 13 показана зависимость экспериментально определенного параметра Чисхолма от прогнозируемого значения по описанной модели для потоков HFE7100–азот и вода–азот. Наблюдается количественное и качественное совпадение данных с разбросом точек не более 10%, что свидетельствует о корректной применимости предлагаемой модификации.

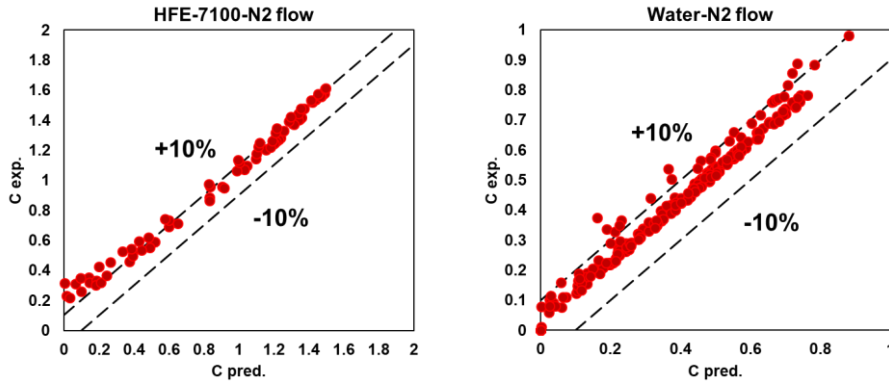


Рисунок 13 – Сравнение экспериментального и прогнозируемого параметра Чисхолма для потоков HFE7100–азот и вода–азот.

Домножив уравнение (10) на $(\Delta P/L)_l$ получим модель Локхарта–Мартинелли в безразмерном виде, представленную уравнением (18), где $\phi_l^2 = (\Delta P/L)_{tp} / (\Delta P/L)_l$ – двухфазный множитель, связывающий двухфазный и однофазный перепад давления жидкости, а $X^2 = (\Delta P/L)_l / (\Delta P/L)_g$ – параметр Мартинелли.

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (18)$$

На Рисунке 14а показана зависимость экспериментального двухфазного множителя от экспериментального параметра Мартинелли для всех рассматриваемых каналов. Аппроксимацией 722 экспериментальных точек методом наименьших квадратов с ограничением на гладкость и условием на минимизацию среднего абсолютного отклонения, предложена корреляция для параметра межфазного взаимодействия C , представленная выражениями (19-21).

$$C = 0,0914 Ca_l^{0,303} We_{lo}^{-0,109} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,8229} \quad (19)$$

$$Ca_l = \frac{\mu_l G_l}{\rho_l \sigma} \quad (20)$$

$$We_{lo} = \frac{(G_l + G_g)^2 D_h}{\rho_l \sigma} \quad (21)$$

Капиллярное число, определяемое выражением (20), является ключевым параметром, определяющее пальцеобразование за счёт вязкостного напора. Соотношение вязкостей определяет морфологию пальцев, следовательно, и характер межфазного взаимодействия. Число Вебера смеси, определяемое выражением (21),

показывает влияние инерции смеси относительно капиллярных сил, поскольку инерционные силы могут как вносить возмущения, так и — при определённом соотношении расходов фаз — стабилизировать межфазные границы, что также оказывает влияние на образование газоплёночных течений и межфазное взаимодействие. Предложенная корреляция позволяет предсказывать двухфазный перепад давления со средним абсолютным отклонением, определяемым формулой (22) и равным 12% (Рисунок 14б).

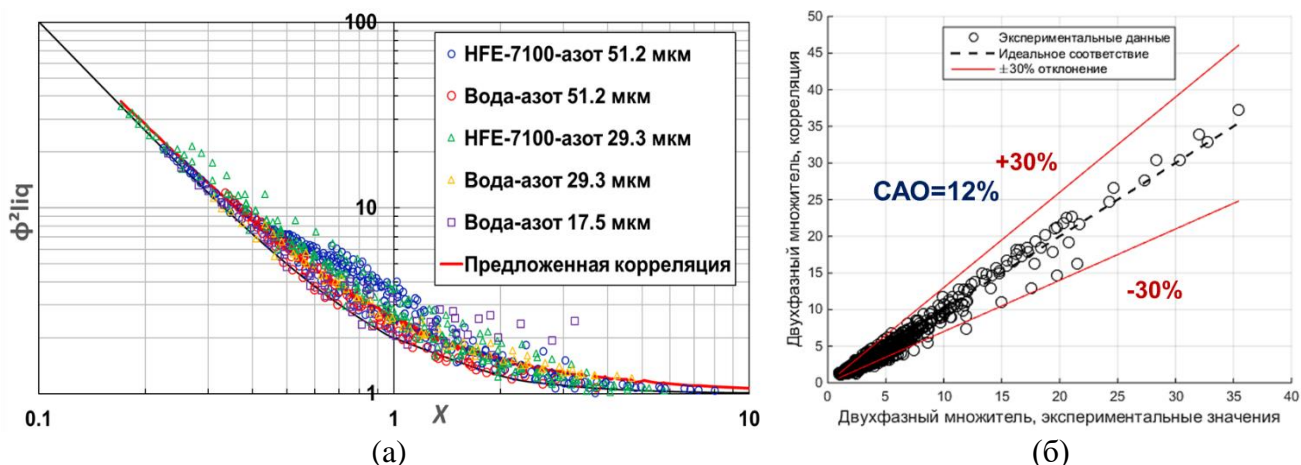


Рисунок 14 – Предложенная корреляция для предсказания двухфазного перепада давления на трение в рассматриваемой группе каналов.

$$CAO = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{|\varphi_{l, \text{предск.}}^2 - \varphi_{l, \text{экс.}}^2|}{\varphi_{l, \text{экс.}}^2} \right) \cdot 100\% \quad (22)$$

Раздел 4.3 посвящён исследованию механизмов эволюции перепада давления в зависимости от плотности теплового потока при локальном нагреве в канале высотой 51,2 мкм при фиксированной массовой скорости жидкости и различных массовых скоростях газа. В качестве рабочей жидкости использовалась HFE7100.

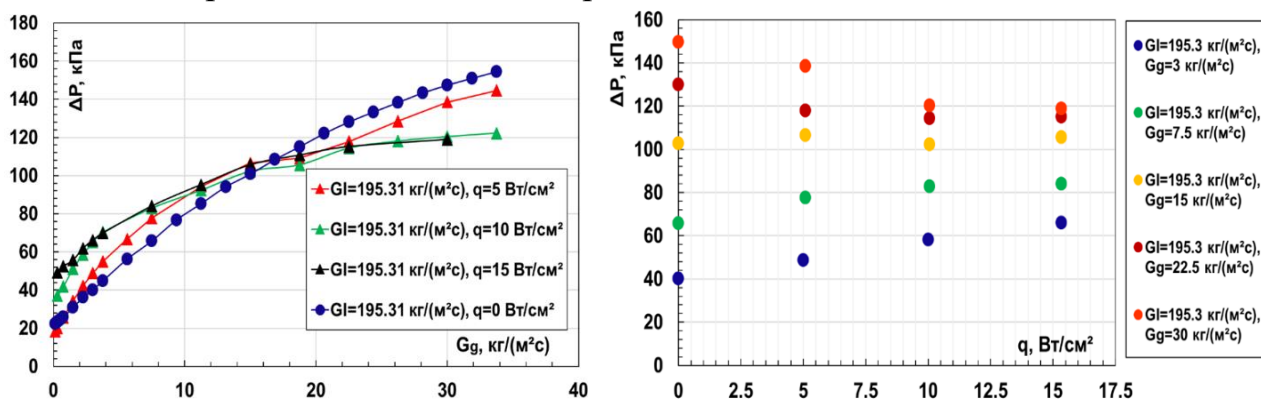


Рисунок 15 – Зависимости двухфазного перепада давления при $G_l=195,3 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ от массовой скорости газа при различных плотностях теплового потока и от плотности теплового потока при различных массовых скоростях газа.

Рисунок 15 демонстрирует кривые зависимости двухфазного перепада давления от массовой скорости газа при фиксированной массовой скорости жидкости $195,3 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ и различных плотностях теплового потока, а также, для удобства анализа, зависимости двухфазного перепада давления от плотности теплового потока при фиксированных массовых скоростях газа.

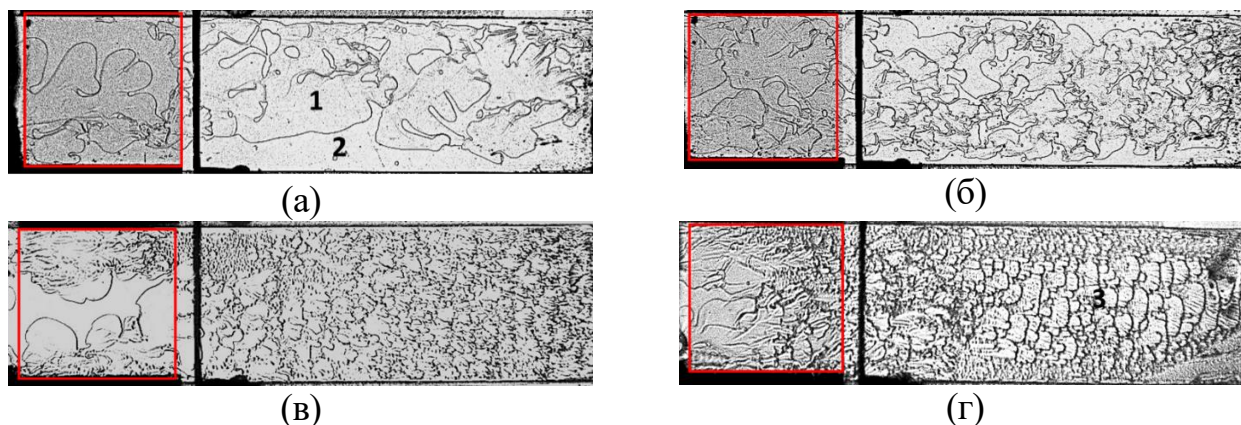


Рисунок 16 – Режимы течений при $G_1=195,3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и $G_g=3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ с увеличением плотности теплового потока. (а) $q=0 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (б) $q=5 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (в) $q=10 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (г) $q=15 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Вид снизу. Обозначения: 1 – плёнка на нижней стенке под газовыми конгломератами, 2 – жидкость, 3 – волнообразная плёнка жидкости на нижней стенке. Красным обозначена область тонкоплёночного ИТО – нагревателя.

При массовых скоростях газа менее $15 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ реализуются режимы течений, показанные на Рисунке 16. В данном случае, по аналогии с двухфазными потоками без нагрева, рост перепада давления с увеличением плотности теплового потока достигается за счет увеличения межфазного взаимодействия при размазывании плоских капель в жидкостные плёнки.

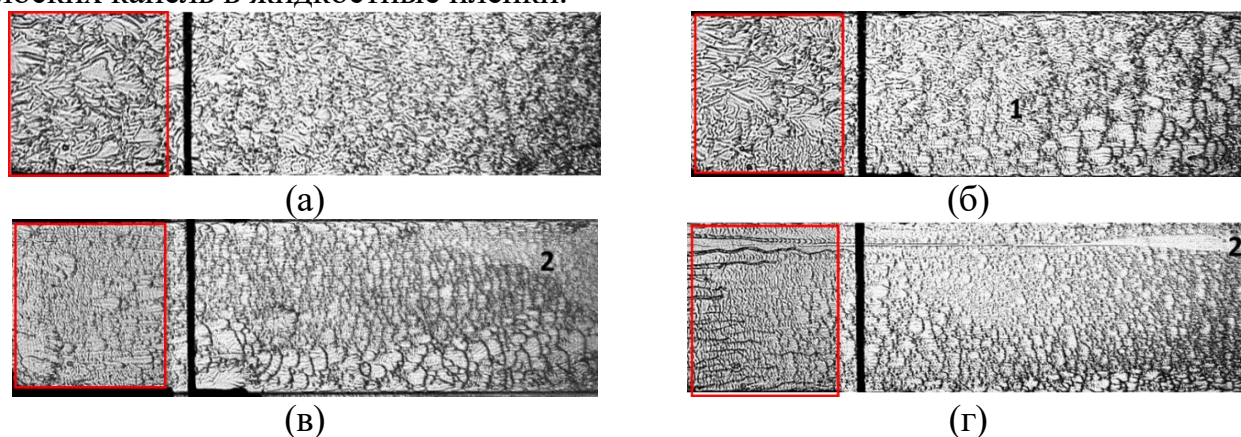


Рисунок 17 – Режимы течений при $G_1=195,3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и $G_g=15 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ с увеличением плотности теплового потока. (а) $q=0 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (б) $q=5 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (в) $q=10 \text{ Вт}/\text{см}^2$, (г) $q=15 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Вид снизу. Обозначения: 1 – плёнка на нижней стенке, 2 – плёнка на верхней стенке. Красным обозначена область ИТО – нагревателя.

С увеличением массовой скорости газа испарение интенсифицировалось, что приводило к частичному высыханию плёнки жидкости на нижней стенке. Осушение плёнки снижало фрикционный перепад давления жидкости, что приводило к замедлению роста перепада давления с ростом плотности теплового потока. При этом, при $G_g=15 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, снижение фрикционного перепада давления из-за локального осушения нижней стенки канала компенсировалось ростом фрикционного перепада давления парогазовой смеси из-за увеличения парогазосодержания в потоке, поэтому суммарный перепад давления с ростом теплового потока практически не менялся. Рисунок 17 показывает режимы течений при $G_1=195,3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ и $G_g=15 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ при увеличении плотности теплового потока.

Наблюдается изменение волновой структуры плёнки, а также видны локальные осушения вдоль боковых стенок канала.

При высоких массовых скоростях газа фрикционная составляющая перепада давления жидкости значительно снижается из-за интенсивного осушения плёнки на нижней стенке канала. Рост перепада давления, обусловленный трением парогазового потока, не компенсирует этого снижения, что приводит к уменьшению общего перепада давления с ростом плотности теплового потока.

На Рисунке 18 (при $G_l=195,3$ кг/(м²с), $G_g=30$ кг/(м²с)) показан переход к пародоминантному режиму, сопровождающийся практически полным осушением нижней стенки за счёт интенсификации испарения. Это резко снижает трение жидкости о стенку. В пределе, при полном испарении жидкости, перепад давления парогазовой смеси оказывается значительно ниже, чем в однофазном жидком или двухфазном потоке с выраженным межфазным взаимодействием, благодаря гораздо меньшей вязкости газовой фазы.

Таким образом, установлено, что общий перепад давления может уменьшаться с увеличением плотности теплового потока вследствие осушения стенок канала и резкого снижения фрикционных потерь жидкой фазы, которые не компенсируются ростом сопротивления парогазового потока.

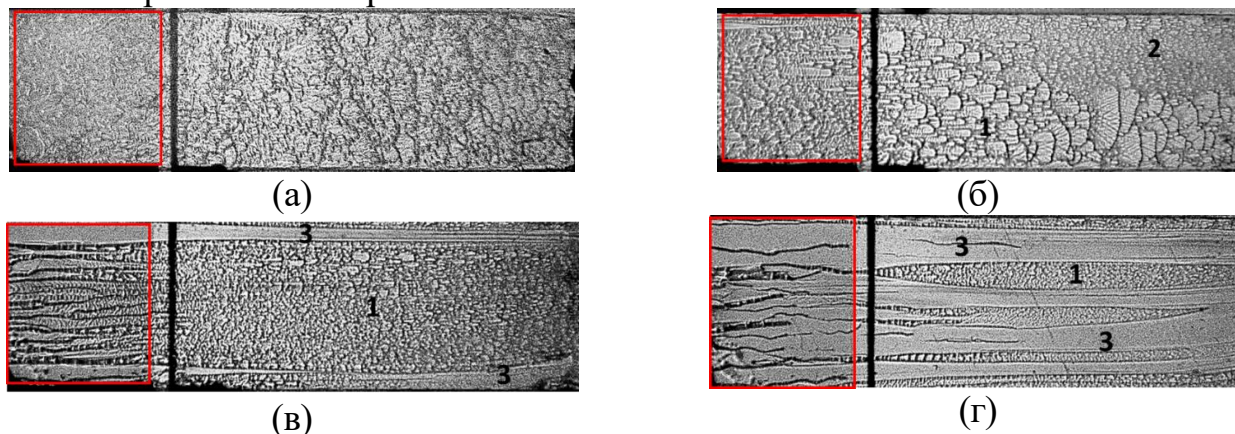


Рисунок 18 – Режимы течений при $G_l=195,3$ кг/(м²с) и $G_g=15$ кг/(м²с) с увеличением плотности теплового потока. (а) $q=0$ Вт/см², (б) $q=5$ Вт/см², (в) $q=10$ Вт/см², (г) $q=15$ Вт/см². Вид снизу. Обозначения: 1 – плёнка на нижней стенке, 2 – плёнка на верхней стенке. Красным обозначена область ИТО – нагревателя.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Впервые предложена классификация режимов течения в плоских микроканалах в диапазоне высот от 10 до 55 мкм, основанная на выявленных гидродинамических особенностях и специфических неустойчивостях, характерных для микромасштабных условий. Определены критерии идентификации режимов, установлены границы переходов между ними. В качестве основного режимобразующего фактора впервые выявлена модифицированная неустойчивость Саффмана–Тейлора, проявляющаяся как в зоне смешения фаз, так и вдоль межфазных границ в потоке. Показано, что эта неустойчивость имеет капиллярно-модуляционную природу и обусловлена развитием пальцеобразования, вызванного нарушением устойчивости межфазных границ под действием локальных возмущений, вызванных инерцией газовой

фазы. При этом механизм неустойчивости реализуется при $Ca_l \ll 1$ и $We_g \ll 1$, что свидетельствует о его неклассическом характере, отличном от традиционного вязкого пальцеобразования в ячейках Хеле–Шоу.

2. На основе установленных критериев построены карты режимов течения для трёх рабочих жидкостей с различными физическими свойствами: HFE7100, 92.8 % и 40% водно-спиртового растворов. В качестве координат использованы массовые скорости газа и жидкости. Показано, что несмотря на неклассическую природу формирования неустойчивостей, координаты Ca_l и We_g демонстрируют высокую обобщающую способность, выступая в роли масштабирующих параметров, отражающих чувствительность системы к соотношению вязких, инерционных и капиллярных сил. Это позволяет использовать указанные безразмерные комплексы для построения универсальных карт режимов течений даже в условиях, где доминируют эффекты, связанные с динамикой тонких плёнок и межфазных границ.

3. Проведены систематические измерения однофазного и двухфазного перепада давления в исследуемой группе каналов. На примере канала, высотой 51.2 мкм проведено исследование экспериментального параметра межфазного взаимодействия Чизхолма для двухфазных течений HFE7100-азот, вода-азот. Показано, что учёт сжимаемости газа даёт физически корректную интерпретацию параметра Чизхолма, что подтверждается ширен-визуализацией и сравнением с несжимаемым случаем. На основе анализа параметра Чизхолма предложена модификация модели раздельного течения Локхарта-Мартинелли для предсказания двухфазного перепада давления на трение, где для определения однофазного перепада давления по газу используется неявное выражение Чокетта и др. Показано, что предложенная модификация модели позволила корректно определять параметр межфазного взаимодействия с точностью 10%.

4. В рамках модифицированной модели была разработана корреляция параметра межфазного взаимодействия, основанная на физических соображениях, которая предсказывает двухфазный перепад давления на трение со средним абсолютным отклонением, не превышающим 12%.

5. Выполнено исследование влияния плотности теплового потока на перепад давления при локальном нагреве при фиксированной массовой скорости жидкости и различных массовых скоростях газа. Показано, что при высоких массовых скоростях газа перепад давления снижается с ростом плотности теплового потока за счёт интенсификации испарения жидкости, существенного осушения стенок канала и, как следствие, значительного уменьшения трения жидкости о стенки.

Перечень публикаций по теме диссертации в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. **Dementyev Y. A., Vozhakov I.S., Degtyarev S.A., Chashina M.S., Chinnov E.A.** Modification of the Lockhart-Martinelli model for prediction two-phase frictional pressure drop in microchannels taking into account gas quasi-compressibility effect // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 240. – P. 126605.

2. **Dementyev Y. A.**, Chinnov E.A., Kochkin D.Y., Ronshin F. V., Evstrapov A.A., Gusev V.S., Kabov O.A. An experimental investigation of adiabatic two-phase flow patterns in a slit microchannel with 1:800 aspect ratio // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2024. – Vol. 154. – P. 111153.
3. Ronshin F. V., **Dementyev Y. A.**, Chinnov E. A. Experimental study of two-phase flow regimes in slit microchannels // *Microfluidics and Nanofluidics*. – 2023. – T. 27. – №. 4. – C. 24.
4. **Dementyev Y.**, Chinnov, E., Ronshin, F., Evstrapov, A., Gusev, V.. Two-phase flow patterns investigation in large aspect ratio microchannel with T-mixer // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2023. – T. 459. – C. 04005.
5. **Dementyev Y.A.**, Chinnov E.A., Ronshin F.V., Evstrapov A.A., Gusev V.S., Karpich S.S., Kabov, O.A. An experimental investigation of two-phase gas-liquid flow patterns in extremely small gap microchannel // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2023. – T. 11. – №.2.
6. Ronshin F.V., **Dementyev Y.A.**, Kochkin D.Yu., Chinnov E.A. Effect of channel height on performance of two-phase flow in mini-and microchannels with a T-mixer // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2022. – T. 29. – №. 5. – C. 771-784.
7. **Dementyev Y. A.**, Ronshin, F. V., Chinnov, E. A., Evstrapov, A. A., Karpich, S. S., Gusev, V. S., Kabov, O. A. Experimental investigation of water-nitrogen flow in microchannel with high aspect ratio (with the 20 μm gap) // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – T. 2119. – №. 1. – C. 012070.
8. Ronshin F. V., **Dementyev Y. A.** Influence of Liquid Properties on Gas-Liquid Flow Regimes and Pressure Drop in a Flat Microchannel // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2021. – T. 30. – №. 4. – C. 661-671.
9. Роньшин Ф. В., Чиннов Е.А., **Деметьев Ю.А.**, Кабов О.А. Мостиковый режим течения в микроканалах // *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки*. – 2021. – Т. 499. – №. 1. – С. 43-47.
10. **Dementyev Y. A.**, Ronshin F. V., Chinnov E. A. Void fraction of nitrogen-water flow in flat microchannels // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – T. 1867. – №. 1. – C. 012037.
11. Ronshin F., **Dementyev Y.**, Chinnov E. Experimental study of heat transfer in two-phase flow regimes in rectangular microchannel // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – T. 1677. – №. 1. – C. 012151.
12. Ronshin F. V., **Dementyev Y. A.**, Vozhakov I. S. Waves in Liquid Film Regimes of Adiabatic Two-Phase Flow in a Slit Microchannel // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2020. – T. 29. – №. 4. – C. 592-599.
13. **Dementyev Y.**, Ronshin F. Determination of void fraction of two-phase flow in slit microchannel // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC, 2020. – T. 2212. – №. 1. – C. 020015.
14. Роньшин Ф. В., **Деметьев Ю. А.**, Чиннов Е. А. Формирование и деформация капель жидкости в микроканалах // *Письма в Журнал технической физики*. – 2020. – Т. 46. – №. 15. – С. 18-21.
15. Ronshin F.V., **Dementyev Y.A.**, Chinnov E.A., Cheverda V.V., Kabov O.A. Experimental investigation of adiabatic gas-liquid flow regimes and pressure drop in slit microchannel // *Microgravity Science and Technology*. – 2019. – Vol. 31. – P. 693-707.