

На правах рукописи



РОНЬШИН Федор Валерьевич

**ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В КОРОТКИХ
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ МИКРОКАНАЛАХ**

01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК - 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук ФАНО России в Лаборатории интенсификации процессов теплообмена.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Чиннов Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты:

Рудяк Валерий Яковлевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)”, профессор

Иванова Наталья Анатольевна, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Тюменский государственный университет”, зав. лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится “13” марта 2019 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просьба отправлять по адресу: Институт теплофизики СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090. dissovet@itp.nsc.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института теплофизики СО РАН и на официальном сайте в сети “Интернет” – [http://: www.itp.nsc.ru](http://www.itp.nsc.ru).

Автореферат разослан “_____” “_____” 2019 г.

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



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Развитие технологий теплообменников с микро- и наноразмерами показывает, что такие системы оказываются гораздо более энергоэффективными, чем макросистемы с размерами каналов более 1 мм. Существующие системы охлаждения не позволяют обеспечить современные требования по отводу тепла от высокотемпературных источников в электронном и микроэлектронном оборудовании. При уменьшении толщин плоских каналов, отношение поверхности к объему канала увеличивается обратно пропорционально его минимальному поперечному размеру, что обуславливает высокую интенсивность теплообмена в микросистемах. Такие системы получают все более широкое распространение в микроэлектронике, в аэрокосмической промышленности, транспорте и энергетике. Величина отводимых тепловых потоков в создающихся мини- и микротеплообменниках может достигать 1000 Вт/см^2 и более. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет понимание гидродинамики в мини- и микроканалах, которые обеспечивают наиболее эффективные процессы тепло- и массопередачи. Для анализа возможности создания таких систем необходимо иметь информацию о характеристиках двухфазного потока в коротких широких микроканалах. Оптимизация работы системы охлаждения обеспечивается подбором соответствующих расходов жидкости и газа и режима течения с наибольшим коэффициентом теплоотдачи. Двухфазное течение, используемое в различных системах в микроэлектронике, аэрокосмической промышленности, транспорте, энергетике и других отраслях, активно исследуется в последнее время. Опубликовано значительное количество работ по исследованию двухфазного течения в мини- и микроканалах. К настоящему моменту в большинстве опубликованных работ рассматривается гидродинамика двухфазных течений в относительно длинных каналах, в которых длина зоны течения двухфазного потока превосходит высоту и ширину канала в сотни и тысячи раз. В системах охлаждения микроэлектроники и других жидкостных мини системах длины каналов ограничены. Также на конференции ИНТС 16 профессор А. Bar-Cohen отметил, что для охлаждения трехмерных чипов перспективным решением является микроканальная система с характерным размером каналов $\sim 50 \text{ мкм}$. Хотя к настоящему времени исследования двухфазных течений в круглых трубах выполнены для весьма малых диаметров до 20 мкм, горизонтальные щелевые микроканалы остаются мало изученными. При уменьшении характерных размеров каналов трансформируются ранее известные и появляются новые виды неустойчивости двухфазного течения.

Цель исследования – экспериментальное исследование режимов двухфазных течений и границ между ними в коротких (длиной 80 мм) горизонтальных микроканалах шириной от 10 мм до 40 мм и высотой от 150 мкм до 50 мкм при помощи современных методов исследования.

Научные задачи:

1. Разработать экспериментальную методику для точного определения

границ между режимами в плоских микроканалах.

2. Экспериментально исследовать режимы течения в плоских микроканалах высотой от 150 мкм до 50 мкм и шириной от 10 мм до 40 мм в широком диапазоне расходов газа и жидкости.

3. С использованием разработанной методики определить критерии переходов между режимами и построить режимные карты.

4. Исследовать влияние геометрических параметров микроканала на границы между режимами. Провести сравнение режимных карт с представленными моделями в литературе.

5. Разработать собственную модель переходов между режимами.

6. Исследовать гидравлическое сопротивление микроканала в зависимости от расходов газа и жидкости. Провести сравнение с моделями, представленными в литературе.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Разработана новая методика измерения характеристик двухфазного потока в плоских микроканалах основанная на анализе изображений фрагментов двухфазных течений (пузырьков, капель, областей пленки на верхней и нижней стенках канала). Впервые проведены эксперименты в широких (шириной 10-40 мм) микроканалах высотой от 150 до 50 мкм. Предложен новый способ определения границ режимов двухфазного течения на основе количественных критериев, полученных при помощи разработанной методики.

2. В плоских микроканалах высотой 150 мкм и менее обнаружен капельный режим течения, когда по микроканалу движутся капли, представляющие из себя вертикальные жидкостные перемычки. Выделено три механизма формирования таких капель: вследствие разрушения горизонтальных жидкостных перемычек; отделение капли от жидкости, движущейся по боковым сторонам канала и формирование непосредственно возле сопла жидкости. Установлены критические числа We_{SG} , при которых капли начинают деформироваться и разрушаются. Предложена новая классификация режимов: пузырьковый (по каналу движутся пузырьки газа), инверсионный или капельный (когда в классических режимах наблюдается движение капель жидкости, представляющих из себя вертикальные жидкостные перемычки) и раздельный режим, не содержащий капель. Обнаружено, что область капельного режима течения существенно зависит от размеров канала и смачиваемости поверхности.

3. Выявлено, что ширина микроканала оказывает существенное влияние на характеристики двухфазного течения и приводит к появлению новых режимов течения и их неустойчивости. Выявлены новые закономерности влияния ширины канала на переход к кольцевому режиму. Предложена модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте: структурирование струй жидкости по каналу.

4. Проведено исследование перепада давления в канале $0,15 \times 10$ мм. Исследована зависимость перепада давления пленочных режимов течения от массового газосодержания. Показано, что минимальный перепад давления достигается в раздельном режиме, что важно для технических приложений.

Теоретическая и практическая значимость.

Разработанная методика может быть применена для анализа режимов течения и переходов между ними. Экспериментально полученные и обработанные с использованием новейших программно-алгоритмических средств результаты экспериментального исследования режимов двухфазных течений в плоских микроканалах могут быть применены при разработке систем охлаждения электронного оборудования. Полученные фундаментальные знания о формировании режимов течения, их особенностях и перепаде давления являются полезными для широкого круга технических приложений. Разработана модель перехода от раздельного режима к кольцевому, которая может быть использована при проектировании систем охлаждения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов диагностики, анализом погрешностей измерений, проведением калибровочных и тестовых экспериментов. Выбранные экспериментальные режимы характеризуются хорошей воспроизводимостью и согласуются с результатами работ других авторов.

Защищаемые результаты

1. Результаты экспериментального исследования режимов течения и переходов между ними на основе разработанной методики.
2. Результаты исследования гидравлического сопротивления при различных расходах газа и жидкости.
3. Результаты исследования капельного режима течения.
4. Результаты исследования влияния поперечных размеров канала на режимы двухфазного течения.
5. Модель перехода от раздельного режима течения к кольцевому.

Личный вклад. Вклад автора в исследования состоял в конструировании рабочих участков и сборке установки, проведении серии экспериментов, в разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа базы данных измерений, обработке экспериментальных данных и интерпретации результатов, разработки модели перехода от раздельного режима к кольцевому, а также подготовке статей и докладов на конференциях и для публикации в рецензируемых журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на 9 международных и 13 Всероссийских конференциях.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 40 печатных изданиях, 15 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 25 — в тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения,

четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 181 страниц с 85 рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит 153 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность экспериментального исследования, указана цель, поставлены задачи, определена новизна решения, отмечена практическая ценность результатов.

В первой главе отражено современное состояние исследуемой области науки, приведён аналитический обзор известных экспериментальных и теоретических результатов исследованию двухфазного течения в микроканалах. В большинстве работ четких критериев по переходу от одного режима к другому не выделяется. Во многих работах эти переходы определяются качественно и не могут обеспечивать достаточную точность при повторении экспериментов. Границы между режимами существенно отличаются в зависимости от условий эксперимента. Необходимо исследовать применимость используемых в литературе моделей к щелевым микроканалам, а также разработать модель, описывающую переход к пленочным режимам течения, важным для практических приложений.

Во второй главе даётся детальное описание экспериментального стенда и методик измерения.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.1. Газовая смесь подается в центральную часть микроканала из баллона (13). Расход газа регулируется от 20 до 10000 мл/мин и поддерживается постоянным при помощи регулятора расхода El-Flow фирмы Bronkhorst (14). Газ подается в газовую камеру (8), из которой поступает в микроканал через газовое сопло (2). Расход жидкости меняется от 0,5 до 100 мл/мин при помощи высокоточного шприцевого насоса Cole-Parmer EW-74905-54 (15). Жидкость вводится в микроканал через вход для жидкости (1). В качестве жидкости используется особо чистая дистиллированная деионизированная нанофильтрованная вода, которая предварительно очищается при помощи установки Direct-Q®3 UV. Проводимость воды измерялась перед экспериментом. В качестве газа используется азот высокой чистоты. Расстояние между газовым и жидкостным соплом составляет около 70 мм. Давление в газовой камере (8) измеряется датчиком давления WIKA Type P-30 (16). Данные датчика давления и текущий расход газа записываются в файл на персональном компьютере (17).

Схема рабочего участка приведена на рис. 2. Он состоит из двух параллельных пластин длиной 160 мм и шириной 55 мм (сверху – из стекла, снизу – из нержавеющей стали), расстояние между которыми задается двумя константовыми прокладками толщиной от 50 до 150 мкм. В нижней пластине под углом 11° сделано сопло, через которое в пространство между пластинами подается жидкость с помощью высокоточного шприцевого насоса. После сборки рабочего участка была измерена в нескольких точках высота

микроканала с использованием конфокального метода при помощи установки confocalDT IFC2451. Перед экспериментом были проведены измерения краевых углов смачивания пластин из нержавеющей стали и стекла при помощи метода лежащей капли с использованием установки KRUSS DSA 100. При помощи прибора TR200 была измерена шероховатость стенок микроканала. Размеры микроканала: длина – 160 мм, ширина – от 10 до 40 мм, высота – от 50 до 150 мкм.

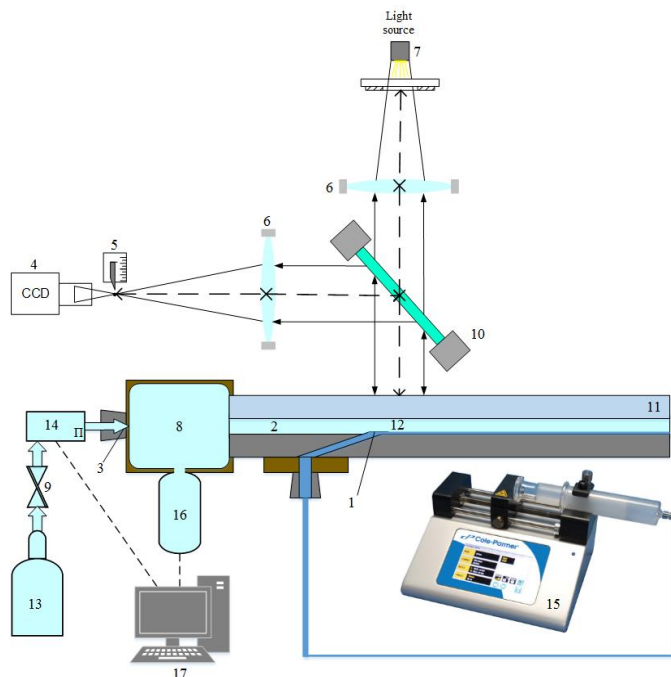


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки.

Регистрация взаимодействия газового потока с жидкостным осуществлялась в области 12 (рис. 1) цифровыми видео- и фотокамерами. Для изучения взаимодействия жидкости и газа в каналах был использован шлирен-метод. Данная методика позволяет зарегистрировать основные характеристики двухфазного течения: жидкостные перемычки между верхней и нижней стенок микроканала, пленку на верхней и нижней стенках микроканала. Полученные изображения обрабатываются при помощи разработанного алгоритма, позволяющего получить локальное газосодержание, характерные области пленок на верхней и нижней стенках микроканала, частоту образования пузырьков и другие количественные характеристики. Для вычисления обла-

сти, занятой жидкостью, течение принималось плоским. Такое допущение справедливо, т.к. толщина пленки составляет менее 10% от высоты канала при переходных режимах и менее 5% для развитых режимов.

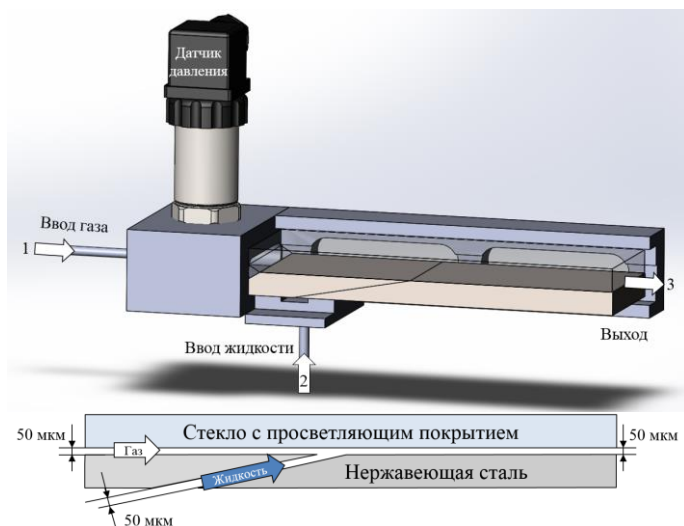


Рисунок 2 - Рабочий участок.

В третьей главе рассматриваются основные режимы двухфазного течения в зависимости от расходов газа и жидкостки, переходы между ними и перепад давления.

Экспериментально исследовано течение двухфазного потока в коротких горизонтальных прямоугольных каналах высотой от 150 до 50 мкм. Получены мгновенные шлирен-изображения картин двухфазного течения в начальной части канала на расстоянии до 40 мм от входа жидкости в канал. На основании шлиренизображений осуществлялась регистрация тонких пленок жидкости на стенках каналов. Постобработка полученных изображений позволила достаточно точно фиксировать структуру двухфазного потока в каналах. На основании полученной информации при постобработке изображений, а также из анализа данных видеосъемки и Шлирен визуализации были определены основные режимы течения двухфазного потока и построены режимные карты процесса течения для различных каналов.

Режимная карта для канала сечением $0.05 \times 20 \text{ мм}^2$ показана на рис. 3. Показаны характерные фотографии шлирен-методом для основных режимов двухфазного течения. В качестве координат на рисунке использованы приведенные скорости газа U_{SG} и жидкости U_{SL} , которые определялись как объемный расход газа или жидкости деленный на площадь поперечного сечения канала. Границы режимов течения для канала сечением $0.05 \times 20 \text{ мм}^2$ обозна-

чены сплошными линиями. Выделены следующие основные режимы течения: пузырьковый, снарядный, струйный, раздельный, вспененный и кольцевой.

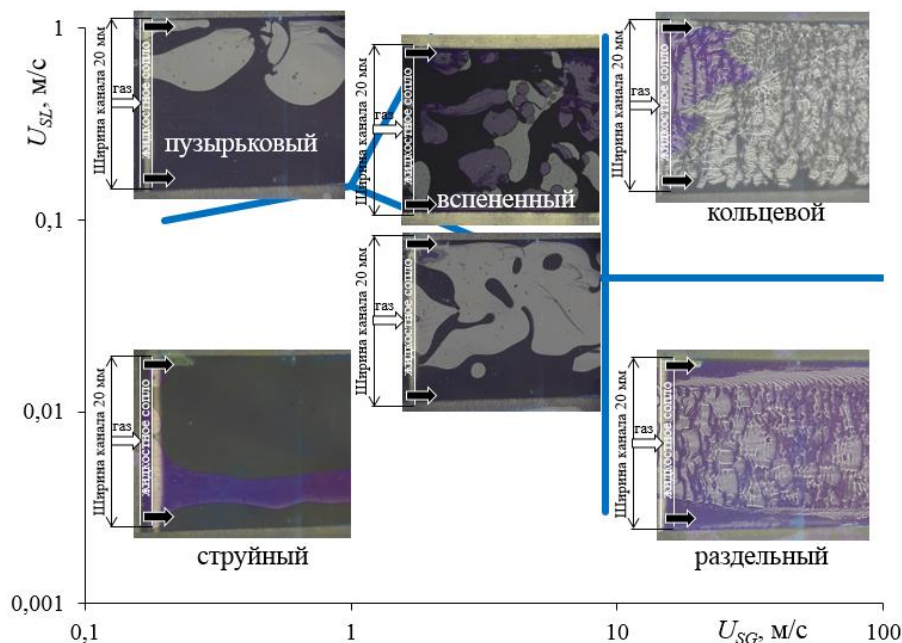


Рисунок 3 – Режимная карта двухфазного течения в канале сечением $0.05 \times 20 \text{ мм}^2$.

При очень малых приведенных скоростях жидкости наблюдается струйный режим, когда газ движется в центральной части микроканала, а основная часть жидкости перемещается по его периферии вдоль боковых стенок. Стационарный струйный режим наблюдается при малых приведенных скоростях жидкости и газа, когда газовый поток занимал не более половины сечения канала. Возмущения на поверхности жидкости не наблюдается. С увеличением приведенной скорости жидкости, она начинает занимать значительно большую часть микроканала, а по центру движется газовая струя. Струйный режим является специфическим для плоских мини- и микроканалов. При увеличении приведенной скорости жидкости начинают формироваться стабильные горизонтальные перемычки жидкости, происходит переход от струйного к пузырьковому режиму. В этом режиме по каналу движется жидкость, содержащая много небольших пузырьков газа. Размер и количество пузырьков изменяются в зависимости от расходов жидкости и газа, но размеры пузырьков всегда остаются значительно меньше ширины канала. Переход от струйного к пузырьковому режиму наблюдался при появлении

пузырей в микроканале вследствие взаимодействия потоков жидкости с боковых частей канала. При помощи разработанного алгоритма в Matlab®, записанные изображения режимов обрабатываются и вычисляется частота формирования пузырей. На рис. 4 слева представлена зависимость частоты формирования пузырьков от приведенной скорости жидкости, а справа – изображения, обработанные программой (сверху – струйный режим; снизу – пузырьковый режим). В струйном режиме пузыри не формировались. В области перехода виден резкий скачок частоты пузырьков от 0 до 63,7 Гц. Далее, при увеличении приведенной скорости жидкости, частота пузырьков продолжает возрастать.

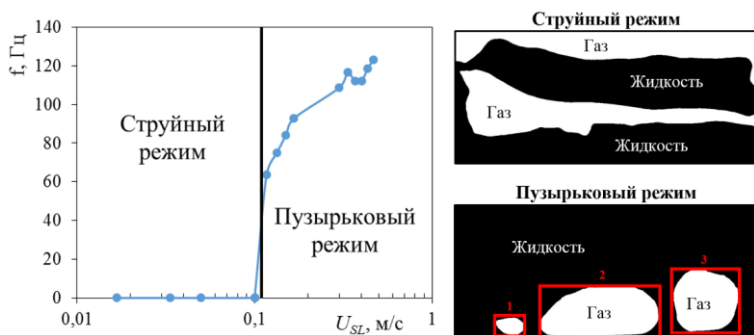


Рисунок 4 – Частота образования пузырьков газа при $U_{SG}=1,33$ м/с. Сплошной линией показана граница перехода.

На рис. 5 показано распределение размеров пузырьков в зависимости от приведенной скорости жидкости. Можно видеть, что при небольших приведенных скоростях жидкости преобладают пузырьки диаметром до 10 мкм^2 , но также наблюдаются и пузырьки большего диаметра, вплоть до 70 мкм^2 . При увеличении приведенной скорости жидкости растет количество пузырей, а их размер уменьшается. При $U_{SG}=1$ м/с; $U_{SL}=0,3$ м/с диаметр практически всех пузырей в потоке не превышает 10 мкм^2 . С ростом приведенной скорости газа размер пузырей увеличивается. Также растет и частота образования пузырей за счет увеличения их скорости.

При небольших приведенных скоростях жидкости ($U_{SL} < 0,7$ м/с) и высоких приведенных скоростях газа ($U_{SG} > 4$ м/с) наблюдается раздельный режим. В этом режиме основная часть жидкости движется по нижней стенке микроканала в виде пленки, увлекаемой потоком газа. Верхняя стенка микроканала остается осушенной. Газ в таком режиме занимает больше половины сечения микроканала. Раздельный режим характерен только для некруглых микроканалов, т.к. в круглых микроканалах пленка замыкается, образуя кольцевой режим. Переход от струйного режима к раздельному происходит при увеличении расхода газа. Движущаяся при струйном течении жидкость пере-

распределяется под действием газового потока, образуя пленку на нижней стенке микроканала. На рис. 6 справа показана зависимость газосодержания (1) и характерной области пленки на нижней стенке канала (2), определяемой следующим образом: $S_{bf}/S_{channel}$, где S_{bf} – измеренная площадь нижней стенки канала, смоченной жидкостью в исследуемой области, а $S_{channel}$ – общая площадь микроканала в исследуемой области. Справа представлено изображение струйного режима, где пленки жидкости не наблюдается и раздельного режима течения, где пленка жидкости на нижней стенке микроканала выделена цветом. Видно, что при переходе к раздельному режиму характерная область пленки на нижней стенке микроканала существенно возрастает и в дальнейшем, с ростом приведенной скорости газа, практически не меняется. Газосодержание в канале при струйном режиме возрастает с ростом приведенной скорости газа, при переходе к раздельному режиму можно видеть резкий рост. При раздельном режиме газосодержание практически не меняется при увеличении приведенной скорости газа. Практически вся жидкость движется по каналу в виде пленки, увлекаемой потоком газа.

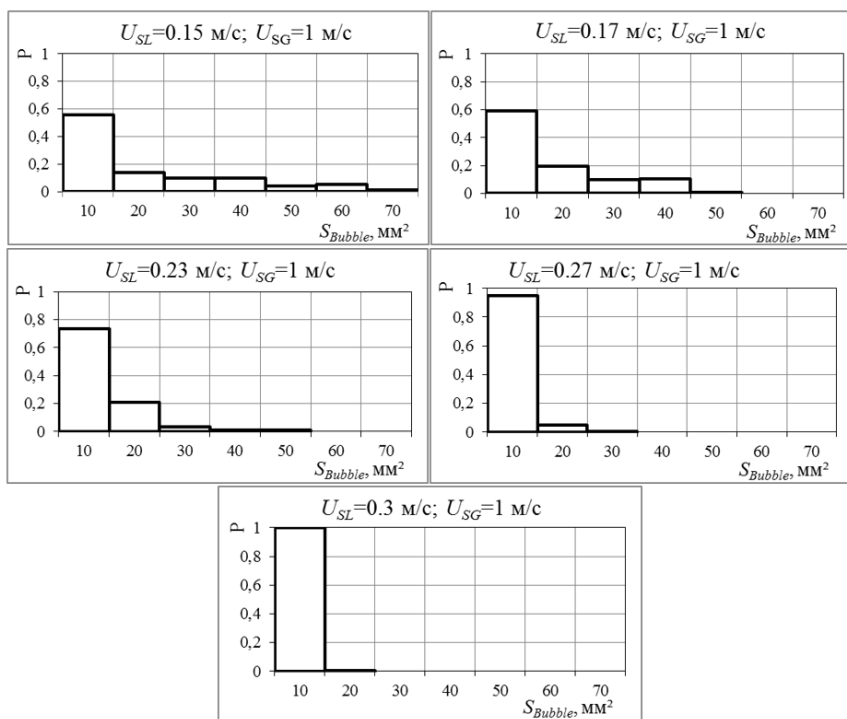


Рисунок 5 – Распределение площади пузырей в зависимости от приведенной скорости жидкости.

При увеличении приведенной скорости жидкости, пленка образуется на верхней стенке микроканала, происходит переход к кольцевому режиму. При кольцевом режиме течения жидкость движется по стенкам канала в виде пленки, а в центральной части газ вместе с каплями образует ядро потока. На рис. 7 показана зависимость характерной области пленки на верхней стенке канала, определяемой следующим образом: $S_{uf}/S_{channel}$, где S_{uf} – измеренная площадь пленки на верхней стенке канала, а S_{ch} – общая площадь микроканала в исследуемой области. Видно, что при раздельном режиме характерная область пленки на верхней стенке микроканала практически равна нулю, а при переходе к кольцевому режиму существенно возрастает.

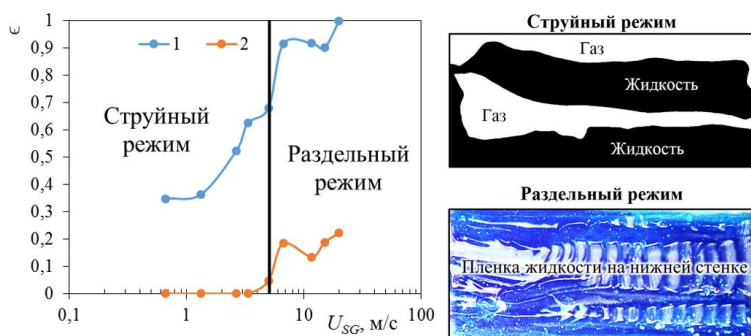


Рисунок 6 – Газосодержание (1) и характерная область пленки на нижней стенке микроканала (2) при $U_{SL}=0,05$ м/с. Сплошной линией показана граница перехода.

При высоких приведенных скоростях жидкости ($U_{SL}>0,2$ м/с) и приведенных скоростях газа от 2 до 5 м/с наблюдается вспененный режим. Он характерен для вертикальных каналов, где обусловлен гравитацией, а также наблюдается в широких горизонтальных микроканалах высотой менее 1 мм, где за него отвечают капиллярные силы. Для этого режима характерно существование разорванных перемычек. Существование вспененного режима обусловлено развитием неустойчивости струйного режима и увеличением частоты пульсаций жидкости, движущейся у боковых сторон канала под действием газового потока. На рис. 8а показано газосодержание в микроканале и характерная область пленки на нижней стенке канала в зависимости от приведенной скорости газа. Видно, что в логарифмическом масштабе газосодержание и характерная область пленки на нижней стенке канала монотонно возрастает с ростом приведенной скорости газа. На рис. 8б показана частота образования пузырьков в зависимости от приведенной скорости газа. Можно видеть, что при пузырьковом режиме частота образования пузырьков возрастает с ростом приведенной скорости газа, а при переходе ко вспененному режиму начинает убывать, т.к. горизонтальные перемычки жидкости разрушаются. При дости-

жении критического значения газосодержания ($\sigma > 0.42$) происходит коалесценция пузырей, за счет чего и уменьшается их количество.

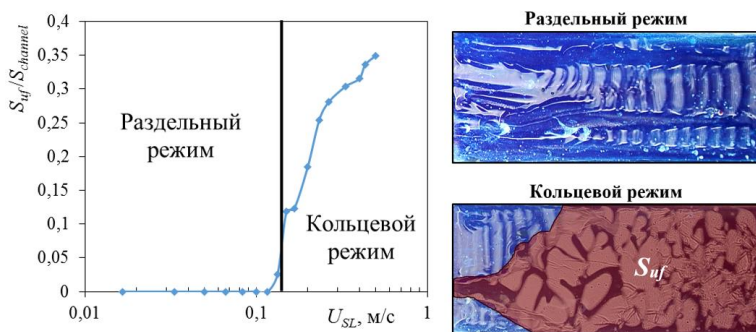


Рисунок 7 – Характерная область пленки на верхней стенке микроканала при $U_{SG}=16,7$ м/с. Сплошной линией показана граница перехода.

Проведено исследование перепада давления в микроканале сечением $0,15 \times 10$ мм. Для определения перепада давления на трение использовались две классических модели: модель гомогенного потока и модель раздельных потоков. Рассмотрены классические модели для определения перепада давления на трение: модель гомогенного потока и модель раздельного потока. В гомогенной модели наилучшее согласие с экспериментальными данными со средним абсолютным отклонением 30,6% получено с использованием модели гомогенной вязкости Dukler et al. (1964). В модели раздельного потока были наилучшее согласование экспериментальных данных со средним абсолютным отклонением 14,1% было достигнуто корреляцией Hwang and Kim (2006). Исследована зависимость перепада давления пленочных режимов течения от массового газосодержания. Показано, что минимальный перепад давления достигается в раздельном режиме, что важно для технических приложений.

В четвёртой главе выполнено исследование характерных особенностей двухфазного течения в широких прямоугольных микроканалах.

В *разделе 4.1* выполнено экспериментальное исследование двухфазного течения в микроканале высотой 150 мкм и шириной 20 мм с использованием различных жидкостей: очищенная вода фирмы Milli-Q, 50% водно-спиртовой раствор и FC-72. При помощи установки KRUSS DSA 100 проведены измерения поверхностного натяжения жидкостей, а также углов смачивания верхней и нижней стенок микроканала.

В струйном режиме при использовании в качестве жидкости водно-спиртового раствора и воды, пленка на верхней стенке микроканала не образуется. При использовании в качестве жидкости FC-72, на верхней стенке микроканала всегда формируется пленка жидкости, а также наблюдается движение вертикальных жидкостных перемычек (между верхней и нижней

стенками микроканала) и струек жидкости в канале, оставляющих за собой характерные следы на пленке жидкости. Ранее в работах Чиннов и Кабов (2011a); Chinnov et al. (2016) в условиях хорошей смачиваемости был зарегистрирован капельный режим, где также двигаются вертикальные перемычки жидкости, оставляющие за собой характерные следы. Таким образом, когда достигается очень хорошая смачиваемость, в данном случае краевой угол $12 \pm 2^\circ$ и гистерезис $8 \pm 4^\circ$, появляется новая особенность режимов течения, которая рассмотрена в разделе 4.2. Существенных отличий пузырькового и вспененного режимов при использовании различных жидкостей не наблюдается. При использовании в качестве жидкости FC-72 раздельный режим не наблюдается, т.к. пленка на верхней стенке канала формируется во всем диапазоне расходов жидкости и газа.

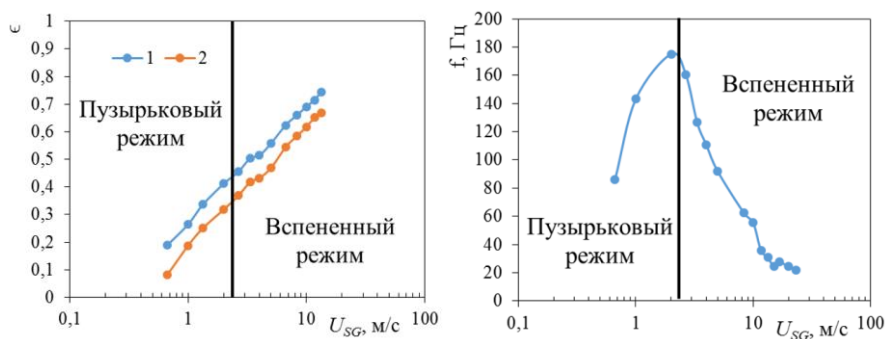


Рисунок 8 – (а) Газосодержание (1) и характерная область пленки на нижней стенке микроканала (2); (б) частота образования пузырьков газа при $U_{SL}=12.6$ м/с. Сплошной линией показана граница перехода.

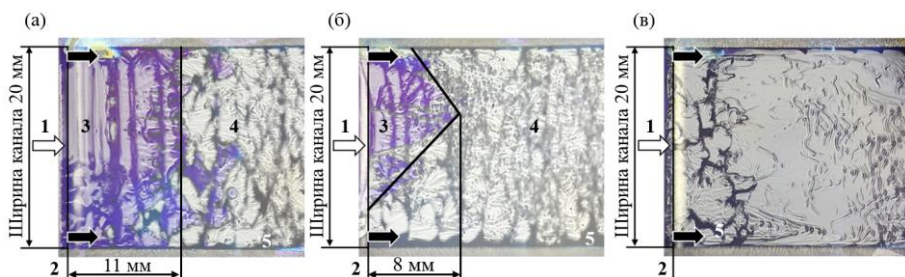


Рисунок 9 – Шлирен-фотографии кольцевого режима в канале сечением 0.15×20 мм², где в качестве жидкости используется (а) вода, (б) водно-спиртовой раствор, (в) FC-72. Обозначения: 1 – вход газа в микроканал, 2 – вход жидкости в канал, 3 – пленка на нижней стенке микроканала, 4 – пленка на верхней стенке микроканала, 5 – жидкость. Белые стрелки – направление движения газа, черные стрелки – направления движения жидкости.

При использовании в качестве жидкости воды, пленка на верхней стенке микроканала формируется равноудалено на расстоянии 11 мм от сопла жидкости, рис. 9а. При использовании водно-спиртового раствора формирование пленки жидкости на верхней стенке микроканала происходит сначала у боковых стенок микроканала, а затем она формируется в центральной части микроканала, причем на расстоянии меньшем, чем в случае использования в качестве рабочей жидкости воды, рис. 9б. При использовании в качестве жидкости FC-72 пленка на верхней стенке микроканала формируется непосредственно возле сопла жидкости за счет набросов жидкости на верхнюю стенку микроканала, рис. 9в. В этом случае пленка на верхней стенке микроканала формируется вследствие фронтальной неустойчивости. Таким образом, в зависимости от свойств жидкости, за формирование пленки жидкости на верхней стенке микроканала отвечают различные механизмы.

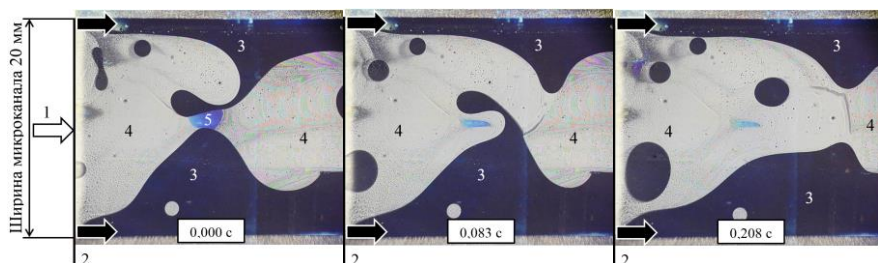


Рисунок 10 – Шлирен- фотографии подвижных капель жидкости в канале $0,15 \times 20 \text{ мм}^2$ при $U_{SG} = 2,78 \text{ м/с}$; $U_{SL} = 0,005 \text{ м/с}$ в зависимости от времени, вид сверху. Жидкость - FC-72, газ - азот. 1 – вход газа в микроканал, 2 – щель в нижней стенке микроканала для входа жидкости, 3 – жидкость, 4 – пленка на верхней стенке микроканала, 5 – пленка на нижней стенке микроканала. Белая стрелка – направление движения газа, черные стрелки – направления движения жидкости.

В разделе 4.2 выполнено исследование формирования и деформации капель жидкости. Обнаружено формирование капель, представляющих из себя жидкостные перемычки между верхней и нижней стенками микроканала в условиях хорошей смачиваемости (когда контактный угол близок к нулю) в каналах высотой 100 мкм и даже 150 мкм (при использовании FC-72 в качестве рабочей жидкости). Такие капли формируются даже при небольших расходах жидкости. На рис. 10 показано, как происходит формирование капель жидкости при $U_{SG}=2,78 \text{ м/с}$; $U_{SL}=0,005 \text{ м/с}$. Можно выделить три механизма формирования капель: Первый - формирование капель непосредственно возле жидкостного сопла. В таком случае капли сразу имеют форму, близкую к кругу (если рассматривать их плоскими), но размер может отличаться. Второй механизм - это формирование капель у боковых стенок, когда капля от-

деляется от жидкости, движущейся по боковым сторонам канала, а затем капля приобретает правильную форму. Третий - вследствие разрушения горизонтальных жидкостных перемычек. Диаметр каплей в таком режиме от 1 до 10 мм. При увеличении расхода газа интенсивность формирования капель возрастает, а размеры уменьшаются. Наблюдаются капли диаметром менее 0,5 мм.

С увеличением приведенной скорости газа, увеличивается газосодержание и частота образования капель за счет того, что уменьшается размер самих капель. При $U_{SG} = 0,278$ м/с; $U_{SL} = 0,0056$ м/с средний диаметр капель составляет 7 мм. При увеличении приведенной скорости газа до $U_{SG} = 1,11$ м/с средний диаметр капель уменьшается до 3 мм. С увеличением приведенной скорости жидкости частота формирования капель уменьшается, т.к. большая часть жидкости движется вдоль боковых стенок микроканала, а капли формируют горизонтальные перемычки жидкости. При более высокой скорости жидкости ($U_{SG} = 1,11$ м/с; $U_{SL} = 0,028$ м/с) форма капли жидкости начинает деформироваться, становится более сложной. При деформации капли могут сливаться с жидкостью, движущейся вдоль боковых стенок канала, образуя горизонтальные перемычки. При дальнейшем увеличении приведенных скоростей газа и жидкости ($U_{SG} = 5,56$ м/с; $U_{SL} = 0,111$ м/с), происходит переход к дисперсно-кольцевому режиму. Характерные размер капель уменьшается и растет их количество. Капли в таком режиме еще больше деформируются и начинают временами соединяться. При увеличении скорости жидкости до $U_{SL} = 0,333$ м/с, структура потока становится еще более сложной. Практически все деформированные капли жидкости соединяются друг с другом.

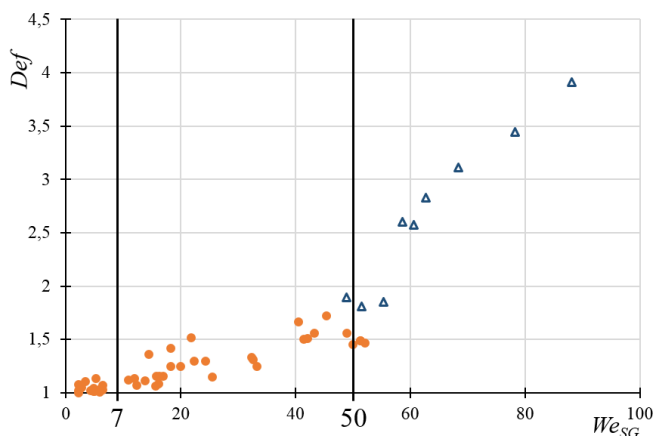


Рисунок 11 – Деформация капель жидкости в зависимости от числа Вебера.

При небольших значениях деформации капли имеют эллипсоидальную форму. Проведено исследование деформации капель жидкости $Def = a/b$, где a – максимальный диаметр капли, а b – минимальный в зависимости от числа вебера газа $We_{SG} = \rho D U_{SG}^2 / \sigma$, где ρ – плотность газа, $D = \sqrt{ab}$ – эквивалентный диаметр, а σ – поверхностное натяжение. Значения деформации капель жидкости в зависимости от числа вебера представлены на рис. 11. При небольших значениях We_{SG} капли имеют круглую форму и их деформация не превышает 1%. При увеличении значения We_{SG} деформация капель возрастает, значение деформации не превышает 1,8. При достижении числа вебера $We_{SG} = 50$, деформация капель становится настолько большой, что растет со временем, капля меняет форму и разрушается, образуя, как правило, две капли меньшего размера. В данном случае деформация капель определялась в последний момент, когда они имели эллипсоидальную форму. Таким образом, можно выделить три диапазона: начало деформации капель, деформация капель и разрушение капель.

Следовательно, можно выделить новую классификацию режимов, которая схематически представлена на рис. 12: 1 – пузырьковый режим, когда по микроканала движутся пузырьки газа; 2 – капельный режим, когда в классических режимах течения наблюдается движение капель жидкости, представляющих из себя вертикальные жидкостные перемычки и 3 – классические режимы течения, не содержащие капель. Причем область капельного режима течения существенно зависит от высоты канала и смачиваемости поверхности. При использовании воды в качестве рабочей жидкости, капли впервые появляются в микроканале, высотой 440 мкм (Чиннов и Кабов, 2011) только при высоких расходах газа. При уменьшении высоты канала интенсивность образования капель возрастает. В канале, высотой 50 мкм такие капли формируются во всем диапазоне расходов газа и жидкости. В условиях хорошей смачиваемости, в канале, высотой 150 мкм при использовании FC-72 в качестве рабочей жидкости (угол смачивания $\theta = 12^\circ$) капли жидкости наблюдаются во всем диапазоне расходов газа и жидкости. Когда как при использовании воды в качестве рабочей жидкости ($\theta = 106^\circ$), такие капли наблюдаются только при высоких расходах газа, при раздельном и кольцевом режимах. При использовании водно-спиртового раствора, $\theta = 58^\circ$, область капельного режима существенно возрастает.

В разделе 4.3 исследовано влияние размеров канала на режимы двухфазного течения. При увеличении высоты микроканала граница между вспененным и струйным режимами сдвигается в сторону более высоких приведенных скоростей жидкости, за счет чего уменьшается область вспененного режима течения. Граница между раздельным и кольцевым режимам течения практически не меняется. Граница между раздельным и струйным режимами течения сдвигается с сторону более низких приведенных скоростей газа с увеличением высоты канала, увеличивая область раздельного течения.

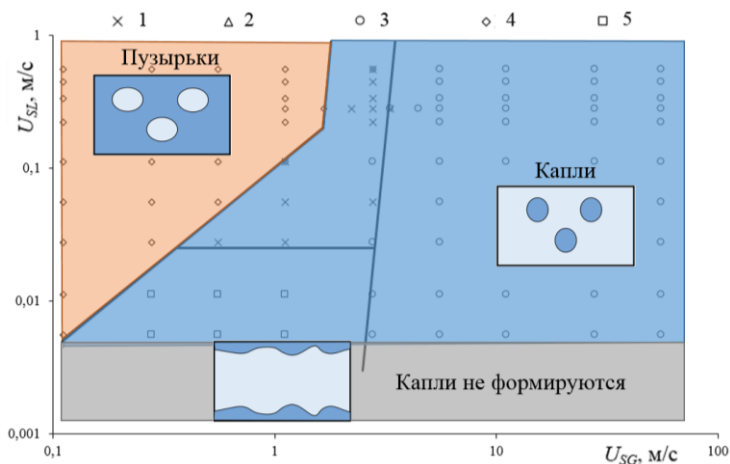


Рисунок 12 – Режимы течения в микроканале сечением $0,15 \times 20 \text{ мм}^2$. Маркерами обозначены классические режимы течения: 1 - Вспененный, 2 - Раздельный, 3 - Кольцевой, 4- Пузырьковый, 5 - Струйный. Жидкость: FC-72; газ: азот.

При уменьшении высоты канала начинают появляться новые эффекты, рис. 13. Пунктирной линией и закрашенной желтой областью показана относительная область вспененного режима S , определяемый как отношение площади вспененного режима на карте к максимальной площади вспененного режима на карте (в канале высотой 50 мкм). Видно, что область вспененного режима существенно увеличивается на карте, причем при переходе микроканалов высотой 200-100 мкм ($\sim 0,05 l_0$) тенденция меняется. Вспененный режим не наблюдается в горизонтальных макроканалах и является особенностью микроканалов. В микроканалах высотой менее 300 мкм гравитация не оказывает существенного влияния на режим двухфазного течения (Ребров, 2010). В микроканалах, высотой менее 300 мкм появляется новая особенность режимов течения – образование капель. С уменьшением высоты канала интенсивность образования капель растет. В микроканалах, высотой менее 150 мкм в условиях хорошей смачиваемости обнаружен капельный режим течения. В микроканалах, высотой менее 150 мкм существенное влияние на образование режимов течения начинает оказывать фронтальная неустойчивость, когда режим течения формируется непосредственно возле сопла жидкости. Таким образом, можно видеть, что при уменьшении микроканалов, при высоте 100-200 мкм наблюдается множество новых эффектов, не свойственным макро- и миниканалам. Следовательно, можно сказать, что именно таким размером ограничена высота микроканалов.

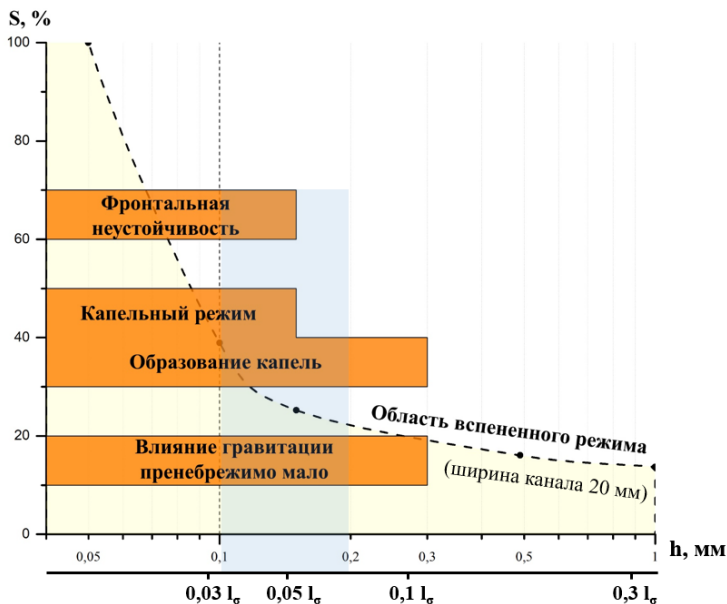


Рисунок 13 – Особенности режимов течения в микроканалах.

С увеличением ширины микроканала увеличивается область вспененного и пузырькового режимов (граница между вспененным и струйным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей жидкости), существенно сжимая область струйного режима течения. Граница между пузырьковым и вспененным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей газа, за счет чего область пузырькового режима сжимается. Граница между струйным и раздельным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей газа с увеличением ширины микроканала, область раздельного режима увеличивается. Граница между кольцевым и раздельным режимами сдвигается в сторону более низких приведенных скоростей жидкости.

В *разделе 4.4* проведено сопоставление экспериментальных данных с моделью Taitel–Dukler. В ходе выполнения работы в среде Matlab подготовлен алгоритм, рассчитывающий основные режимы двухфазного течения для задаваемых свойств жидкости, газа, а также размера канала по модели Taitel (1990). Программа работает следующим образом: В цикле изменяются приведенные скорости газа и жидкости в заданном диапазоне. Из уравнений находится равновесный уровень жидкости. Так как в этих уравнениях значение функции h_L/D задано неявно, уравнения решались методом Ньютона-Рафсона. Далее из уравнений определялся режим двухфазного течения. Проведено сравнение расчетных карт по модели как со всеми данными, получен-

ными в данной работе, так и с данными Shoham (1982); Ron'shin and Cheverda (2016). Следует отметить, что в исследуемых каналах ширина микроканала превосходит высоту более, чем на два порядка. При этом, изменение ширины канала оказывает незначительное влияние на гидравлический диаметр, на основе которого строятся режимные карты. Сделан вывод, что модель Taitel and Dukler разработана для труб и хорошо подходит для предсказания границ режимов в больших каналах, а в широких микроканалах не описывает экспериментальные данные.

В разделе 4.5 проведено сопоставление экспериментальных данных с моделью Ullmann and Brauner. Разработан алгоритм, рассчитывающий границы между режимами по модели Ullmann and Brauner (2007). Проведено сравнение с работами Triplett et al. (1999); Ron'shin and Cheverda (2016) и экспериментальными данным, полученными в текущей работе. Сделан вывод, что модель Ullmann and Brauner весьма хорошо предсказывает переход от струйного к раздельному (в канале $0,05 \times 20 \text{ мм}^2$ с точностью более 85%; в канале $0,05 \times 40 \text{ мм}^2$ точность около 60%) и переход от вспененного к кольцевому режиму (в обоих каналах все экспериментальные точки совпадают с расчетами по модели Ullmann and Brauner). При этом остальные переходы между режимами в щелевых микроканалах не предсказываются. Связанно это с тем, что в каналах при большом соотношении сторон (более 10) могут наблюдаться новые особенности режимов течения и их нельзя характеризовать только гидравлическим диаметром. В случае широких каналов гидравлический диаметр эквивалентен высоте канала, из-за чего при изменении ширины канала расчеты не изменяются, когда как экспериментальные карты имеют существенные отличия. Таким образом, необходима разработка моделей для широких каналов, которые будут учитывать высоту и ширину микроканала. Также в моделях не учитывается множество факторов, например, смачиваемость поверхности канала, которые начинают играть важную роль при уменьшении размеров микроканалов. Не смотря на это, стоит отметить, что модель Ullmann and Brauner достаточно хорошо предсказывает переход к раздельному и кольцевому режиму течения.

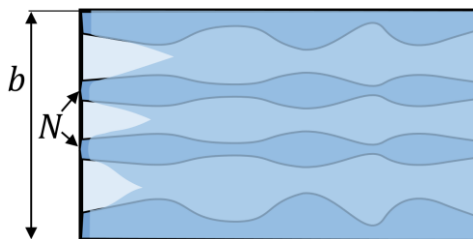


Рисунок 14 – Формирование кольцевого режима.

В разделе 4.6 разработана модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте: структурирование струй жидкости по каналу.

В рассмотренных моделях переход к от раздельного режима к кольцевому определяется диаметром канала. Однако, как было обнаружено экспериментально, этот переход зависит только от ширины плоского микроканала. Связано это с тем, что формирование пленки на верхней стенке канала обусловлено пульсацией струй, движущихся в центральной части микроканала, рис. 14. Количество струй N пропорционально ширине микроканала b . В этом случае переход к кольцевому режиму зависит от скорости жидкости, когда она достаточна для формирования пленки и шириной микроканала. Причем чем больше ширина микроканала, тем больше формируется струй жидкости и переход к кольцевому режиму происходит при меньшей скорости жидкости. Таким образом, можно ввести критические безразмерные числа We_{an} и Re_{an} для перехода к кольцевому режиму:

$$Re_{an} = \frac{bU_{SL}}{\nu}; \quad We_{an} = \frac{\rho b U_{SL}^2}{\sigma}$$

Тогда переход от раздельного режима к кольцевому определяется следующим уравнением, полученным эмпирическим путем для каналов высотой 0,05 - 1 мм и шириной 10 - 40 мм. Для построения модели использовались данные для более, чем 15 мини- и микроканалов высотой 0.05 - 1 мм и шириной 10-40 мм:

$$Re_{an} We_{an}^{-1/4} = 2,3 \cdot 10^5$$

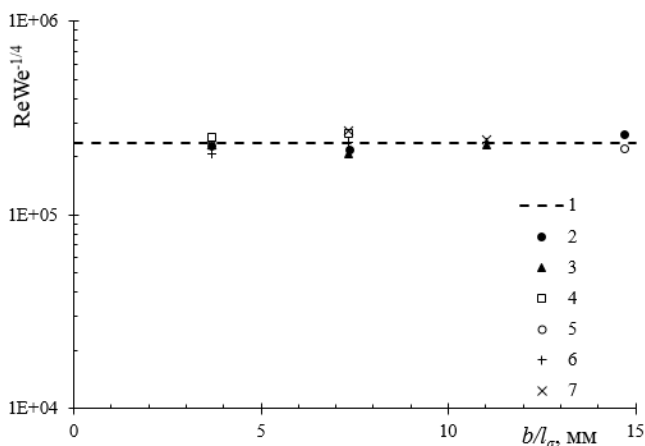


Рисунок 15 – Зависимость критерия $Re_{an} We_{an}^{-1/4} = 2,3 \cdot 10^5$ от безразмерного параметра b/l_σ для разработанной модели (1) и экспериментальных данных для каналов высотой (2) 50 мкм; (3) 100 мкм; (4) 150 мкм; (5) 200 мкм; (6) 300 мкм; (7) 1000 мкм.

На рис. 15 показана зависимость критерия $Re_{an} We_{an}^{-1/4} = 2,3 \cdot 10^5$ от безразмерного параметра b/l_σ для разработанной модели и экспериментальных результатов для мини- и микроканалов высотой 0,05 - 1 мм и шириной 10-40 мм. Из графика хорошо видно, что все границы переходов для указанных каналов хорошо согласуются с разработанной моделью.

Таким образом, выявлены закономерности влияния ширины канала на переход к кольцевому режиму. Предложена модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте: структурирование струй жидкости по каналу. Комбинация разработанной модели с моделью Ullmann and Brauner с высокой точностью предсказывает переход к кольцевому режиму течения в щелевых мини- и микроканалах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана новая методика измерения характеристик двухфазного потока в микроканалах. Впервые проведены эксперименты в широких (шириной 10-40 мм) микроканалах высотой от 150 до 50 мкм. Предложен новый способ определения границ режимов двухфазного течения на основе количественных критериев. Обнаружены режимы, не свойственные для горизонтальных макроканалов: струйный, вспененный и для круглых микроканалов: раздельный режим.

2. Проведено исследование перепада давления в канале 0,15x10 мм. Показано, что для гомогенной модели наилучшей является корреляция вязкости Dukler et al., 1964. Для модели раздельного потока наилучшей корреляцией для константы двухфазного взаимодействия является Hwang and Kim, 2006. Исследована зависимость перепада давления пленочных режимов течения от массового газосодержания. Показано, что минимальный перепад давления достигается в раздельном режиме, что важно для технических приложений.

3. Показано, что капельный режим течения является характерным для плоских микроканалов высотой 150 мкм и менее, когда по микроканалу движутся капли, представляющие из себя вертикальные жидкостные перемычки. Выделено три механизма формирования таких капель: вследствие разрушения горизонтальных жидкостных перемычек; отделение капли от жидкости, движущейся по боковым сторонам канала и формирование непосредственно возле сопла жидкости. Показаны критические числа We_{SG} , при которых капли начинают деформироваться и разрушаются. Предложена новая классификация режимов: пузырьковый (по каналу движутся пузырьки газа), инверсионный или капельный (когда в классических режимах наблюдается движение капель жидкости, представляющих из себя вертикальные жидкостные перемычки) и раздельный режим, не содержащий капель. Обнаружено, что область капельного режима течения существенно зависит от размеров канала и смачиваемости поверхности.

4. Выявлено, что ширина мироканала оказывает существенное влияние на режим двухфазного течения и приводит к появлению новых режимов течения и их неустойчивости. Проведено сравнение с моделями Taitel & Dukler (Taitel, 1990) и Ullmann and Brauner (2007), определяющими границы между режимами. Показано, что классические модели не описывают режимы течения и их границы в микроканалах. Только переход от вспененного режима к кольцевому описывается моделью Ullmann & Brauner. Выявлены закономерности влияния ширины канала на переход к кольцевому режиму. Предложена модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте: структурирование струй жидкости по каналу.

5. Показано, что при переходе от мини- к микроканалам появляются новые эффекты, режимы течения и их особенности. В частности, с уменьшением высоты канала влияние гравитации становится несущественным, вследствие чего формируется вспененный режим течения, характерный для вертикальных макроканалов. Область вспененного режима существенно увеличивается, причем при переходе к микроканалам высотой 100-200 мкм ($\sim 0,05 l_\sigma$) тенденция меняется. С уменьшением высоты канала появляются новые режимы неустойчивости, увеличивается интенсивность образования капель.

Публикации по теме диссертации В журналах из перечня ВАК:

1. Роньшин Ф.В. и др. Влияние свойств жидкости на режимы двухфазного течения в широком прямоугольном микроканале //Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – № 12. – С. 69-77.

2. Ronshin F. V. et al. Features of Two-Phase Flow Regimes in Short Horizontal Rectangular Microchannel with the Height of 50 μm //Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2016. – Т. 4. – №. 2-3. – С. 191-205.

3. Chinnov E. A., Ron'shin F. V., Kabov O. A. Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels //International Journal of Multiphase Flow. – 2016. – Т. 80. – С. 57-68.

4. Chinnov E. A., Ron'shin F. V., Kabov O. A. Two-Phase Flow Regimes in Short Horizontal Rectangular Microchannels //Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2015. – Т. 3. – №. 3. – С. 243-257.

5. Чиннов Е. А., Роньшин Ф. В., Кабов О. А. Исследование газовойодяного течения в горизонтальных прямоугольных каналах //Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22. – №. 5. – С. 645-653.

6. Чиннов Е. А., Роньшин Ф. В., Кабов О. А. Двухфазное течение в коротких горизонтальных прямоугольных микроканалах высотой 300 μm //Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – №. 17. – С. 1-8.

7. Чиннов Е. А., Роньшин Ф. В., Кабов О. А. Режимы двухфазного течения в микро-и миниканалах (обзор) //Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22. – №. 3. – С. 275-297.

8. Чиннов Е. А., Роньшин Ф. В., Кабов О. А. Особенности течения двухфазного потока в прямоугольном микроканале высотой 300 мкм //Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – №. 6. – С. 791-794.

9. Чиннов Е. А., Роньшин Ф. В. и др. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале //Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – №. 5. – С. 710-717.

10. Ron'shin F., Cheverda V. Investigation of Two-Phase Flow in Short Horizontal Mini Channel Height of 1 MM //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 72. – С. 01023.

11. Ron'shin F. Two-phase flow patterns in horizontal rectangular minichannel //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 84. – С. 00033.

12. Ron'shin F., Cheverda V., Kabov O. Features of two-phase flow patterns in horizontal rectangular microchannels of height 50 μm //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 84. – С. 00034.

13. Ronshin F. Experimental investigation of the two-phase flow in a short horizontal microchannel with the height of 50 μm and width of 20 mm //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 92. – С. 01013.

14. Ronshin F. Features of two-phase flow in a microchannel of 0.05 $\times$ 20 mm //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 159. – С. 00040.

15. Fina V. P., Ronshin F. V. Two-phase flow regimes in a horizontal microchannel with the height of 50 μm and width of 10 mm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 925. – №. 1. – С. 012034.

Материалы конференций:

16. Роньшин Ф.В. Двухфазные течения в коротких прямоугольных горизонтальных микроканалах // 51-я Международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс», 12–18 апреля 2013, Новосибирск

17. Роньшин Ф.В. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале // 52-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2014, 11–18 апреля 2014, Новосибирск

18. Чиннов Е.А., Роньшин Ф. В., Кабов О.А. Двухфазное течение в коротких горизонтальных прямоугольных микроканалах // Всероссийская конференция XXXI «Сибирский теплофизический семинар», 17-19 ноября 2014, Новосибирск

19. Роньшин Ф.В. Двухфазное течение в горизонтальных прямоугольных щелевых микроканалах // XIII Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики», 20-23 ноября 2014, Новосибирск

20. Роньшин Ф.В. Двухфазное течение в горизонтальном прямоугольном микроканале высотой 300 мкм // 53-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2015, 11–17 апреля 2015, Новосибирск

21. Роньшин Ф. В., Чиннов Е.А., Кабов О.А. Исследование двухфазного течения в горизонтальных прямоугольных микроканалах высотой 300 мкм // 5-я Всероссийская конференция Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий, 15 – 18 июня 2015, Новосибирск

22. Chinnov E.A., Ron'shin F.V., Kabov O.A. Two-Phase Flow Patterns in Short Horizontal Rectangular Microchannels // 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, 11-15 October 2015, Zermatt, Switzerland.

23. Ronshin F. V., Chinnov E. A., Cheverda V. V., Kabov O. A. Features of two-phase flow patterns in horizontal rectangular microchannels of height 50 μm // International Symposium and School for Young Scientists INTERFACIAL PHENOMENA AND HEAT TRANSFER, 2-4 of March 2016, Novosibirsk, Russia

24. Ronshin F. V., Chinnov E. A., Kabov O. A. Two-phase flow patterns in horizontal rectangular minichannel // International Symposium and School for Young Scientists INTERFACIAL PHENOMENA AND HEAT TRANSFER, 2-4 of March 2016, Novosibirsk, Russia

25. Роньшин Ф.В., Чеверда В.В. Исследование двухфазного течения в коротком горизонтальном миниканале высотой 1 мм // Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», 19 - 21 апреля 2016 г., Томск

26. Ron'shin F. V., Chinnov E. A., Cheverda V.V., Kabov O. A. Two-phase flow regimes in short horizontal rectangular microchannels // 9th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2016), 22-27 May 2016, Firenze, Italy.

27. Роньшин Ф.В., Чеверда В.В. Экспериментальное исследование двухфазного течения в коротком горизонтальном микроканале высотой 50 мкм и шириной 20 мм // VII Всероссийская научная конференция с международным участием «ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ», 26 - 28 октября 2016 г., Томск

28. Ronshin F. V., Cheverda V.V., Chinnov E. A., Kabov O. A. Two-phase flow regimes in the horizontal rectangular microchannel of height 0.15 mm // V International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-V), 16-17 November 2016, Novosibirsk, Russia

29. Роньшин Ф.В., Чеверда В.В. Особенности двухфазного течения в микроканале сечением 0,05×20 мм // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики” 22-25 ноября 2016 года, Новосибирск

30. Роньшин Ф.В., Чеверда В.В. Исследование влияния свойств жидкости на режимы двухфазного течения в микроканале // XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 22 – 26 мая 2017 г., Санкт-Петербург

31. Роньшин Ф.В., Чеверда В.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А. Экспериментальное исследование двухфазного течения в прямоугольных микроканалах

высотой 50 мкм // Всероссийская конференция «XXXIII «Сибирский теплофизический семинар» с элементами научной школы для молодых ученых, посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН» 6-8 июня 2017 года, Новосибирск

32. Ronshin F., Cheverda V., Chinnov E., Kabov O. An Experimental Investigation into the Effect of Liquid Properties on Two-Phase Flow in Rectangular Microchannel // The 2nd International Conference of INTERFACIAL PHENOMENA AND HEAT TRANSFER, July 7-10, 2017, Xi'an, China

33. Ronshin F., Cheverda V., Chinnov E., Dementyev Yu. Kabov O. Experimental Characterization of Two-Phase Flow Regimes and Flow Boiling in Microchannel // 12-th International conference "Two-Phase Systems for Space and Ground Applications", September 11-15, 2017, Novosibirsk, Russia

34. Fina V., Ronshin F., and Cheverda V. Features of two-phase flow regimes in a horizontal rectangular microchannel // 2nd International School of Young Scientists «Interfacial Phenomena and Heat Transfer», 11-16 September, 2017, Novosibirsk, Russia

35. Dementyev Yu. A., Ronshin F. V. The experimental investigation of two-phase flow regime borders and pressure drop in narrow rectangular microchannels // VII International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-VII), 12-13 July 2018, Novosibirsk, Russia

36. Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чеверда В.В., Чиннов Е.А. Экспериментальное исследование двухфазного течения в щелевых микроканалах // Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», 27–30 августа 2018, Новосибирск

37. Чиннов Е.А., Шатский Е.Н., Роньшин Ф.В. Критический тепловой поток и теплообмен в термосифоне с поверхностями улучшенными для кипения и конденсации // Всероссийская конференция «XXXIV Сибирский теплофизический семинар», 27–30 августа 2018, Новосибирск

38. Ronshin F. V., Dementyev Yu. A., and Chinnov E. A. Characteristics of the two-phase flow in a slit microchannel // 12th European Fluid Mechanics Conference, 09-13 September 2018, Vienna, Austria

39. Cheverda V. V., Ronshin F. V., Chinnov E. A., Kabov O. A. A two-phase flow in microchannel // Jubilee International Conference X Minsk International Seminar Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources, 10–13 September 2018, Minsk, Belarus

40. Роньшин Ф.В., Дементьев Ю.А., Чиннов Е.А., Чеверда В.В., Кабов О.А. Исследование характеристик двухфазного течения в широком прямоугольном микроканале // Седьмая российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-7), 22-26 октября 2018 года, Москва

Подписано к печати 2019г. Заказ №
Формат 60×84/16. Объем 1.0 уч.-изд.л. Тираж 100 экз.

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