

На правах рукописи



**Ковалев Александр Владиславович**

**ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ ФАЗ  
НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОТОКОВ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ  
В МИКРОКАНАЛАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Бильский Артур Валерьевич

Официальные оппоненты:

Брацун Дмитрий Анатольевич — доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой прикладной физики.

Пискунов Максим Владимирович — кандидат физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «01» февраля 2023 г. в 9 часов 30 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](http://www.itp.nsc.ru). Отзыв на автореферат в двух экземплярах, 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](mailto:dissovet@itp.nsc.ru)).

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2022 г.

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



Терехов Владимир Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

За последние два десятилетия микроканалы зарекомендовали себя как удобный инструмент, позволяющий интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, а также осуществлять высокоточный контроль за потоками жидких сред. Микроканальные потоки газ-жидкость и жидкость-жидкость позволяют создавать капли и пузыри дисперсной фазы с хорошо контролируемыми размерами, в которые можно инкапсулировать, например, биологические объекты для последующего анализа. Микроканальные устройства уже применяются для секвенирования биополимеров, генерации эмульсий, производства микрочастиц, охлаждения процессоров и т.д. Существенное увеличение площади поверхности к заключённому в ней объёму по сравнению с крупномасштабными устройствами приводит к повышенным коэффициентам переноса вещества и энергии, что делает микроканалы перспективной альтернативой для химической промышленности и приложений, связанных с теплоотводом.

Особенностью многофазных потоков, и, в частности, двухфазных потоков газ-жидкость или жидкость-жидкость, является наличие межфазных поверхностей, которые вносят дополнительную сложность в аналитические и численные подходы решения задач гидродинамики. Межфазные поверхности могут возникать, разрушаться, деформироваться. Могут возникать градиенты межфазного натяжения, вызывающие дополнительные потоки вещества, что известно, как эффект Марангони. Кроме того, при взаимодействии межфазной поверхности с твёрдыми стенками возникают контактные линии, которые требуют учёта смачиваемости поверхности и сил адгезии, процессов на молекулярном масштабе вблизи линии трёхфазной границы.

Такое многообразие явлений, связанных с межфазными поверхностями, и их зависимость от характерных масштабов задачи обуславливают качественные отличия поведения многофазных течений в микроканалах по сравнению с каналами большого размера. Многие аспекты микроканальных течений остаются до сих пор малоизученными, что затрудняет проектирование и разработку микроканальных устройств. При этом на практике нужно знать границы переходов между различными режимами, размеры генерируемых пузырьков или капель, их скорость, дисперсность и многие другие параметры. Всё это ведёт к необходимости экспериментальных исследований как фундаментального, так и прикладного характера, которые позволят получить данные для построения эмпирических моделей, а также для верификации результатов численного моделирования и аналитических решений.

В микроканальных потоках жидкость-жидкость, где эффекты, связанные с силой тяжести и инерцией, пренебрежимо малы по сравнению с эффектами вязкого трения и межфазного натяжения, наиболее важную роль играют вязкости фаз и геометрия используемых каналов. На сегодняшний день малоизученным остаётся влияние вязкостей фаз и их отношения на режимы течения жидкость-жидкость в микроканалах. В известных работах почти не затронуты предельные случаи малых отношений вязкости, а также особенности влияния геометрических параметров, такие как наличие дугообразных участков канала с высокой кривизной. Необходимость интенсификации процессов тепломассообмена и управления потоками несмешивающихся жидкостей на микромасштабах в совокупности с обозначенными научными проблемами определяют предмет данной диссертации.

**Цель работы:** комплексное экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и структуры течений двух несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения для широкого диапазона отношений вязкости фаз и параметров потока.

В рамках поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи:**

Определение влияния вязкости фаз на режимы течения жидкость-жидкость и границы перехода между ними.

Исследование влияния вязкости фаз на характеристики сегментированных режимов течения: размеры включений дисперсной фазы (капель, снарядов), их частоту формирования и скорость движения в потоке.

Изучение структуры внутренних течений в снарядах и перемычках разной вязкости, измерение распределения скорости в них бесконтактными оптическими методами.

Детальное экспериментальное исследование экстремально малых отношений вязкости дисперсной фазы к несущей в микроканальных течениях жидкость-жидкость.

#### **Научная новизна.**

Проведено комплексное экспериментальное исследование структуры потока и режимов течения с использованием современных оптических методов измерения  $\mu\text{PIV/PTV}$  и скоростной визуализации для различных систем жидкость-жидкость в микроканалах для широкого диапазона вязкостей фаз и скоростей потока.

Получена обширная база данных по границам перехода между различными режимами течения для ряда комбинаций несмешивающихся жидкостей. На основе полученных экспериментальных данных предложена модификация

безразмерного комплекса на основе чисел Вебера и Онезорге, которая позволила обобщить границу перехода между сегментированными (снарядный, капельный) и непрерывными (параллельный, кольцевой, ручейковый) режимами на случай жидкостей с различными физическими свойствами, определены пределы применимости обобщения по отношению вязкостей жидкостей и диаметру каналов.

Впервые показано влияние отношения вязкостей фаз на форму капель и снарядов и соответствующие изменения в топологии внутренних течений, описан механизм явления.

Показана возможность срыва микрокапель с хвостовой части снарядов дисперсной фазы для случая малых отношений вязкостей фаз за счёт сдвиговых напряжений при отсутствии поверхностно-активных веществ, предложен безразмерный комплекс для определения перехода к отрыву микрокапель.

В потоках жидкостей с малым отношением вязкости дисперсной фазы к несущей в серпантинных микроканалах впервые обнаружены разрыв снарядов дисперсной фазы в криволинейных участках за счёт деформации межфазной границы и разрушение вихревых структур в перемычках несущей фазы при малых числах Дина.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Полученные в работе экспериментальные данные значительно дополняют и расширяют существующие знания о потоках несмешивающихся жидкостей на микромасштабах. Предложенная в работе модификация безразмерного комплекса позволяет предсказать переход от сегментированного потока к непрерывному в широких диапазонах физических свойств жидкостей при различных вариациях геометрии микроканалов. В совокупности с данными по длине и скорости снарядов текущая экспериментальная база позволяет проектировать чипы для проведения химических реакций в микроканалах, например, реакции экстракции, как в непрерывном, так и в сегментированном режиме. Обнаруженные режимы с генерацией капель микронного и субмикронного размера могут быть использованы для создания микрочастиц в каналах с характерными размерами до нескольких сотен микрометров. Данные по интенсификации перемешивания и циркуляции в вихревых структурах в серпантинных и прямых микроканалах позволяют подбирать наиболее эффективный дизайн устройства для создания микромиксеров и микрореакторов. Детальные экспериментальные данные о распределениях скорости в дисперсной фазе могут быть использованы для верификации численного моделирования и аналитических моделей.

## **Основные положения, выносимые на защиту.**

Результаты экспериментального исследования потоков жидкость-жидкость в широких диапазонах вязкостей фаз и скоростей потоков, соответствующие карты режимов течения и модификация безразмерного параметра для предсказания перехода между сегментированным и непрерывным потоком.

Зависимости размеров, скоростей и частоты формирования включений дисперсной фазы от управляющих параметров в сегментированных режимах течения для наборов жидкостей различной вязкости, универсальная зависимость частоты формирования капель от числа капиллярности.

Результаты исследования влияния вязкостей фаз на распределения скорости в снарядах и значения циркуляции в вихревых структурах, измеренные и рассчитанные для прямых и криволинейных участков микроканалов.

Механизм деформации межфазной поверхности и изменения структуры потока при экстремально низких отношениях вязкостей фаз, приводящих к срыву капель микронного и субмикронного размера в снарядном режиме течения.

Результаты исследования влияния кривизны серпантинных микроканалов на режимы течения несмешивающихся жидкостей с экстремально низким отношением вязкостей фаз, механизм отрыва лигаментов с хвостовой части снарядов, соответствующие карты режимов.

**Достоверность результатов** подтверждается проведённым анализом погрешностей для всех измерений. Основные выводы диссертации основаны на результатах больших статистических выборок с рассчитанным стандартным отклонением, представленным на графиках и указанным в тексте. Повторяемость экспериментов была протестирована и подтверждена, как в рамках данной диссертации, так и в работах других авторов, цитирующих опубликованные по представленным результатам статьи. Сравнение с известными из литературы аналитическими и эмпирическими моделями, а также с экспериментальными данными других авторов дополнительно подтверждает достоверность представленных результатов. Все представленные результаты прошли этап рецензирования и опубликованы в ведущих мировых изданиях.

## **Личный вклад соискателя.**

Все экспериментальные данные, карты режимов и зависимости, представленные в работе, получены лично автором. Модификация безразмерного параметра для случая перехода между сегментированным и непрерывным режимом предложена лично автором. Измерения методиками micro-PIV/PTV и последующая обработка результатов с использованием собственных кодов проведены лично автором. Вклад автора включает участие

в постановке задач, а также в проектировании экспериментального стенда и микроканальных участков.

### **Апробация.**

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: The 7th International Conference on Micro and Nano Flows (England, London, 2021); 5th European Conference on Microfluidics (Strasbourg, France, 2018); 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Novosibirsk, 2019); XIV и XVI Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019, 2021); XXI и XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках" (Санкт-Петербург, Москва, 2017, 2019); II Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017); Всероссийская конференция «XXXVI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2020); XIV и XV Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической газодинамики» (Новосибирск, 2018, 2020); 55-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2017 (Новосибирск, 2017).

### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 23 работы, включая 9 статей, в том числе 8 статей – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, включающих в себя обзор литературы, заключения и библиографии. Работа изложена на 98 страницах, содержит 56 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 113 работ.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** диссертации обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, сформулирована новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приведён обзор современного состояния исследуемой области. Кратко дано описание основных уравнений и граничных условий, описывающих задачу о течении двух несмешивающихся жидкостей в общем случае. Рассмотрены безразмерные критерии подобия, возникающие из соответствующих уравнений сплошной среды. Сформулированы основные

термины, в том числе критерий перехода к микроканальным потокам. Подробно рассмотрены режимы течения, возникающие в микроканальных потоках жидкость-жидкость и газ-жидкость. Проанализирован ряд наиболее актуальных работ, в которых исследовались режимы течения жидкость-жидкость в микроканалах и были построены карты режимов с использованием безразмерных параметров. Представлен список основных безразмерных комплексов, использующихся в литературе для обобщения режимных карт. Показано, что на сегодняшний день не существует универсального критерия, позволяющего предсказать переход между непрерывным и сегментированным потоком для произвольной системы жидкость-жидкость.

Подробно обсуждаются сегментированные режимы течения (снарядный, капельный) их свойства и особенности. Представлена ретроспектива изучения задачи о скорости движения газовых пузырей и снарядов жидкости в капиллярах и микроканалах, рассмотрена связь этой скорости с толщиной плёнки несущей фазы. Приведены основные известные механизмы формирования капель и снарядов для потоков жидкость-жидкость в Т-образных микроканалах. Представлены формулы, описывающие характерный размер снарядов и капель для разных режимов формирования. Изложены основные результаты работ по исследованию структуры потока в снарядах дисперсной фазы и перемычках несущей. Описаны варианты сложной трёхмерной топологии течений в снарядах для каналов прямоугольного сечения, полученной в ряде последних работ.

Отдельно рассмотрено влияние кривизны микроканалов и отношения вязкостей фаз на параметры потоков жидкость-жидкость. Показано, что для снарядного режима течения в криволинейных микроканалах возможны различные варианты структуры потока в снарядах и перемычках. При этом данные различных авторов относительно размеров и расположения контуров циркуляции, реализующихся в снарядах, противоречивы. Рассмотрено влияние отношения вязкостей на карты режимов и сегментированные режимы течения.

Как следует из рассмотренных работ, режимы течения несмешивающихся жидкостей в микроканалах зависят от большого числа параметров, а упрощённые модели переходов между различными режимами не обладают удовлетворительной предсказательной силой. Безразмерные критерии, предлагаемые разными авторами, не являются в достаточной степени универсальными, чтобы описать произвольную систему жидкость-жидкость или газ-жидкость. При этом границы применимости этих критериев зачастую не ясны. Показано, что отношение вязкостей дисперсной фазы к несущей  $\lambda = \mu_d/\mu_c$  является критическим параметром для карт режимов и структуры течений в дисперсной фазе, однако важный случай  $\lambda \ll 1$ , часто

встречающийся на практике в системах масло - водная фаза, остаётся малоизученным. Неясно влияние искривленных участков канала на структуру потока в снарядном режиме. При этом значения безразмерной кривизны в известных работах ограничены диапазоном  $\beta < 0,5$  ( $\beta = w/R$ , где  $w$  – ширина канала,  $R$  – радиус кривизны). Это обуславливает необходимость систематических экспериментальных исследований влияния отношения вязкостей  $\lambda$  на режимы течения жидкость-жидкость и их характеристики в прямых и серпантинных микроканалах.

**Вторая глава** содержит описание экспериментальной установки, методов исследования, рабочих участков и жидкостей, использованных в экспериментах. Все эксперименты проводились в микроканалах прямоугольного сечения. Использовались сечения 120x240 и 200x400 мкм. Большая часть экспериментов была выполнена в микроканалах с Т-образным входом. В работе использовались прямые и серпантинные каналы с цепочками дугообразных участков, их схематичное изображение представлено на Рисунке 1. Серпантинные каналы состояли из последовательных изогнутых участков с радиусами кривизны  $R = 400$  мкм ( $\beta = 1$ ) и  $R = 1000$  мкм ( $\beta = 0,4$ ). Материалы, из которых были изготовлены каналы, а также методики изготовления подробно описаны в тексте диссертации.

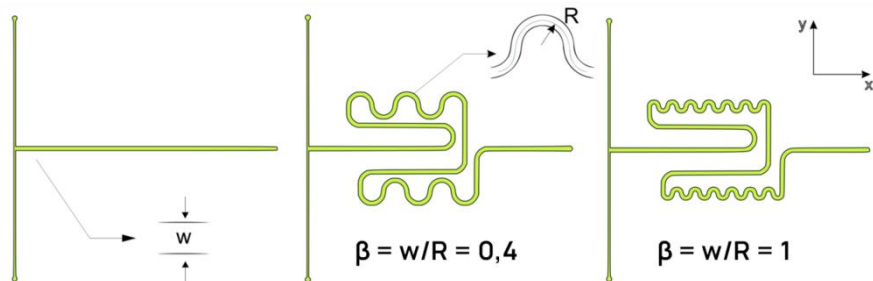


Рисунок 1. Схема прямого и серпантинных микроканалов, изготовленных из полиметилметакрилата.

В качестве несущей фазы использовались касторовое масло, силиконовые масла различной вязкости, жидкий полидиметилсилаксан (ПДМС) и ионная жидкость (1-Butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide), применение которой актуально в приложениях, связанных с экстракцией. Дисперсной фазой являлись вода и водные растворы глицерина. Всего было исследовано 11 наборов несмешивающихся жидкостей. Выбранные жидкости позволяют варьировать отношение вязкостей фаз  $\lambda$  в широких диапазонах ( $0,0013 < \lambda < 5,21$ ) при малых изменениях контактного угла смачивания  $\theta$  и межфазного натяжения  $\sigma$ .

Подробно описана экспериментальная установка, методы исследования и проведена оценка погрешностей. Основной экспериментальной методикой была скоростная визуализация потока за счёт разницы в показателях преломления жидкостей. Схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 2 а. Поток освещался галогенной лампой, и регистрировался на высокоскоростную цифровую камеру PCO 1200hs с частотой съёмки до 5 кГц. Камера была подключена к инвертированному эпифлуоресцентному микроскопу Axio Observer.Z1 (Carl Zeiss) с набором объективов с увеличением от X5 до X63. Из данных скоростной визуализации были получены средние значения длины, скорости и частоты формирования капель и снарядов, рассчитанные по сериям изображений.

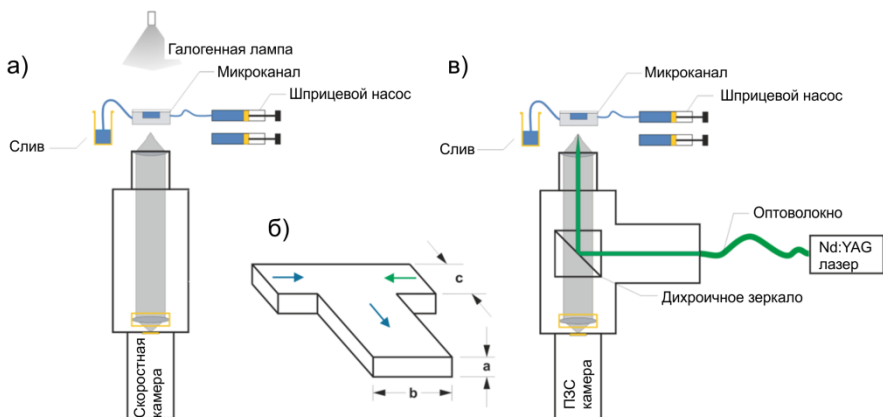


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки: а) установка для скоростной визуализации, б) схема подачи жидкостей в T-образный микроканал, в) установка для micro-PIV/PTV.

Помимо скоростной съёмки межфазной границы, для визуализации структуры течения использовался метод LIF (Laser Induced Fluorescence), основанный на добавлении в поток пассивной примеси – красителя. Использование метода LIF позволило визуализировать вихревые структуры в несущей фазе в случае снарядного режима течения. Флуоресцентный краситель Родамин 6Ж добавлялся в дисперсную фазу, после чего экстрагировался несущей и распределялся по линиям тока. Для регистрации картин распределения Родамина в потоке использовалась конфигурация установки, представленная на Рисунке 2 в, за исключением засветки потока. В этом случае поток освещался ртутной лампой с полосовым светофильтром на выходе, пропускающим в области поглощения флуоресцентного красителя –  $546 \pm 12$  нм. Переизлучённый свет от красителя проходил через второй

полосовой фильтр с диапазоном 575-640 нм и регистрировался камерой IMPERX Bobcat с разрешением 4 МПикс.

Схема экспериментальной установки для micro-PIV/PTV (Particle Image Velocimetry/Particle Tracking Velocimetry) измерений представлена на Рисунке 2 в. Микроканал (Рисунок 2 б) был установлен на столике микроскопа Zeiss Axio Observer.Z1. Измерения полей скорости проводились в центральном сечении канала на разных расстояниях от входа, указанных в описании к полученным результатам. Дисперсная фаза засеивалась флуоресцентными трассерами диаметром 2 мкм и плотностью 1,05 г/см<sup>3</sup>. Плотность засева составляла 0,04% по массе. Поток освещался импульсным Nd:YAG лазером (Рисунок 2 в) с длиной волны 532 нм и энергией в импульсе 20 мДж. Регистрация трассерных картин проводилась с помощью объектива с увеличением 10х и числовой апертурой 0,25 на кросскорреляционную камеру с разрешением матрицы 4 МПикс. Пространственное разрешение составило 0,8 мкм/пиксель. Расчеты полей скорости проводились с помощью программного обеспечения ActualFlow. В главе проведено сравнение измерений методами PIV и PTV для случая микроканальных потоков жидкость-жидкость, сопоставлена глубина измерения, а также разрешение и качество получаемых на выходе векторных полей.

**Третья глава** посвящена результатам исследования влияния отношения вязкостей фаз ( $\lambda = \mu_d/\mu_c$ ) на режимы течения несмешивающихся жидкостей в прямых микроканалах с Т-входом. Для изучения влияния  $\lambda$  на режимы течения и границы перехода между ними было выбрано 7 различных наборов несмешивающихся жидкостей. Системы жидкость-жидкость выбирались таким образом, чтобы исключить либо свести к минимуму влияние таких сторонних параметров, как смачиваемость стенок микроканала, плотность фаз и межфазное натяжение.

В результате проведенных экспериментов были визуализированы режимы течения для всех исследуемых наборов жидкостей в широких диапазонах объёмных расходов несущей ( $0,28 \text{ мкл/мин} < Q_c < 27,8 \text{ мкл/мин}$ ) и дисперсной ( $0,14 \text{ мкл/мин} < Q_d < 556 \text{ мкл/мин}$ ) фаз. В рассмотренном диапазоне параметров можно выделить три основных режима течения – это снарядный, капельный и параллельный (Рисунок 3). Капельный и снарядный режимы являются видами сегментированного течения, которое характеризуется периодическим отрывом и нарушением целостности межфазной границы. Качественно другой вид течения представляет собой параллельный режим, в котором межфазная граница, как и поле скоростей, стационарна, и дисперсная фаза движется параллельно несущей, находясь при этом в контакте с несколькими стенками канала. Как параллельный режим течения, так и

кольцевой и другие подобные режимы принадлежат к классу непрерывных. Для всех наборов жидкостей построены карты режимов. По оси абсцисс откладывались приведённые скорости несущей фазы (касторового масла)  $U_c = Q_c/A$ , здесь  $Q_c$  - объёмный расход несущей фазы,  $A$  - площадь сечения выходного канала.

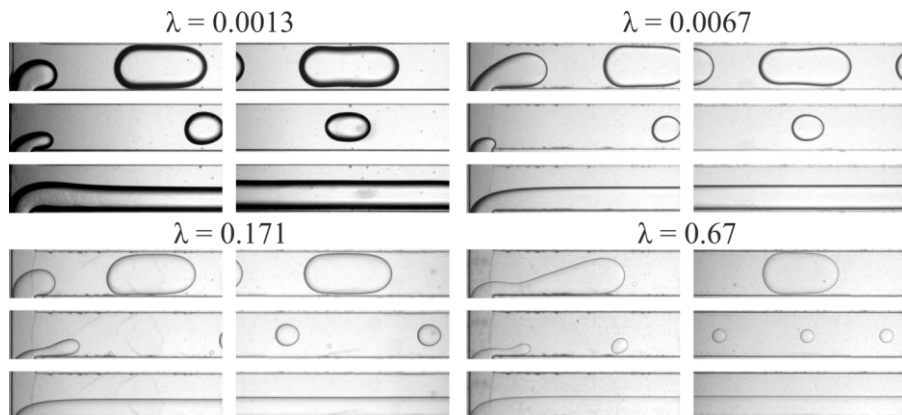


Рисунок 3. Характерные картины основных режимов течения для четырёх различных наборов жидкостей в области формирования и в конце канала на расстоянии 15 мм от Т-области; сверху вниз: снарядный, капельный, параллельный.

По оси ординат откладывались приведённые скорости дисперсной фазы (водоглицериновых растворов)  $U_d = Q_d/A$ . Примеры карт режимов для части наборов жидкостей представлены на Рисунке 4. При малых расходах несущей и дисперсной фаз наблюдался снарядный режим течения, который переходил в капельный режим при высоких среднерасходных скоростях несущей фазы. При высоких скоростях несущей и дисперсной фаз реализовывался параллельный режим течения. При этом граница между параллельным и сегментированным режимами течения для каждого набора жидкостей представляет собой наклонную прямую в логарифмических координатах с положительным угловым коэффициентом, определяемым степенной зависимостью.

При увеличении расхода несущей фазы расход дисперсной фазы, при котором происходит переход в параллельный режим течения, увеличивается. Или же, если говорить об устойчивости параллельного режима, то при фиксированной скорости несущей фазы он теряет устойчивость с уменьшением скорости дисперсной фазы, и для каждого значения  $U_c$  существует минимальное значение  $U_{d\_min}$ , при котором параллельный режим становится неустойчивым.

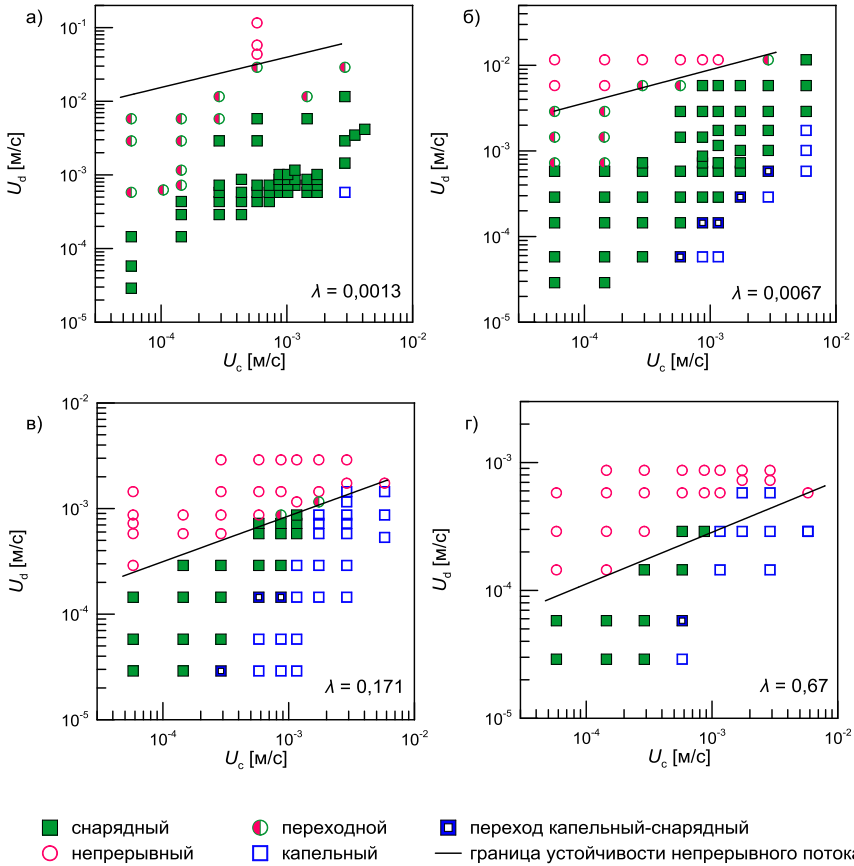


Рисунок 4. Карты режимов для различных наборов жидкостей с  $\lambda < 1$ : а) касторовое масло - вода, б) касторовое масло – 50% водный раствор глицерина, в) касторовое масло – 85% водный раствор глицерина, г) касторовое масло – 95% водный раствор глицерина.

Связь  $U_{d\_min} = f(U_c)$  в общем случае даётся степенным законом. Обнаружено, что граница устойчивости непрерывных режимов, по достижении которых происходит сегментация потока, имеет одинаковый наклон (т.е. одинаковую степень) в пределах погрешности эксперимента для  $\lambda < 1$ . Однако коэффициент различается значительно, на несколько порядков, в соответствии с отношением вязкостей  $\lambda$ . При этом было обнаружено, что для  $\lambda < 1$  и  $\lambda > 1$  в зависимости  $U_{d\_min} = f(U_c)$  значительно различаются степени, а не только коэффициент, что говорит о разных механизмах потери устойчивости параллельного режима.

Различные безразмерные комплексы, предложенные в научной литературе для обобщения карт режимов, были протестированы на полученных экспериментальных данных. Ни один из существующих критериев не дал удовлетворительного совпадения даже для отдельно взятых границ между режимами. Использование полученной обширной базы экспериментальных данных позволило подобрать свободные параметры при степенях в ранее предложенном комплексе  $We^{\alpha} Oh^{\beta}$  ( $We$  – число Вебера,  $Oh$  – число Онезорге). Показано, что при выборе значений для  $\alpha$  и  $\beta$  равными 0,4 и 0,6, соответственно, экспериментальные данные  $\lambda < 1$  ложатся на одну кривую с высокой точностью. Итоговая универсальная кривая для  $\lambda < 1$  описывается следующим уравнением:

$$We_d^{0,4} Oh_d^{0,6} = 0,058 \cdot (We_c^{0,4} Oh_c^{0,6})^{0,4} = 0,058 \cdot We_c^{0,16} Oh_c^{0,24} \quad (1)$$

Проведено сравнение с литературными данными для случаев  $\lambda < 1$  и  $\lambda > 1$ . Было обнаружено, что только часть из имеющихся данных можно обобщить с использованием предложенного параметра, эти данные представлены на Рисунке 5 вместе с универсальной кривой.

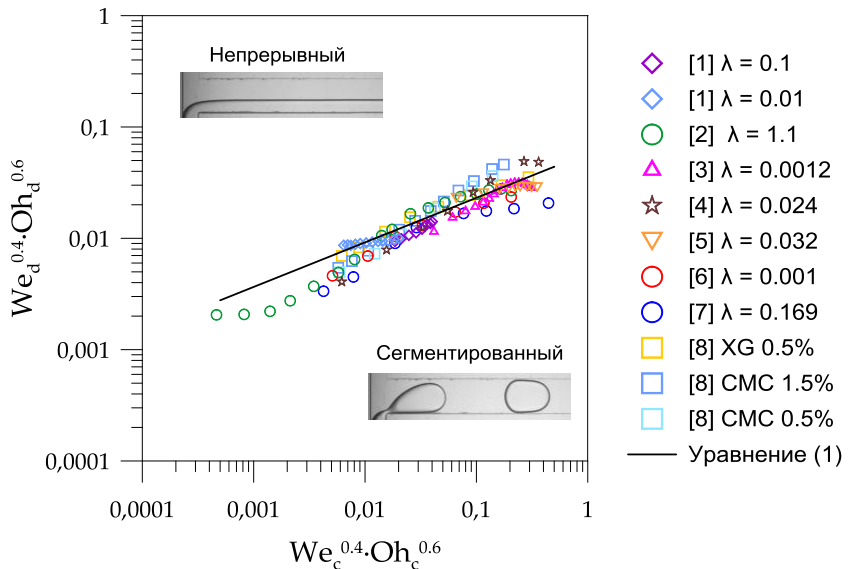


Рисунок 5. Сравнение границ перехода сегментированный поток – непрерывный поток из различных работ в безразмерных обобщающих координатах  $We^{0,4} Oh^{0,6}$  для случая  $\lambda < 1$ , сплошной линией обозначено уравнение (1).

Несмотря на различие экспериментальных установок, геометрии сечений и входов микроканалов, а также возможные погрешности в определении границ

перехода, критерий  $We^{0,4} Oh^{0,6}$  показал удовлетворительный результат. Граница между сегментированным и непрерывным потоком сравнивалась как с работами других авторов [1]–[5], так и с экспериментальными данными, полученными при участии автора, но не использованными при получении обобщающей зависимости [6]–[8]. При этом все данные, которые удалось обобщить, объединяет отношение вязкостей фаз  $\lambda < 1$ . При  $\lambda > 1$  и с дальнейшим его увеличением возникают сильные отклонения от уравнения (1). На основе данного сравнения сформулированы границы применимости критерия. Показано, что в случае  $\lambda < 1$  уравнение (1) работает вне зависимости от свойств жидкостей и геометрии канала пока выполнены следующие условия: каналы остаются в пределах микромасштабов ( $Bo \ll 1$ ), в них нет искривлённых участков с высокими значениями кривизны, отношение глубины к ширине  $H \sim 1$  и нет существенной смачиваемости стенок канала дисперсной фазой (контактный угол смачивания  $\theta_d > 160^\circ$ ).

**Четвёртая глава** представляет собой результаты систематического исследования влияния отношения вязкостей фаз на снарядный режим и его свойства. В рамках диссертации была визуализирована форма поверхности снарядов для различных значений  $\lambda$ . При низких значениях отношения вязкостей  $\lambda \sim 0,001$  были обнаружены существенные деформации межфазной границы. Деформации снарядов наблюдались, начиная с  $\lambda = 0,0067$  и ниже. На Рисунке 6 показан пример изменения контура межфазной границы вниз по потоку для наборов жидкостей с разными  $\lambda$  в одном и том же микроканале при одинаковых приведённых скоростях потока. С увеличением  $\lambda$  деформации уменьшаются и, в конечном счёте, полностью исчезают. В наборах жидкостей с малым отношением вязкостей при достижении определённой критической приведённой скорости потока в снарядном режиме наблюдался срыв микрокапель с хвостовой части снаряда.

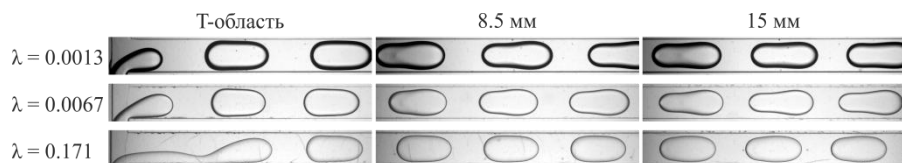


Рисунок 6. Деформация снарядов по длине канала для разных  $\lambda$  при расходах  $Q_c = 2,78$  мкл/мин  $Q_d = 2,78$  мкл/мин.

По результатам визуализации снарядного режима течения были рассчитаны скорости движения снарядов  $U_{\text{plug}}$  и построены зависимости  $U_{\text{plug}}(U_{\text{bulk}})$ , где  $U_{\text{bulk}}$  – суммарная среднерасходная скорость  $U_{\text{bulk}} = U_c + U_d$  (Рисунок 7 а, б). Данные для всех наборов жидкостей, в которых несущая

фаза имела одинаковую вязкость, с хорошей точностью ложатся на один и тот же тренд, что означает полное отсутствие влияния отношения вязкостей  $\lambda$  на скорость снарядов. Этот результат согласуется с тем, что скорость снарядов определяется толщиной плёнки несущей фазы, которая в свою очередь зависит только от числа капиллярности  $Ca_{\text{plug}} = \mu_c U_{\text{plug}}/\sigma$ , и не зависит от вязкости дисперсной фазы и  $\lambda$ .

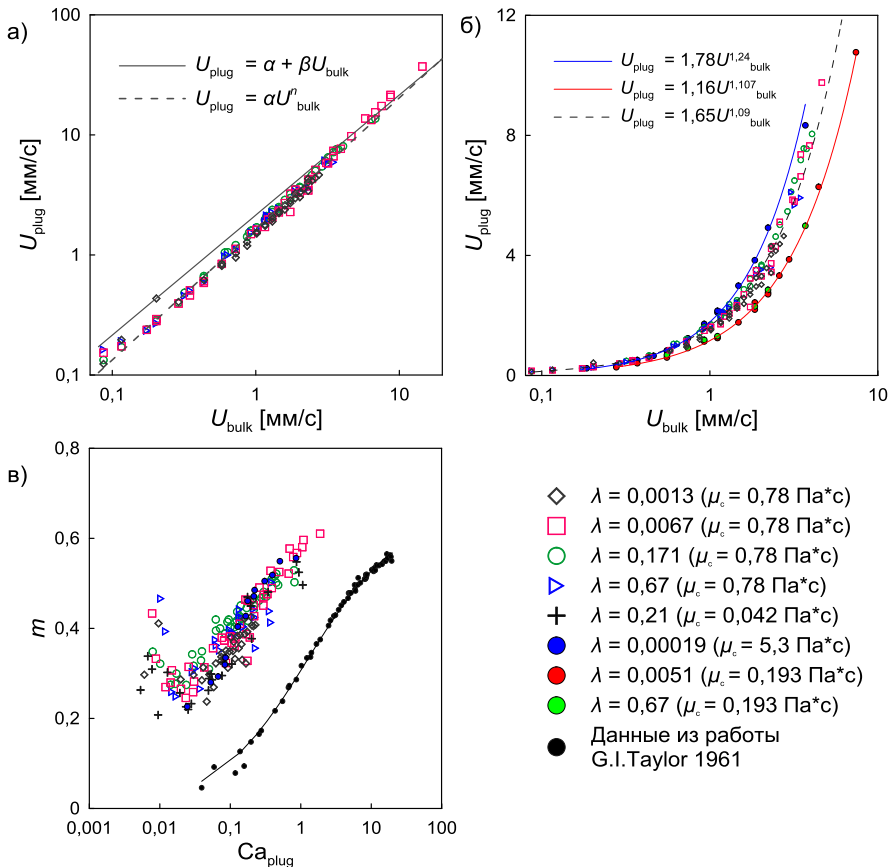


Рисунок 7. Зависимость скорости снарядов от среднерасходной скорости потока при одинаковой несущей фазе, б) сравнение скорости снарядов при несущих фазах разной вязкости, в) зависимость параметра  $m$  от числа капиллярности для разных жидкостей, сравнение с работой [9].

Скорость снарядов с хорошей точностью может быть аппроксимирована степенной зависимостью  $U_{\text{plug}} \sim a(U_{\text{bulk}})^n$ , где  $a$  и  $n$  зависят от свойств жидкостей и геометрии канала. В то же время линейная зависимость даёт

значительно менее точную аппроксимацию. На Рисунке 7 в приведён график зависимости параметра  $m$ ,  $m = (U_{\text{plug}} - U_{\text{bulk}})/U_{\text{plug}}$ , показывающего долю несущей фазы в сечении канала, через которое проходит снаряд, от числа капиллярности, построенного по скорости снаряда  $Ca_{\text{plug}}$ , и его сравнение с результатами из работы G.I. Taylor [9]. При  $Ca_{\text{plug}} > 0,01$  зависимости имеют одинаковый тренд, однако, в текущей работе абсолютные значения  $m$  были значительно выше, что объясняется прямоугольным сечением канала. При малых значениях числа капиллярности  $Ca_{\text{plug}} < 0,01$  обнаружено качественное изменение в режиме обтекания снаряда и зависимости  $m(Ca_{\text{plug}})$ : с уменьшением  $Ca_{\text{plug}}$  значения  $m$  начинают возрастать. В данном случае это не связано с изменением толщины плёнки, а является следствием эффекта ручейков несущей фазы в углах канала, которые движутся быстрее, чем снаряд, и начинают дополнительно ускорять его относительно среднерасходной скорости  $U_{\text{bulk}}$ .

Показано, что длина снарядов в выдавливающем режиме при  $Ca_{\text{plug}} < 10^{-2}$  для всех отношений вязкости хорошо описывается уравнением, предложенным в работе Garstecki et al. [10]. Проведённые эксперименты подтверждают, что длина снарядов в этом режиме полностью определяется механизмом формирования в Т-области, и, если контактные углы смачивания достаточно большие и образования контактной линии при отрыве не происходит, геометрия канала и отношение расходов  $q = Q_d/Q_c$  - единственные управляющие параметры. Экспериментально подтверждён переход от выдавливающего режима к капельному при достижении критических значений числа капиллярности. Данный переход наблюдался при  $Ca_c \approx 0,026$ , что согласуется со значениями из работ De Menech et al. [11] ( $Ca_{\text{crit}} = 0,015$ ) и Liu et al. [12] ( $Ca_{\text{crit}} = 0,018$ ), полученными в численном 2D моделировании. Показано, что в капельном режиме  $\lambda$  начинает влиять на длину снарядов, и  $L_{\text{plug}}$  уменьшается с увеличением  $\lambda$  в соответствии с результатами, полученными в [11], [12].

Для малых чисел капиллярности  $Ca_{\text{plug}}$  и скоростей потока предложена формула оценки частоты формирования капель и снарядов.

$$f_0 = \frac{1}{w} \left( \frac{U_d U_c}{U_d + U_c} \right) = \frac{K}{w} \quad (2)$$

Предложенная оценка была протестирована на различных наборах жидкостей (см. Рисунок 8 а).

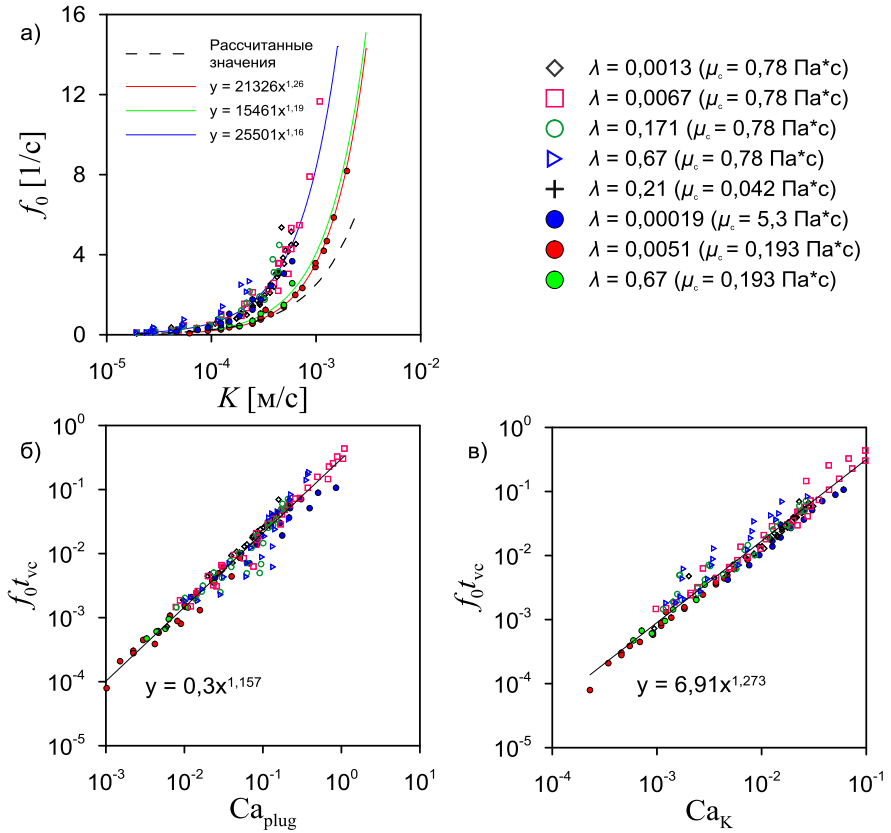


Рисунок 8. Зависимости характерной частоты формирования капель от управляющих параметров.

Показано, что данные хорошо совпадают с оценкой для малых скоростей и невязких жидкостей, то есть для малых чисел капиллярности (см. Рисунок 8 а). Простота выражения (2) делает его удобным для быстрых оценок или расчётов в инженерной практике. Также оно становится точным в случае режима «притертого поршня», упомянутого выше. Проведённый анализ показывает, что приведённая среднерасходная скорость  $K = U_d U_c / (U_d + U_c)$ , является одним из определяющих параметров в снарядном режиме течения наряду с  $U_{plug}$  и  $U_{bulk}$ . На основе числа капиллярности, построенного по  $K$ :  $Ca_K = \mu_c K / \sigma$ , и вязко-капиллярному времени  $t_{vc} = \mu_c D_h / \sigma$ , была получена универсальная зависимость для частоты формирования снарядов  $f_0$ . Такая зависимость имеет место как для  $Ca_K$ , так и для  $Ca_{plug}$  (см. Рисунок 8 б, в).

Было проведено обширное исследование структуры потока внутри дисперсной фазы в снарядном режиме течения. На Рисунке 9 представлены примеры измеренных распределений скорости и завихренности.

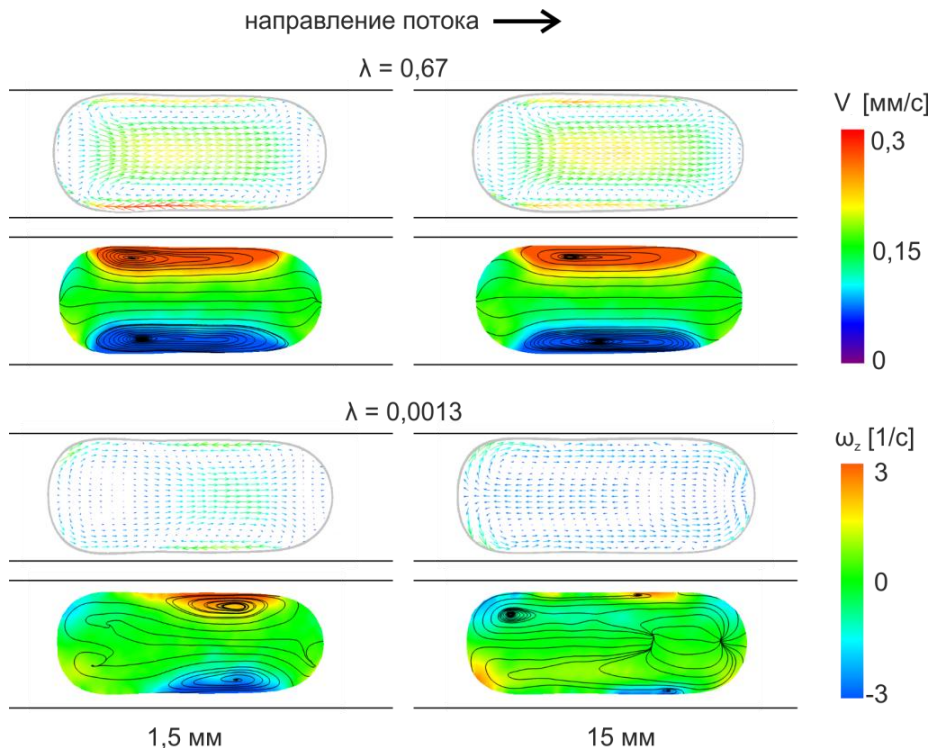
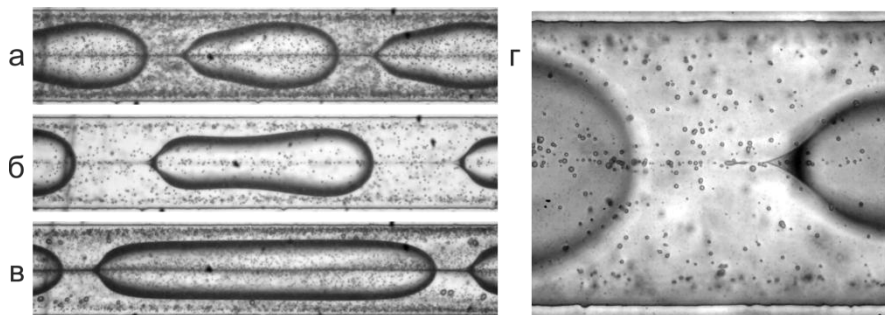


Рисунок 9. Сравнение распределений скорости и полей завихренности в снарядах воды и водных растворах глицерина при расходах фаз  $Q_c = 0,695$  мкл/мин,  $Q_d = 0,695$  мкл/мин.

Показано, что при значениях  $\lambda$  близких к единице структура потока имеет известную форму двух разнонаправленных контуров циркуляции, которые являются сечением тороидального вихря, образующегося внутри снарядов (см. Рисунок 9). При уменьшении отношения вязкостей  $\lambda$  обнаружено, что данный вихрь смещается к переднему мениску снаряда при движении вниз по потоку, а затем распадается тем быстрее, чем меньше вязкость дисперсной фазы. Структура потока при этом перестаёт быть осесимметричной и двумерной, появляется компонента скорости, ортогональная плоскости измерений, на что указывает наличие источника и стока в точках пересечения линий тока.

**Пятая глава** подробно описывает гидродинамику потоков жидкость-жидкость при низких отношениях вязкостей ( $\lambda \sim 10^{-3}$ ) в прямых и серпантинных микроканалах. Показано, что помимо капиллярного числа  $Ca_{\text{bulk}}$ , построенного по среднерасходной скорости потока и вязкости несущей фазы, управляющим параметром для процесса деформации снарядов является отношение расходов  $q = Q_d/Q_c$ . При низких  $q$  и  $Ca_{\text{bulk}}$  форма снаряда представляет собой хорошо известную пулевидную форму Тейлоровских удлиненных пузырей. Однако с увеличением этих параметров граница раздела начинает деформироваться, что приводит к сильным изменениям кривизны поверхности снарядов вниз по потоку. При дальнейшем увеличении  $q$  и  $Ca_{\text{bulk}}$  на всей длине канала наблюдается гантелеобразная форма, и при достижении критических скоростей потока с хвостовой части снарядов отрываются капли или струйки микронного размера (Рисунок 10).



*Рисунок 10. Примеры снарядного режима со срывом микрокапель на расстоянии 15 мм от Т-области: а)  $Q_c = 6$  мкл/мин,  $Q_d = 6$  мкл/мин, б)  $Q_c = 2$  мкл/мин,  $Q_d = 1,5$  мкл/мин, в)  $Q_c = 5$  мкл/мин,  $Q_d = 20$  мкл/мин, г)  $Q_c = 2$  мкл/мин,  $Q_d = 1,5$  мкл/мин при 20-кратном увеличении, фокальная плоскость находится на нижней стенке канала.*

В зависимости от приведенных скоростей потока была получена различная дисперсность, концентрация и размер микрокапель. Во всех проведенных экспериментах образование микрокапель происходило вблизи верхней и нижней стенок канала, что связано с его прямоугольным сечением, глубина которого в данном случае меньше ширины. Обнаружено, что использование  $q$  и  $Ca_{\text{bulk}}$  для построения карты режимов, описывающей образование микрокапель, позволяет обобщить все полученные экспериментальные данные по переходу к режимам с отрывом микрокапель. Соответствующая граница перехода представлена на Рисунке 11. Уравнение границы перехода связывает число капиллярности и отношение расходов следующим соотношением:

$$Ca_{\text{bulk}} \sim \frac{1}{\sqrt{q}} \quad (3)$$

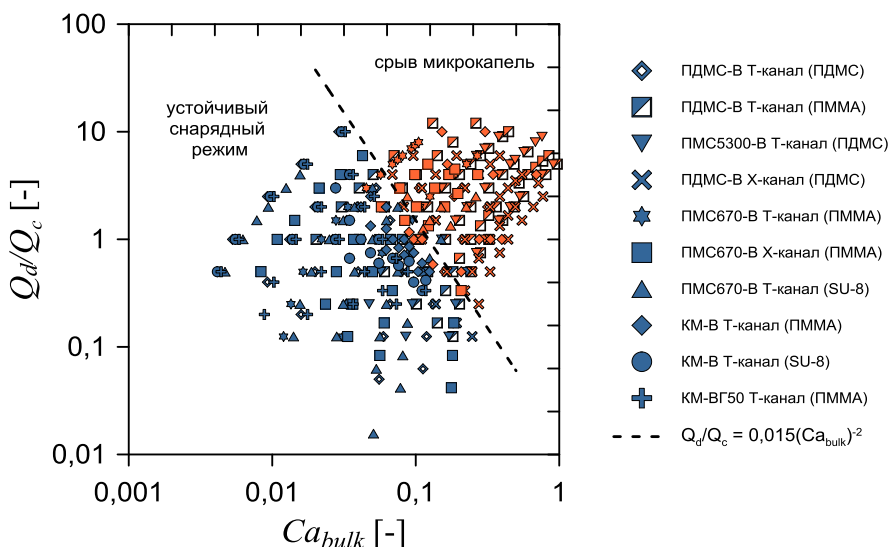


Рисунок 11. Переход между устойчивым снарядным режимом и снарядным режимом с отрывом микрокапель, в легенде указаны наборы жидкостей и в скобках материал микроканала.

Такая зависимость показывает, что как при малых значениях  $q$ , так и при малых  $Ca_{bulk}$  срыв микрокапель невозможен. С целью получения большего количества данных для понимания обнаруженных явлений деформации снарядов и срыва микрокапель, структура потока для отношения вязкостей  $\lambda = 0.0013$  была детально исследована с помощью бесконтактных измерительных методов в прямых и серпантинных микроканалах. В зависимости от значений параметра  $q \cdot Ca_{bulk}$  было выделено три характерных вида структуры потока в прямых каналах. В серпантинных каналах с дугообразными участками разной кривизны показано, что искривленные участки не влияют на переход между параллельным и сегментированным течением. Обнаружены значительные деформации снарядов в искривлённых участках серпантинного канала, которые могут приводить к отрыву лигаментов с хвостовой части снарядов при достижении критического значения параметра  $q \cdot Ca_{bulk}$ .

Для анализа структуры потока внутри снарядов водной фазы были рассчитаны поля завихренности и  $Q$ -критерия на основе полей скорости, измеренных методом PTV и интерполированных на регулярную сетку. Примеры завихренности и полей  $Q$ -критерия в снаряде для прямых и криволинейных участков серпантинных микроканалов с различной кривизной

$\beta = w/R$ , наложенных на визуализацию течения в перемычках, представлены на Рисунке 12.

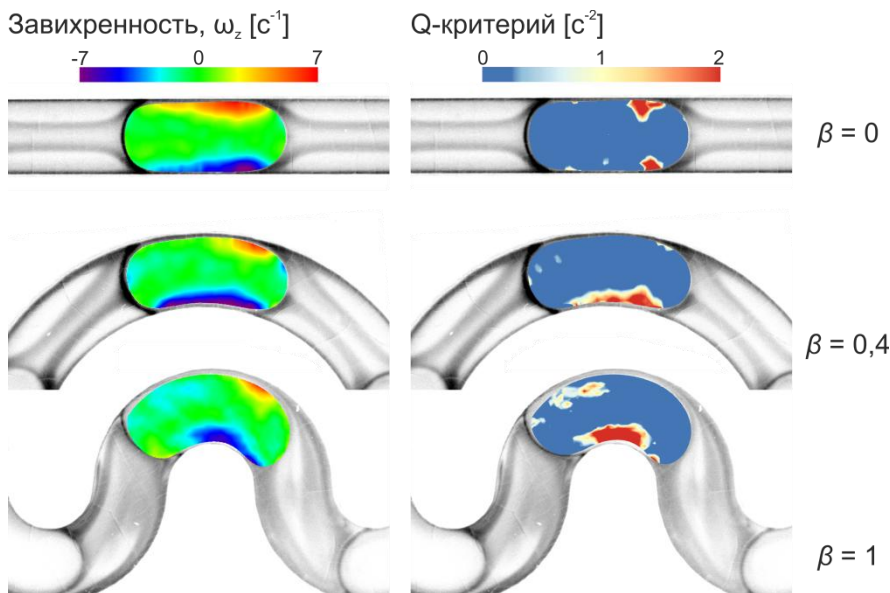


Рисунок 12. Скалярные поля завихренности и  $Q$ -критерия внутри водных снарядов в прямом канале с кривизной  $\beta = 0$  и в изгибах с  $\beta = 0,4$  и  $\beta = 1$  для  $U_c = 0,15$  мм/с,  $U_d = 0,15$  мм/с,  $Ca_{bulk} = 0,014$ .

Выявлено, что увеличение кривизны изогнутых участков микроканала до  $\beta = 1$  может индуцировать дополнительные области циркуляции, как в дисперсной, так и в несущей фазах, а также интенсифицировать перенос вещества через центральную линию канала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние отношения вязкостей дисперсной фазы к несущей  $\lambda = \mu_d/\mu_c$  на микроканальные потоки жидкость-жидкость с изменением  $\lambda$  в пределах  $0,0013 < \lambda < 5,21$ . Построены карты режимов для различных наборов жидкостей в широком диапазоне скоростей потоков. Предложена модификация критерия на основе чисел Вебера и Онезорге –  $We^{0,4}Oh^{0,6}$ , позволяющая описать переход между непрерывным и сегментированным потоками для произвольной системы жидкость-жидкость при  $\lambda < 1$ .

Обнаружена деформация межфазной поверхности снарядов вниз по потоку при низких отношениях вязкости фаз. Показано, что зависимость скорости

снарядов от среднерасходной скорости потока для всех наборов жидкостей может быть аппроксимирована степенной функцией. Установлено влияние отношения вязкостей фаз на длину снарядов в различных режимах формирования.

Показано, что при уменьшении  $\lambda$  структура потока в снарядах переходит от известной формы тороидального вихря к более сложной трёхмерной топологии. Обнаружено, что основным управляющим параметром для характеристик снарядного режима, в том числе при малых  $\lambda$ , является произведение отношения расходов и числа капиллярности, построенного по суммарной среднерасходной скорости,  $q \cdot Ca_{bulk}$ .

Впервые экспериментально зарегистрирован срыв микрокапель с задней кромки снарядов для случая малых отношений вязкостей за счёт сдвиговых напряжений по механизму «tip-streaming» даже при отсутствии ПАВ. Построены карты режимов, в которых переход к снарядному режиму течения с отрывом микрокапель описывается законом  $Ca_{bulk} \sim 1/q^{0.5}$ .

Установлено, что искривленные участки микроканала не влияют на переход между параллельным и сегментированным течением в случае потоков жидкость-жидкость с низкими значениями  $\lambda$ . Обнаружен отрыв лигаметов с хвостовой части снарядов в искривлённых участках каналов. Выявлено, что уменьшение радиуса кривизны серпантинного канала может индуцировать дополнительные области циркуляции, как в снарядах дисперсной, так и в перемычках несущей фазы, а также интенсифицировать перенос вещества через центральную линию канала.

### **Основное содержание диссертации изложено в следующих рецензируемых работах из перечня ВАК:**

Kovalev A., Yagodnitsyna A., Bilsky A. Plug flow of immiscible liquids with low viscosity ratio in serpentine microchannels // Chem. Eng. J. – 2021. – Vol. 417. – P. 127933.

Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V. Viscosity Ratio Influence on Liquid-Liquid Flow in a T-shaped Microchannel // Chem. Eng. Technol. – 2021. – Vol. 44, № 2. – P. 365–370.

Ковалев А.В., Ягодницына А.А., Бильский А.В. Определение границы перехода между сегментированными и непрерывными режимами течения в микроканальных потоках жидкость – жидкость на основе критериев подобия // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28, № 6. – С. 871–877.

Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V., Bilsky A.V. Ionic liquid-water flow in T-shaped microchannels with different aspect ratios // Chem. Eng. Res. Des. – 2020. – Vol. 153. – P. 391–400.

Minakov A.V., Shebeleva, A.A., Yagodnitsyna, A.A., Kovalev, A.V., Bilsky, A.V. Flow Regimes of Viscous Immiscible Liquids in T-Type Microchannels // *Chem. Eng. Technol.* – 2019. – Vol. 42, № 5. – P. 1037–1044.

Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V. Flow hydrodynamics of immiscible liquids with low viscosity ratio in a rectangular microchannel with T-junction // *Chem. Eng. J.* – 2018. – Vol. 352. – P. 120–132.

Kovalev A.V., Yagodnitsyna A.A., Bilsky A.V. Micro-PTV technique application to velocity field measurements in immiscible liquid-liquid plug flow in microchannels // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – Vol. 1421, № 1.

Yagodnitsyna A.A., Kovalev A.V., Bilsky A.V. Experimental study of ionic liquid-water flow in T-shaped microchannels with different aspect ratios // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2017. – Vol. 899, № 3.

### Цитированная литература:

- [1] J. D. Wehking, M. Gabany, L. Chew, and R. Kumar, *Microfluid. Nanofluidics* **2014**, 16 (3), 441–453. DOI: 10.1007/s10404-013-1239-0
- [2] Y. Zhao, G. Chen, and Q. Yuan, *AIChE J.* **2006**, 52 (12), 4052–4060
- [3] H. Foroughi and M. Kawaji, *Int. J. Multiph. Flow* **2011**, 37 (9), 1147–1155. DOI: DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.06.004
- [4] D. Tsaoulidis, V. Dore, P. Angeli, N. V. Plechkova, and K. R. Seddon, *Int. J. Multiph. Flow* **2013**, 54, 1–10. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.02.002
- [5] A. Salim, M. Fourar, J. Pironon, and J. Sausse, *Can. J. Chem. Eng.* **2008**, 86 (6), 978–988. DOI: 10.1002/cjce.20108
- [6] A. A. Yagodnitsyna, A. V. Kovalev, and A. V. Bilsky, *Chem. Eng. J.* **2016**, 303, 547–554. DOI: 10.1016/j.cej.2016.06.023
- [7] A. V. Kovalev, A. A. Yagodnitsyna, and A. V. Bilsky, *Chem. Eng. J.* **2018**, 352, 120–132. DOI: 10.1016/j.cej.2018.07.013
- [8] A. Yagodnitsyna, A. Kovalev, and A. Bilsky, *Micromachines* **2021**, 1–14
- [9] G. I. Taylor, *J. Fluid Mech.* **1961**, 10 (2), 161–165. DOI: 10.1017/S0022112061000159
- [10] P. Garstecki, M. J. Fuerstman, H. a Stone, and G. M. Whitesides, *Lab Chip* **2006**, 6 (3), 437–446. DOI: 10.1039/b510841a
- [11] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse, and H. A. Stone, *J. Fluid Mech.* **2008**, 595, 141–161. DOI: 10.1017/S002211200700910X
- [12] H. Liu and Y. Zhang, *J. Appl. Phys.* **2009**, 106 (3). DOI: 10.1063/1.3187831

Подписано к печати 31.10.2022г. Заказ №56  
Формат 60х84/16. Объем 1.0 уч.-изд.л. Тираж 100 экз.

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