



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
Академик Д.М. Маркович

«18» апреля 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)**

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Влияние вязкости фаз на гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения» выполнена Ковалевым А.В. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В 2017 году Ковалеву А.В. присуждена степень магистра в Новосибирском национальном исследовательском государственном университете, диплом магистра с отличием 105424 1477816. В 2021 году Ковалев А.В. там же окончил аспирантуру по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время Ковалев А.В. работает младшим научным сотрудником в Лаборатории процессов переноса в многофазных системах ИТ СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

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 теплоотвода.

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 и т.д.; 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, например, 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 необходимые 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 вязкостей, а также особенности влияния геометрических параметров, такие как наличие дугообразных участков канала с высокой кривизной. Необходимость интенсификации процессов теплообмена 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 и т.д.), их частоту срыва и скорости движения в потоке, толщину плёнки несущей фазы.

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 основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

Проведено комплексное экспериментальное исследование структуры потока и режимов течения с использованием современных оптических методов измерения $\mu\text{icro-PIV/PTV}$ 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 др.) и непрерывными (параллельный, кольцевой, ручейковый и др.) режимами на случай жидкостей с различными физическими свойствами, определены пределы применимости обобщения по отношению вязкостей 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 даже 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 даже 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 микро и наночастиц 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.

Степень достоверности результатов:

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 также подтверждает достоверность представленных результатов. Все представленные результаты прошли этап рецензирования и опубликованы в ведущих мировых изданиях.

На защиту выносятся:

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 приборах 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 приборном 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 приборов, соответствующие карты режимов.

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 проектирование экспериментального стенда и микроканальных участков.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Kovalev A., Yagodnitsyna A., Bilsky A. Plug flow of immiscible liquids with low viscosity ratio in serpentine microchannels // Chemical Engineering Journal. – 2021. – V. 417. – P. 127933.
2. Kovalev A., Yagodnitsyna A., Bilsky A. Flow hydrodynamics of immiscible liquids with low viscosity ratio in a rectangular microchannel with T-junction // Chemical Engineering Journal. – 2018. – V.352. – P.120–132.

3. Yagodnitsyna A., Kovalev A., Bilsky A. Ionic liquid-water flow in T-shaped microchannels with different aspect ratios // *Chemical Engineering Research & Design*. – 2020. – V. 153. – P. 391-400.
4. Kovalev A., Yagodnitsyna A., Bilsky A. Viscosity Ratio Influence on Liquid-Liquid Flow in a T-shaped Microchannel // *Chemical Engineering & Technology*. – 2021. – V. 44. – №. 2. – P. 365-370.
5. Minakov A., Shebeleva A., Yagodnitsyna A., Kovalev A., Bilsky A. Flow Regimes of Viscous Immiscible Liquids in T-Type Microchannels // *Chemical Engineering & Technology*. – 2019. – V. 42. – №. 5.
6. 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. 871-878.
7. 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*. – 2020. – V. 1421. – №. 1.
8. 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. – V. 899. – №. 3.

Апробация работы:

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 гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2018, 2020); 55-я Международная научная студенческая конференция МНСК-2017 (Новосибирск, 2017);

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

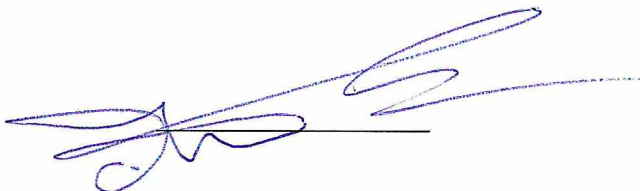
Диссертация Ковалева А.В., посвященная экспериментальному исследованию влияния вязкостей фаз на течения жидкость-жидкость в микроканалах прямоугольного сечения, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» для физико-математических наук.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Влияние вязкости на гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения» Ковалева Александра Владиславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании секции 1 «Теплофизика и гидрогазодинамика многофазных и многокомпонентных систем (включая фазовые переходы, волновые явления и акустику)» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством руководителя секции члена-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В качестве замечаний высказано: описать для каждого члена в модели массообмена соответствующий механизм массоотдачи, обсудить и сопоставить соответствие режимов течения для больших каналов, миниканалов и микроканалов, четко конкретизировать выводы по работе.

На заседании присутствовало 25 человек, в том числе 2 члена-корреспондента РАН, 11 докторов наук, 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 16 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 2 от 15 апреля 2022 года.



Председатель семинара

Павленко Александр Николаевич, чл. -корр. РАН,
д.ф.-м.н., заведующий лабораторией
низкотемпературной теплофизики ИТ СО РАН



Секретарь семинара

Пахомов Максим Александрович, д.ф.-м.н., проф.
РАН, ведущий научный сотрудник ИТ СО РАН