



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

Академик Д.М. Маркович

«10» марта 2025 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 «Экспериментальное исследование двухфазных течений в плоских микроканалах» выполнена Дементьевым Юрием Анатольевичем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН).

В 2020 году Дементьеву Ю.А. присуждена степень магистра в «Новосибирском национальном исследовательском государственном университете», диплом магистра 105424 4016142. В 2024 году Дементьев Ю.А. там же окончил аспирантуру по специальности 03.06.01 «Физика и астрономия» с направленностью образовательной программы «Механика жидкости, газа и плазмы», диплом 105424 0829429. В настоящее время Дементьев Ю.А. работает младшим научным сотрудником в ИТ СО РАН, лаборатории 6.5 Энергоэффективных технологий для наземных и космических применений.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. На протяжении более чем двух десятилетий наблюдается активный рост числа исследовательских работ, посвящённых течению двухфазного потока и теплообмену в микроканалах, благодаря ряду преимуществ по сравнению с каналами большого размера. С уменьшением характерного размера канала отношение эффективной площади поверхности к занимаемому объёму увеличивается, что делает применение микроканалов перспективным для процессов тепло- и массообмена. В связи с этим, микроканалы уже нашли своё применение в теплообменных системах, таких как

микроканальные теплообменники, тепловые трубки, испарительно-конденсационные системы термостабилизации и другие. Кроме того, они широко используются в микрофлюидных и медицинских системах для решения задач, таких как эффективное перемешивание жидкостей, анализ крови, доставка лекарств, проведение биохимических реакций, генерация монодисперсных капель и других приложений.

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

В связи с этим актуальным является проведение экспериментальных исследований газожидкостных течений в плоских микроканалах с большим соотношением сторон как без подвода тепла, так и в случае локального нагрева; определение режимов течения и их особенностей в зависимости от физических свойств рабочих жидкостей, построение карт

на их основе, а также измерение перепада давления в каналах и определение факторов, влияющих на него.

Цель работы:

Целью настоящей диссертации является экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена двухфазных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот от 10 до 55 мкм (шириной 10 мм) и выявление новых закономерностей двухфазных течений.

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

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

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

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

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

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

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

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

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

зоне несжимаемого течения и существенное влияние сжимаемости газовой фазы на границы режимов течений.

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

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

Научная и практическая значимость работы:

Научная и практическая значимость работы связана с получением новых закономерностей газожидкостных течений на масштабе от 10 до 55 микрон и представляет собой новые экспериментальные данные о характерных особенностях режимов двухфазных газожидкостных течений, а также особенностях эволюции перепада давления. Модифицированная в данной работе модель раздельного течения может стать основой для обобщения большого объёма данных по перепаду давления в микроканалах различной геометрии, представленных в литературе, и разработке универсальных корреляции для предсказания двухфазного перепада давления на трение в газожидкостных течениях в условиях микромасштаба. Разработанная корреляция позволит предсказывать двухфазный перепад давления в плоских микроканалах, что может быть использовано при разработке микроканальных систем охлаждения. Полученные в работе данные могут быть применены при разработке новых микроэлектромеханических систем (МЭМС), микроканальных систем охлаждения, микротеплообменниках, для оптимизации работы охлаждающих устройств с использованием двухфазного теплоносителя, а также для микрофлюидных устройств.

Оптический шлирен-метод визуализации с использованием цветной видеосъёмки обеспечивает полную информацию о распределении жидкости и газа в канале, что

является критически важным для эффективного перемешивания компонентов при биокаталитических и других медицинских реакциях.

Степень достоверности результатов:

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

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментального исследования режимов и особенностей двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот 10-55 мкм, а также анализа и обобщения карт режимов течений в безразмерных координатах.
- Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах диапазоне высот 10-55 мкм, в том числе, в условиях локального нагрева.
- Результаты модификации модели раздельного течения для предсказания двухфазного перепада давления в микроканалах с учётом сжимаемости газовой фазы и разработки обобщающей корреляции параметра межфазного взаимодействия в плоских микроканалах в диапазоне высот 10-55 мкм в рамках модифицированной модели.

Личный вклад автора:

Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад автора состоял в проектировании и сборке экспериментальных установок и рабочих участков, подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, калибровке и настройке оборудования, обработке и анализе результатов, подготовке публикаций в рецензируемые журналы и докладов на российские и зарубежные конференции. Постановка задач исследования, основные методы исследования сформулированы руководителем диссертационной работы, д.ф.-м.н. Чинновым Евгением Анатольевичем.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях (из перечня ВАК):

1. Dementyev Y. A., Vozhakov I.S., Degtyarev S.A., Chashina M.S., Chinnov E.A. Modification of the Lockhart-Martinelli model for prediction two-phase frictional pressure drop in microchannels taking into account gas quasi-compressibility effect // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2025. – Vol. 240. – P. 126605.
2. Dementyev Y. A., Chinnov E.A., Kochkin D.Y., Ronshin F. V., Evstrapov A.A., Gusev V.S., Kabov O.A. An experimental investigation of adiabatic two-phase flow patterns in a slit microchannel with 1: 800 aspect ratio // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2024. – Vol. 154. – P. 111153.
3. Ronshin F. V., Dementyev Y. A., Chinnov E. A. Experimental study of two-phase flow regimes in slit microchannels //Microfluidics and Nanofluidics. – 2023. – Т. 27. – №. 4. – С. 24.
4. Dementyev Y., Chinnov, E., Ronshin, F., Evstrapov, A., Gusev, V. Two-phase flow patterns investigation in large aspect ratio microchannel with T-mixer //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 459. – С. 04005.
5. Dementyev Y. A., Chinnov, E. A., Ronshin, F. V., Evstrapov, A. A., Gusev, V. S., Karpich, S. S., Kabov, O. A. An experimental investigation of two-phase gas-liquid flow patterns in extremely small gap microchannel // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2023. – Vol. 11. – No. 2.
6. Ronshin F. V., Dementyev Y.A., Kochkin D.Yu., Chinnov E.A. Effect of channel height on performance of two-phase flow in mini-and microchannels with a T-mixer //Thermophysics and Aeromechanics. – 2022. – Т. 29. – №. 5. – С. 771-784.
7. Dementyev Y. A. et al. Experimental investigation of water-nitrogen flow in microchannel with high aspect ratio (with the 20 μm gap) //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2119. – №. 1. – С. 012070.
8. Ronshin F. V., Dementyev Y. A. Influence of Liquid Properties on Gas-Liquid Flow Regimes and Pressure Drop in a Flat Microchannel //Journal of Engineering Thermophysics. – 2021. – Т. 30. – №. 4. – С. 661-671.
9. Роньшин Ф. В., Чиннов Е.А., Дементьев Ю.А., Кабов О.А. Мостиковый режим течения в микроканалах //Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 499. – №. 1. – С. 43-47.

10. Dementyev Y. A., Ronshin F. V., Chinnov E. A. Void fraction of nitrogen-water flow in flat microchannels //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – T. 1867. – №. 1. – C. 012037.
11. Ronshin F., Dementyev Y., Chinnov E. Experimental study of heat transfer in two-phase flow regimes in rectangular microchannel //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – T. 1677. – №. 1. – C. 012151.
12. Ronshin F. V., Dementyev Y. A., Vozhakov I. S. Waves in Liquid Film Regimes of Adiabatic Two-Phase Flow in a Slit Microchannel //Journal of Engineering Thermophysics. – 2020. – T. 29. – №. 4. – C. 592-599.
13. Dementyev Y., Ronshin F. Determination of void fraction of two-phase flow in slit microchannel //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – T. 2212. – №. 1. – C. 020015.
14. Роньшин Ф. В., Дементьев Ю. А., Чиннов Е. А. Формирование и деформация капель жидкости в микроканалах //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 15. – С. 18-21.
15. Ronshin F. V., Dementyev Y.A., Chinnov E.A., Cheverda V.V., Kabov O.A. Experimental investigation of adiabatic gas-liquid flow regimes and pressure drop in slit microchannel // Microgravity Science and Technology. – 2019. – Vol. 31. – P. 693-707.

Апробация работы:

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

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

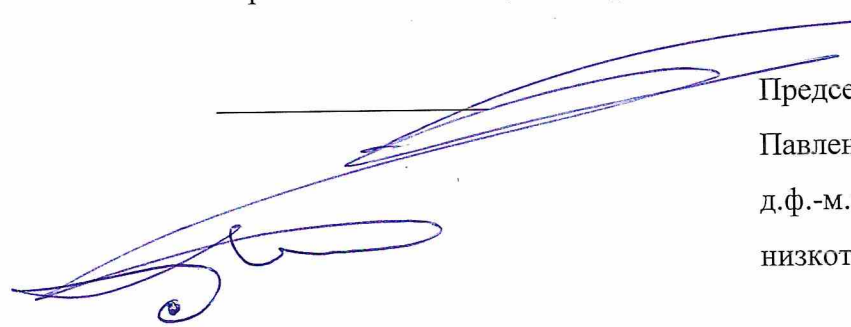
Диссертация Дементьева Ю.А., посвященная экспериментальному исследованию двухфазных течений в плоских микроканалах в диапазоне высот 10-55 мкм, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – “Механика жидкости, газа и плазмы” для физико-математических наук по направлениям исследований п. 7. «Течения многофазных сред» и п. 24. «Микро- и наногидродинамика».

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Экспериментальное исследование двухфазных течений в плоских микроканалах» Дементьева Юрия Анатольевича 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 член-корреспондента РАН А.Н. Павленко. В качестве замечаний рекомендовано показать механизм снижения перепада давления с увеличением плотности теплового потока в микроканале, завершить модификацию модели раздельного течения обобщающей корреляцией для предсказания двухфазного перепада давления в исследуемом диапазоне высот микроканалов и конкретизировать выводы по работе.

Присутствовало на заседании 25 человек, в том числе 2 член-корреспондента РАН, 11 докторов наук, 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» – 16 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек. Протокол № 1 от 4 февраля 2025 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