

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Дементьева Юрия Анатольевича

«Экспериментальное исследование двухфазных течений в плоских микроканалах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация Дементьева Юрия Анатольевича посвящена экспериментальному изучению двухфазных газожидкостных течений в плоских микроканалах высотой 10 – 55 мкм и ориентирована на получение новых данных о структуре двухфазных потоков и их гидравлическом сопротивлении, в том числе в условиях локального нагрева.

Актуальность темы обусловлена комплексом фундаментальных и прикладных факторов. Востребованность микроканальных технологий связана с их широким применением в современных и перспективных устройствах микроэлектроники, энергетики, химической технологии и биомедицины, где ключевым преимуществом микрофлюидных систем является высокое отношение площади поверхности к объему, радикально интенсифицирующее процессы тепло- и массообмена. Для оптимизации двухфазных систем, работающих в режиме кипения или испарения, необходимо глубокое понимание взаимосвязи между морфологией двухфазного потока, теплопереносом и перепадом давления именно в коротких плоских каналах, геометрия которых соответствует реальным тепловыделяющим элементам микрочипов. Это делает результаты диссертационной работы **практически значимыми**, а выявленные закономерности и разработанные корреляции применимыми при разработке дизайна и выборе режима использования микрофлюидных платформ и систем охлаждения с микроканалами прямоугольного поперечного сечения с высотой до 55 мкм.

Теоретическая значимость работы определяется необходимостью изучения физических явлений, возникающих при переходе к микромасштабу, где радикально меняется баланс действующих сил, что приводит к появлению специфических, не наблюдаемых в макроканалах, режимов течения и гидродинамических неустойчивостей. Особенно сложной задачей становится прогнозирование гидравлического сопротивления, которое в микросистемах резко возрастает и напрямую определяет энергозатраты на прокачку теплоносителя, при этом существующие модели, разработанные для макромасштаба, часто оказываются неприменимы. Несмотря на обширный массив работ по двухфазным течениям в круглых и квадратных микроканалах, область плоских каналов с большим соотношением сторон высотой менее 100 мкм оставалась слабо исследованной.

Научная новизна работы заключается в первом комплексном экспериментальном исследовании особенностей двухфазных (жидкость/газ) течений в плоских микроканалах высотой 10 - 55 мкм. Выявлена и описана модифицированная неустойчивость Саффмана–Тейлора капиллярно-модуляционной природы. На этой основе предложена новая классификация режимов, построены обобщенные режимные карты и установлены специфические особенности течений (отсутствие пузырькового режима, новая разновидность струйного режима). Впервые детально проанализирован и разделен вклад сжимаемости газовой фазы и межфазного взаимодействия в гидравлическое сопротивление. Это позволило модифицировать классическую модель раздельного течения Локхарта–Мартинелли для корректного учета квазисжимаемости газа в микроканалах и разработать на ее основе новую корреляцию для параметра межфазного взаимодействия, обеспечивающую прогнозирование двухфазного перепада давления для исследуемых каналов со средним абсолютным отклонением 12%. Впервые для плоских микроканалов изучено влияние плотности теплового потока при локальном нагреве на перепад давления и выявлены механизмы его изменения, связанные с динамикой пленок и осушением стенок. Таким образом, научная новизна носит комплексный характер, включающий создание нового экспериментального инструментария, получение новых фундаментальных знаний о физике процессов и развитие методов инженерного расчета.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов. Все исследования реализованы с использованием современного экспериментального оборудования и высокоточных методов визуализации течений (высокоскоростная съёмка, шпирен-методика). Выполнен тщательный анализ результатов, показана хорошая воспроизводимость данных и согласованность с известными теориями. Достоверность результатов диссертационной работы также обусловлена наличием публикаций в рецензируемых научных журналах и представлением на ведущих российских и зарубежных конференциях.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем работы составляет 111 страниц с 56 рисунками и 12 таблицами. Список литературы содержит 104 наименования.

Во введении приведено обоснование актуальности тематики исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость работы и личный вклад соискателя, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет обстоятельный обзор исследований двухфазных течений, включая классификацию каналов по размерам, анализ режимов течения в трубах, мини- и микроканалах различной геометрии, а также обсуждение механизма

неустойчивостей и закономерностей перепада давления в однофазных и двухфазных потоках. Систематизация известных данных позволяет обосновать постановку задач исследования и выделить незакрытые проблемы в области гидродинамики плоских микроканалов высотой менее 55 мкм.

Вторая глава содержит подробное описание экспериментальных установок, технологий изготовления микроканалов, метрологического обеспечения и методик визуализации потоков (высокоскоростная съемка, шпирен-методика), подходов к определению высоты микроканалов и оценки неопределённостей измерений. Особого внимания заслуживает применение комплекса современных микрофлюидных технологий (фотолитография, жидкостного и плазмо-химического травления, термоанодная сварка, УФ-склейка), а также комплексная характеристика поверхностей изготовленных микроканалов. Представленные технические решения демонстрируют высокий уровень экспериментальной культуры и детальную проработку измерительных процедур

Третья глава диссертации посвящена детальному исследованию структур и режимов двухфазных газожидкостных течений в трех вариантах плоских микроканалов. Основное внимание уделено визуализации и классификации режимов течения, возникающих при различных сочетаниях расходов газа и жидкости. Автор систематически описывает последовательность формирования струйных, пузырьковых, мостиковых, сегментированных и пленочных структур, анализирует их устойчивость, динамику межфазной границы и условия переходов между режимами. Описаны критерии детекции переходов между режимами. Важной частью главы является построение карт режимов в сравнении с микроканалами большей высоты. Приведены наблюдения о специфических особенностях течения, характерных именно для микрометровых каналов: значимая роль смачивания, доминирование капиллярных эффектов, изменение структуры при малых вариациях параметров. Полученные результаты обеспечивают расширенное понимание механизмов формирования двухфазных потоков в микроканалах и формируют экспериментальную основу для дальнейшего анализа гидравлического сопротивления.

В четвертой главе представлен анализ гидравлического сопротивления и особенностей изменения перепада давления в однофазных и двухфазных газожидкостных течениях в микроканалах, рассмотренных в предыдущей главе. Основное внимание уделено количественному описанию потерь давления для различных режимов течения, а также установлению связей между наблюдаемой структурой потока, свойствами межфазной границы и характером сопротивления. Проведена серия измерений перепада давления при варьировании расходов газа и жидкости и высоты микроканала. Проведен анализ параметра межфазного взаимодействия, модифицирована модель Локхарта–

Мартинелли с учётом сжимаемости газовой фазы, предложена новая корреляция для прогнозирования двухфазного перепада давления на трение в исследуемой группе каналов со среднеабсолютным отклонением, не превышающим 12 %.. Также исследовано влияние локального нагрева на гидравлическое сопротивление при изменении массовой скорости газа. Результаты главы формируют базу для разработки уточненных методов расчета газожидкостных течений в микроканалах и подтверждают необходимость пересмотра классических моделей сопротивления для микроразмерных систем.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Достоверность полученных результатов обоснована применением современных высокоточных методов измерений и визуализации (высокоскоростная съёмка, шпирен-методика), проведением калибровок, анализом неопределённостей, повторяемостью данных, публикацией результатов в ведущих рецензируемых научных журналах, включая публикации из первого квартиля и отметкой работы призовыми местами на ведущих российских и зарубежных конференциях.

В автореферате представлено краткое содержание глав диссертации, основные результаты. Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Несмотря на высокий уровень работы и обширный объем экспериментальных исследований, в тексте диссертации можно выделить следующие замечания:

1. В работе приведен обширный обзор исследований течений в мини- и микроканалах, однако он опирается главным образом на публикации давностью более 5 лет, тогда как современные исследования (последние 3–5 лет) представлены лишь единичными источниками (в списке литературы приведено только 3,8% работ, опубликованных после 2020 г.). Включение более актуальных публикаций позволило бы точнее отразить текущее состояние научных представлений и повысило бы информативность аналитической части.
2. В работе используются две различные конструкции и технологии изготовления микроканалов: два канала высотой 17,5 и 29,3 мкм выполнены травлением в кремниевой подложке, тогда как канал высотой 51,2 мкм полностью вытравлен в боросиликатном стекле. Такое различие в технологиях и материалах осложняет сопоставимость результатов. Возможно, для серии экспериментов без нагрева целесообразно было бы изготовить канал высотой 51,2 мкм также с использованием кремниевой подложки, что позволило бы унифицировать геометрию и поверхностные свойства образцов.

3. В тексте приведена фраза «и вытравленным с помощью фотолитографии.... микроканалом», не совсем ясно, что именно имелось в виду. С помощью фотолитографии сделана маска для травления канала? В тексте не представлен состав раствора, применяемого для травления боросиликатного стекла при изготовлении микроканала высотой 51,2 мкм, а также не указаны полученные характерные углы наклона боковых стенок образующегося канала.
4. Вызывает вопросы выбор диапазонов расходов газовой и жидкой фаз: хотя они обоснованы техническими возможностями установки, было бы полезно подробнее аргументировать их связь с реальными условиями эксплуатации микроканальных устройств, особенно если рассматривать потенциальные практические приложения.
5. На рисунке 3.10 представлены карты режимов течений в пространстве параметров массовых скоростей фаз. В тексте не приведен анализ отличий режимных карт для микроканала высотой 17,5 мкм в зависимости от характеристик жидкой фазы. В частности, для 40%(м) водно-спиртового раствора характер возникновения струйного режима при низких массовых скоростях газа существенно отличается.
6. Разработанная корреляция для параметра межфазного взаимодействия S основана на данных для трёх микроканалов высотой 17,5, 29,3 и 51,2 мкм. Насколько она может быть применима для микроканалов близких, но не идентичных геометрий (например, при другом соотношении сторон)? Планируется ли валидация модели на независимых экспериментальных данных из литературы?
7. Исследование влияния увеличения плотности теплового потока на перепад давления парогазожидкостных течений проведено только для одного канала высотой 51,2 мкм и одной комбинации жидкость/газ. Достаточно ли этого для формулировки общих закономерностей?
8. Текст диссертации не лишен опечаток (стр. 13, 28, 31, 45, 56, 75, 82) и некоторых неточностей (метод лежащей капли).

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость представленной работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована и проиллюстрирована.

На основании изложенного считаю, что диссертация Дементьева Юрия Анатольевича отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых

степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в действующей редакции), а его автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной
физики ФТИ, в.н.с. ФГБОУ ВО
«Уфимский университет науки и
технологий»,

 /Солнышкина О.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Почтовый адрес организации: 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32

Эл. почта: rector@uust.ru

Телефон: + 7 (347) 229-96-16, +7 (347) 272-63-70

Я, Солнышкина Ольга Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Дементьева Юрия Анатольевича, и их дальнейшую обработку.

