

Отзыв официального оппонента на диссертацию

Роньшина Федора Валерьевича

«Двухфазные течения в коротких прямоугольных микроканалах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность исследования. Диссертация Роньшина Федора Валерьевича посвящена решению одной из актуальных проблем современной науки и техники, связанной с разработкой миниатюрных высокоэффективных систем охлаждения для сильноточной микроэлектроники, микропроцессоров, оптоэлектронных модулей, детекторов частиц в физике высоких энергий и многого другого. В последние годы все больший интерес вызывают системы охлаждения с использованием плоских (щелевидных) коротких микроканалов, которые за счет увеличения площади отводящей поверхности при уменьшении толщины зазора позволяют обеспечить высокую интенсивность теплоотвода. Однако, для создания таких систем крайне важно понимание динамики газожидкостного потока и умение прогнозировать оптимальные режимы течения. Опубликованные на сегодняшний день результаты экспериментальных исследований в плоских каналах немногочисленны и ограничены каналами шириной лишь на порядок больше толщины зазора. Описанные в литературе модели применимы в основном для случаев длинных мини- и микроканалов круглой, треугольной или прямоугольной формы и не позволяют однозначно предсказать характер и границы режимов течения. Кроме того, увеличение ширины канала и уменьшение его зазора может привести к появлению новых эффектов, новых типов неустойчивостей и режимов течения газожидкостной смеси. В связи с этим существует необходимость детального экспериментального исследования течений в широких и плоских микроканалах, разработки методик и алгоритмов, позволяющих получать точные количественные критерии определения границ режимов и построения новых универсальных моделей для предсказания смены режимов течения.

Стоит также отметить, что исследование двухфазных течений в коротких плоских микроканалах актуально не только для миниатюрных систем охлаждения, но и для целого ряда приложений в химической технологии, микрофлюидных реакторах и лабораториях на чипе.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что автором впервые детально изучены режимы двухфазного течения в плоских микроканалах. Разработан точный метод определения границ режимов, основанный на измерении количественных параметров (размеры капель и пузырьков, частота их появления, газосодержание и площадь пленки жидкости) по анализу изображений потока с помощью разработанных программных алгоритмов. Обнаружены новые типы неустойчивостей двухфазного потока в плоских микроканалах в зависимости от смачиваемости стенок, толщины и ширина канала. В частности, обнаружен и подробно исследован капельный режим течения. Введен критерий Вебера, определяющий границу стабильности капель в потоке. Дана расширенная классификация режимов течения, учитывающая характерные особенности течения в плоских каналах. Выявлены два типа режимов – кольцевой и отдельный, в которых потеря давления на трение в плоских микроканалах достигает максимального и минимального значения соответственно. С помощью разработанных автором алгоритмов и методов расчета показано, что классические модели, используемые для анализа течений в мини- и микроканалах, не позволяют в полной мере прогнозировать режимы течения и переходы между ними для случая плоских каналов. Автором предложен эмпирический критерий (модель) для определения границы смены режимов (от отдельного к кольцевому) и показано его соответствие результатам экспериментов.

Практическая значимость работы. Полученные новые результаты исследований, разработанные методики, алгоритмы и модель, являются важными для глубокого понимания механизмов двухфазного течения в плоских микроканалах и могут быть применены для решения ряда практических задач от проектирования миниатюрных систем охлаждения до моделирования течений высокого давления в трещиноватых породах.

Степень достоверности полученных результатов и обоснованности выводов. Исследования выполнены с применением высокоточных оптических методов диагностики (шлирен-метод и конфокальная микроскопия). Характеристики поверхности стенок каналов и поверхностное натяжение жидкостей измерены методами профилометрии и тензиометрии. Все исследования выполнены с использованием современного научного оборудования. Детально разработаны и описаны методики и процедуры измерений и обработки результатов, включая выполнение калибровок и тестовых экспериментов. Выполнен тщательный анализ результатов исследования, показана их хорошая воспроизводимость и согласие с разработанными моделями и результатами исследований других авторов. Основные положения и выводы диссертации соответствуют цели и задачам

исследования. В целом, достоверность полученных автором результатов и их обоснованность не вызывает сомнений.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, описаны полученные в диссертации основные результаты, обоснована их научная и практическая значимость, отмечен личный вклад автора.

В первой главе приведен критический анализ современного состояния исследований в данной области науки. В частности, систематизированы результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов двухфазного течения в микроканалах с учетом влияния различных факторов, включая геометрию сечения и размеры канала, расходы газа и жидкости, свойства жидкости, смачивающие свойства поверхности канала, влияние гравитации. Выделены и рассмотрены общепринятые модели, описывающие режимы течения газожидкостных смесей в каналах, а также критерии смены режимов течения. В выводах к данной главе сформулированы основные проблемы, связанные с применением описанных моделей и критериев перехода для исследования и описания режимов течения. Отмечена недостаточная изученность двухфазных потоков в плоских коротких каналах.

Во второй главе дано детальное описание экспериментальной установки и методов исследования. Приведены технические характеристики экспериментального оборудования, подробно описана методика изготовления широких микроканалов. Приведены результаты измерения свойств и характеристик материалов и жидкостей, использованных в экспериментах. Описана процедура тарировки шпирен-метода и методики постобработки изображений, позволяющие выделять области, занятые пузырьками или жидкостью и рассчитывать требуемые величины.

В третьей главе изучены режимы газожидкостного течения и переходы между режимами для случая плоских горизонтальных микроканалов в зависимости от расхода газа и жидкости. Построены режимные карты в осях приведённых скоростей газа и жидкости, выделены характерные для плоских каналов режимы течения: струйный, пузырьковый, раздельный, вспененный и кольцевой. Подробно охарактеризованы как особенности этих режимов, так и изменения структуры течения в процессе перехода между ними. Предложена новая методика определения границ режимов на основе построения зависимостей количественных параметров от приведенных скоростей газа или жидкости. Построены новые режимные карты. Обнаружены такие особенности режимов двухфазного течения, характерные для широких микроканалов, как поток жидкости по центру микроканала в струйном режиме и формирование вертикальных перемычек и капель

жидкости. Проведено сравнение экспериментальных данных потерь давления на трение в микроканалах с расчетами по моделям гомогенного и раздельного потоков. Показано, что наилучшее согласование с экспериментом достигается для модели раздельного потока.

В четвертой главе представлены результаты исследования характерных особенностей двухфазного течения в широких прямоугольных каналах для жидкостей с разными значениями поверхностного натяжения. Показано, что существенного различия между пузырьковым и вспененным режимами течения при изменении смачивающей способности жидкости не наблюдается. Установлено, что с увеличением смачиваемости стенок канала появляется новый режим течения – капельный – формирование капель в виде вертикальных жидких перемычек. На основе полученных результатов предложена расширенная карта режимов течения, включающая пузырьковый режим, капельный режим и классические режимы течения. Разработан алгоритм расчета основных режимов двухфазного течения по модели «Taitel-Dukler». Показано, что модель «Taitel-Dukler» не позволяет предсказывать границы режимов течения для плоских микроканалов. Апробация модели «Ullmann and Brauner» показала, что данная модель может быть применима для описания лишь двух типов переходов в плоских микроканалах - от струйного режима к раздельному и от вспененного к кольцевому. Указаны основные причины, ограничивающие применимость этих моделей. Экспериментально показано, что переход от раздельного режима течения к кольцевому зависит только от ширины микроканала. Получен безразмерный эмпирический критерий для определения границы этого перехода и показано хорошее согласие с результатами экспериментов.

Апробация работы и автореферат. Результаты диссертационного исследования прошли широкую апробацию на международных и всероссийских научных и научно-практических конференциях. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 15 научных статьях в изданиях, в том числе высокорейтинговых, рекомендованных ВАК РФ, а также в 25 тезисах докладов на международных и всероссийских научных конференциях. В автореферате представлено краткое содержание глав диссертации, основные результаты и выводы. Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

1. Тест диссертации изобилует опечатками (стр. 33, 52, 56, 66, 73, 78, 86, 94, 107, 108, 109, 116, 134, 136, 137, 150, 160, 164), в некоторых предложениях дублируются существительные, присутствуют лишние слова, пропущены слова и смысл предложения непонятен (стр. 48, 45, 50, 56, 72, 77, 101, 154, 159).
2. На стр. 39 указан странный диапазон изменения угла смачивания ($50^\circ < \theta < 50^\circ$), а на стр. 66 – угла наклона канала ($55^\circ - 705^\circ$).
3. В таблице 3 (стр. 71-72) приведены модели для критической скорости потока обозначенные буквами KI, H, K, при этом в тексте не дана расшифровка этих обозначений.
4. На стр. 82, Таблица 6, последняя строка, в выражении для определения вязкости по модели гомогенного потока вязкость оказалась безразмерной величиной.
5. На стр. 84, продолжение таблицы 7, 5-я строка, выражение для константы двухфазного взаимодействия, C , по модели Qu and Mudawar, 2003, содержит размерный множитель G – массовый расход ($\text{кг м}^2/\text{с}$) согласно списку сокращений и обозначений.
6. Формулы 1.74; 1.83; 1.84; 185; 2.10 выписаны с опечатками и ошибками.
7. Обозначения в формуле (2.1) не соответствуют обозначениям на поясняющем ее рисунке 2.7.
8. На стр. 91 в разделе «постобработка» приводятся оценки толщин пленок жидкости по моделям из раздела 1.14 для разных режимов и в зависимости от скорости газа и жидкости. Непонятно какие конкретно модели использовали, так как в п. 1.14 только в таблице приведено 5 моделей и одна представлена формулой 1.76. Для какой конкретно жидкости (вода, водно-спиртовой раствор, FC-72) были сделаны эти оценки?
9. На стр. 111 наблюдается противоречие двух следующих друг за другом высказываний: «В каналах *большой высоты жидкость распространяется вдоль боковых стенок...* В исследуемом микроканале жидкость *не всегда распространяется вдоль стенок, что может быть вызвано большим соотношением высоты к ширине микроканала.*»
10. На стр. 131 дана ссылка на рис. 6, которого нет в диссертации.
11. На рис. 3.31 (стр. 135) и в тексте к рисунку нет пояснения, что обозначают две прямые красного цвета. На рис. 3.33 (стр. 137) и рис. 4.7 (стр. 146) отсутствуют обозначения символов (их нет в легенде, ни в подписи к рисунку, ни в тексте).
12. Стр. 139: «Для FC-72 значения поверхностного натяжения взяты из таблицы, 10 мН/м.» Где эта таблица?
13. На стр. 160 в пояснении к рис. 4.20 дана неверная ссылка на уравнение.
14. Ссылки 149 и 153 дублируют друг друга.

15. В тексте диссертации наблюдается путаница с измеренными величинами углов натекания и оттекания капли воды на нержавеющей стали и кварце. Так, в Таблице 11 на нержавеющей стали эти углы равны 106° и 25° , а на кварце - 108° и 68° . Однако для кварца также можно найти значения этих углов равными 74° и 25° (стр. 101), и 45.8° и 24.5° (стр. 106). Для стали краевые углы натекания и оттекания также составили 92.5° и 22° (стр. 106). Какие на самом деле были значения краевых углов смачивания для этих материалов? Вообще, известно, что чистая поверхности кварца очень хорошо смачивается водой, т.е. наблюдается полное смачивание, а в диссертации кварц оказался гидрофобным! Как обрабатывали (очищали) поверхность кварца перед экспериментом?

16. Описание алгоритма в программе Matlab, разработанного автором для оценки площади (характерных размеров) и частоты появления пузырьков, отсутствует. Не удалось найти его описания и во 2-й главе, посвященной методам исследования. Если этот алгоритм занимает много места в тексте главы, то его можно было вынести в приложение. Получается, что авторская разработка, на основе которой рассчитываются важнейшие количественные критерии для построения режимных карт, осталась за кадром.

17. Во второй главе необоснованно много (почти половина главы) внимания уделено описанию методов и математического аппарата измерения краевого угла смачивания и поверхностного натяжения жидкости, которые, в общем-то, не являются основными в диссертационной работе. Вместо этого, автору стоило бы дать расширенное описание оптических методов исследования и привести формулы для расчета толщины пленки жидкости по результатам оптических измерений.

18. В тексте работы ничего не говорится о вязкости использованных в экспериментах жидкостей. Как сильно различаются значения вязкости этих жидкостей?

19. Какая методика (алгоритм) использовалась для определения точного положения черных вертикальных линий, разграничивающих режимы на рисунках 3.10; 3.18; 3.20; 3.21; 3.25 и 3.30?

Отмечу, что указанные замечания не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Работа выполнена на высоком научном уровне, хорошо структурирована и проиллюстрирована. Отдельные главы и работа в целом подкреплены выводами, отражающими основные результаты. Автор работы продемонстрировал глубокое знание и понимание основных проблем в рассматриваемой предметной области.

Диссертационное исследование Роньшина Ф.В. соответствует заявленной специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы» (пункты 2, 3, 6, 17 паспорта специальности).

Заключение о соответствии диссертации требованиям «Положения о присуждении ученых степеней». Диссертация Роньшина Федора Валерьевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые научные результаты, которые вносят существенный вклад в решение актуальной проблемы прогнозирования характера газожидкостного течения в плоских микроканалах, что имеет важное фундаментальное и прикладное значение. По объему выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертация полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор, Роньшин Федор Валерьевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «механика жидкости, газа и плазмы».

Я, Иванова Наталья Анатольевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент  Н.А. Иванова

Кандидат физико-математических наук (специальность 01.02.05), заведующий научно-исследовательской лабораторией фотоники и микрофлюидики, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, г. Тюмень, ул. Володарского 6.

Телефон: 8 9526754727, e-mail: n.ivanova@utmn.ru

« 12 » февраля 2019 г.

