Отзыв

официального оппонента Васильева Николая Викторовича на диссертационную работу Мунгалова Александра Станиславовича на тему «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности – 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы исследования

Актуальность темы диссертации А.С. Мунгалова обусловлена необходимостью отвода сверхвысоких тепловых потоков от теплонапряженных элементов в микроэлектронике, силовой электронике, лазерной и аэрокосмической технике. Одним из перспективных подходов является использование стратифицированного течения тонкой жидкой пленки, увлекаемой высокоскоростным газовым потоком в плоских мини- и микроканалах. Такой режим обеспечивает высокую скорость пленки и возможность интенсивного испарения в области контактных линий. Однако переход от стратифицированного течения к кольцевому существенно повышает гидравлическое сопротивление, а также наряду с уносом капель с межфазной границы уменьшает эффективность теплоотвода. В связи с этим экспериментально-расчетное исследование структуры волнового течения и механизмов уноса капель в плоских миниканалах является актуальным и практически значимым.

Цель и основные задачи исследований

Целью работы является экспериментально-расчетное исследование газожидкостного пленочного течения в плоском миниканале, включающее численное моделирование структуры волнового стратифицированного течения в режиме с уносом капель, а также изучение процесса перехода от расслоенного режима течения к кольцевому.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

1. Создание экспериментального стенда для исследования двухфазного течения в плоских миниканалах. Проектирование, изготовление и сборка рабочих участков различной геометрии.

2. Экспериментальное исследование перехода от расслоенного течения к кольцевому в плоских миниканалах в широком диапазоне скоростей фаз, а также определение средней толщины пленки жидкости при стратифицированном течении. Сопоставление полученных результатов с данными, полученными для макроканалов.

3. Построение численных моделей течения пленки, увлекаемой газовым потоком, в режиме с уносом капель в плоском миниканале, их верификация и валидация.

4. Численное исследование волновой структуры плёнки жидкости и характеристик газовой фазы при стратифицированном течении в режиме с уносом капель. Сопоставление результатов моделирования для плоских миниканалов с экспериментальными данными для крупномасштабных каналов.

5. Выявление механизмов уноса капель от межфазной границы пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в плоских миниканалах, методами вычислительной гидродинамики.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (220 наименований). Объем диссертации составляет 182 страницы, она содержит 89 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов. Представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов и описан личный вклад автора работы.

В первой главе представлен обзор режимов двухфазного течения в трубах и мини-микроканалах, гидродинамических неустойчивостей, экспериментальных и теоретических исследований волновой структуры пленки и уноса капель в крупномасштабных каналах, а также численных работ. Отмечено отсутствие единого критерия перехода от макро- к мини- и микроканалам и недостаток данных о локальной волновой структуре газопленочного течения в плоских миниканалах. В конце главы сформулированы выводы и обоснована постановка задач.

Во второй главе описаны экспериментальный стенд, рабочие участки, изготовленные методом фотополимерной 3D-печати, оптические методы диагностики: Шлирен-метод для измерения доли орошения верхней стенки канала, конфокальный метод измерения толщины пленки жидкости, синтетический Шлирен-метод на основе отражения (Moon Glade-BOS) для валидации метода VOF, применяемого в численном моделировании, и исследования деформаций межфазной границы микрометрового масштаба. Оценены неопределенности измерений. Представлена постановка численных задач, система уравнений, модели межфазной границы VOF и CVOFLS, методы DNS и LES, граничные условия, расчетные сетки и результаты валидации.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты по переходу к кольцевому течению в плоских миниканалах высотой 0,5–1 мм в диапазоне Re_{liq} = 80–860 и Re_{gas} = 1040–10350. Показано влияние высоты канала и высоты подводящего канала жидкости. Установлено, что к кольцевому режиму приводят как переток жидкости по боковым стенкам, так и унос капель с волновой межфазной границы. При исключении контакта жидкости с боковыми стенками унос капель становится определяющим механизмом при высоких скоростях фаз. Представлены измерения средней толщины пленки и поперечных профилей.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования волновой структуры пленки в режиме с уносом капель. Описаны механизмы формирования начальных волн и волн возмущения, генерация волн медленной и быстрой ряби, вихревые течения в жидкости и газе, а также механизмы уноса капель в плоском миниканале. Показано, что при переходе от крупномасштабных каналов к миниканалам частота волн возрастает до 5 раз, продольный размер волн возмущения уменьшается на порядок, а их высота — в 5–7 раз; волны быстрой ряби заметно подавляются. Описан доминирующий механизм уноса, связанный с взаимодействием волны возмущения с крупномасштабными вихрями в газе и осцилляциями вертикального градиента давления.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна

К основным результатам, обладающим научной новизной, следует отнести:

- методами вычислительной гидродинамики впервые показано, что при переходе от макро- к миниканалам при сопоставимых числах Re_{liq} и скоростях газа существенно возрастают частоты волн, уменьшаются средняя толщина пленки, продольный размер и амплитуда волн возмущения, что приводит к подавлению волн быстрой ряби;
- выявлено качественное подобие механизмов формирования начальных волн и волн быстрой ряби на волне возмущения, связанное с мелкомасштабными вихрями в газе и вихревым течением в жидкости;
- впервые описаны механизмы уноса капель в плоском миниканале и показана роль стесненности течения, пульсаций и крупномасштабных газовых вихрей, вызывающих осцилляции вертикального градиента давления, рост волны, формирование жидкого лигамента и его разрыв;

- экспериментально установлено, что унос капель играет значительную роль в формировании кольцевого режима в плоском миниканале, а при исключении контакта жидкости с боковыми стенками становится определяющим механизмом при высоких скоростях фаз; показано увеличение площади орошения верхней стенки за счет уноса при уменьшении высоты канала.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается комплексным подходом, сочетающим прецизионные оптические измерения и валидированные численные модели. Экспериментальная часть основана на конфокальном измерении толщины пленки жидкости, Шлирен-визуализации и синтетическом Шлирен-методе. Численное моделирование выполнено с использованием методов VOF и CVOFLS, DNS и LES. Проведены исследования сеточной сходимости и сопоставление с экспериментальными данными и данными из литературы для крупномасштабных каналов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в выявлении закономерностей трансформации волновой структуры пленки жидкости при переходе от крупномасштабных каналов к плоским миниканалам и в описании новых механизмов уноса капель в стесненных условиях. Полученные данные важны для верификации и развития моделей двухфазных пленочных течений.

Практическая значимость связана с проектированием пленочных миниканальных систем охлаждения, рассчитанных на отвод высоких тепловых потоков. Показанное увеличение частот волн в миниканалах позволяет рассматривать волновой процесс как один из механизмов замывания метастабильных сухих пятен, что важно для интенсификации теплообмена.

Апробация работы

По теме диссертации имеется достаточное количество публикаций. Опубликовано 10 работ в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК, в том числе в базах данных Scopus и Web of Science, включая Q1. Результаты исследований, изложенных в диссертации, были представлены на 12-ти всероссийских конференциях и научных семинарах.

Соответствие диссертации паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (отрасль науки – физико-математические): содержание работы соответствует паспорту специальности по п. 7. «течения многофазных сред (газожидкостные потоки)», п. 15 «линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах».

Считаю, что цель и все поставленные в работе задачи решены в полном объеме и на высоком научном уровне. Работа широко апробирована. Но к работе имеется ряд замечаний.

Основные замечания по работе

1. В главе 1 автором отмечается, что «ключевым преимуществом стратифицированного режима является существенно более низкий перепад давления относительно кольцевого режима». Однако в работе не производилось измерение перепада давления и не проводилось его количественных оценок.

2. Численная модель валидировалась только по средней толщине пленки жидкости вдоль канала, измеренной в проведенных экспериментах (рисунок 2.20). Сравнение основных локальных характеристик (амплитуд и частот волн в пленке) с экспериментом существенно усилило бы валидацию модели.

3. Сравнение толщины пленки в миниканале при стратифицированном режиме с кольцевой пленкой в крупномасштабных трубах из данных в литературе производилось при сопоставимых значениях пленочного числа Re и среднерасходной скорости газа (U_{gas}). При этом не обсуждалось возможное влияние на изменение толщины пленки различий в величинах чисел Re газа. К тому же при сравнении на рисунке 4.6 профиля волны возмущения, полученного в миниканале с помощью численного моделирования, с экспериментальными данными в трубе почти в 2 раза различаются U_{gas}, что дополнительно затрудняет разделение эффектов масштаба и скорости газа.

4. Количественные положения (продольный размер, высота и частота волн возмущения, предложенный критерий стесненности) опираются на численные расчеты в одной режимной точке. Для их обобщения на весь экспериментально исследованный в работе диапазон, а также установления границ применимости доминирующего механизма уноса капель требуется параметрическое численное исследование.

5. В целом диссертация написана грамотным и ясным языком без серьезных орфографических ошибок. Однако размещение некоторых иллюстрирующих рисунков, когда сначала идет изложение информации, а через 1–2 страницы дается сам рисунок (например, рисунки 3.1, 3.3–3.5), затрудняет восприятие читателю.

Общее заключение о работе

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Автореферат и текст диссертации хорошо структурированы, логично изложены и обладают внутренним единством. Считаю, что диссертация Мунгалова Александра Станиславовича представляет собой завершенную научно-квалификационную работу на актуальную тему, обладает научной новизной, теоретической и практической значимостью, соответствует требованиям пунктов 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а ее автор Мунгалов Александр Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Васильев Николай Викторович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Мунгалова Александра Станиславовича «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах», и их дальнейшую обработку.

Васильев Николай Викторович
кандидат технических наук по специальности – 1.3.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника, доцент,
заведующий лабораторией теплообмена в энергетических
установках
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН),
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2.
E-mail: nikvikvas@mail.ru,
тел.: +7(495)4850421.

28.10.2026 г.

Подпись Васильева Николая Викторовича заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.

Киверин Алексей Дмитриевич