Отзыв

официального оппонента на диссертацию Мунгалова Александра Станиславовича «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах» на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность диссертационной работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию газожидкостного пленочного течения в плоском миниканале с акцентом на анализ структуры волнового стратифицированного течения, в том числе с уносом капель, и перехода от расслоенного режима течения к кольцевому. Получены важные экспериментальные и численные результаты применительно к разработке пленочных миниканальных систем охлаждения, работающих с высокими расходами фаз в условиях развитой турбулентности для отведения сверхвысоких тепловых потоков. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (1. Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (1. Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика) и связана с разработкой критических технологий РФ (2. Технологии создания энергетических систем с замкнутым топливным циклом). Диссертация подготовлена в пользующейся мировой известностью научной школе чл.корр. РАН Кабова О.А. в пока еще Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Таким образом, представленную диссертацию можно признать актуальной.

Научная новизна этой фундаментальной работы не вызывает сомнений. Решаемая в ней научная задача выглядит фантастической особенно в расчетной сфере. Экспериментальная часть весьма основательная. Создан экспериментальный стенд для исследования двухфазного течения в плоских миниканалах. Спроектированы, изготовлены и собраны рабочие участки различной геометрии. Экспериментально исследован переход от расслоенного течения к кольцевому в плоских миниканалах в широком диапазоне скоростей фаз и определена средняя толщина пленки жидкости при стратифицированном течении. Сопоставлены полученные базы данных измерений с имеющимися данными для макроканалов. Построены, верифицированы и валидированы численные модели течения пленки, увлекаемой газовым потоком, в режиме с уносом капель в плоском миниканале. Полученные на основе исследования волновой структуры плёнки жидкости и характеристик газовой фазы при стратифицированном течении в режиме с уносом капель результаты численного моделирования для плоских миниканалов сопоставлены с экспериментальными данными для крупномасштабных каналов. Выявлены механизмы уноса капель от межфазной границы пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в плоских миниканалах, с использованием метода Volume of Fluid, VoF, а также сочетание метода VoF с методом линии уровня (coupled Volume of Fluid Level-Set, CVOFLS).

Оппонент в целом согласен с автором работы в оценке научных выводов. Так,

1. с помощью CFD впервые продемонстрировано, что переход от макро- к миниканалам при сопоставимых значениях плёночного числа Рейнольдса и скоростей газовой фазы приводит к значительному увеличению частот волн; уменьшению средней толщины пленки жидкости; существенному уменьшению продольного размера волн возмущений и их амплитуды, что приводит к подавлению волн быстрой ряби;

2. обнаружено качественное подобие между процессом формирования начальных волн и волн быстрой ряби на волне возмущения, связанное с вихревым течением в жидкости и мелкомасштабными вихрями в газе;

3. с помощью CFD впервые описаны механизмы уноса капель в плоском миниканале и выявлена роль стеснённости газожидкостного пленочного течения, в частности, воздействия пульсаций и крупномасштабных вихрей в газе на отрыв капель от межфазной границы;

4.экспериментально установлено, что унос капель со свободной поверхности жидкой пленки, увлекаемой потоком газа, играет значительную роль в формировании кольцевого режима течения в плоском миниканале, а при исключении контакта жидкости с боковыми стенками становится определяющим механизмом перехода при высоких скоростях фаз. При этом площадь орошения верхней стенки миниканала за счет уноса капель увеличивается при уменьшении его высоты.

Практическая полезность работы обоснована. Полученные результаты имеют важное прикладное значение для проектирования систем охлаждения, способных отводить сверхвысокие тепловые потоки. В основе их работы лежит механизм интенсификации теплообмена, связанный со сверхинтенсивным испарением в области контактных линий «газ–жидкость–твердое тело». Критическим параметром является высокая частота замывания таких пятен (от 100 Гц до нескольких кГц). Результаты работы позволяют идентифицировать волновой процесс в качестве одного из доминирующих механизмов замывания сухих пятен. Выявлено существенное увеличение частот волн в миниканалах по сравнению с крупномасштабными каналами, достигающим пятикратного увеличения. Данный результат указывает на принципиально более высокую интенсивность волновых процессов, а следовательно, и на потенциал миниканальных пленочных систем охлаждения.

Апробация работы может быть оценена как превосходная**.** По диссертации сделано 10 публикаций, включенных в список ВАК и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science), включая статьи в Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Experimental Thermal and Fluid Science и Physics of Fluids.

Достоверность и обоснованность представленных результатов обеспечивается комплексным подходом, сочетающим современные экспериментальные методы и валидированные численные модели. Экспериментальная часть основана на применении прецизионного конфокального оптического метода для измерения толщины жидкой пленки, а также шлирен-визуализации для исследования перехода к кольцевому течению. Численное моделирование выполнено с использованием современных методов описания границы раздела фаз Volume of Fluid и coupled Volume of Fluid Level-Set. Достоверность используемых численных моделей подтверждена их валидацией на основании собственных экспериментальных данных, а также сопоставлением с

данными других авторов и верификацией путем исследования сеточной сходимости. Дополнительным критерием достоверности служит апробация ключевых результатов работы в ведущих международных и отечественных жестко рецензируемых журналах.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 182 страницы с 89 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 220 наименований. Следует отметить, что ссылок на работы оппонента нет.

Общее впечатление от работы исключительно положительное, несмотря на весьма существенные замечания. Работа комплексная, сочетающая экспериментальные и численные методы. Она хорошо структурирована и наполнена интересными физическими выводами.

Из достижений работы хотелось бы отметить следующие.

Очень хорошее впечатление оставил аналитический обзор, представленный в первой главе. Акцент делается на белых пятнах рассматриваемой проблематики. Так, справедливо отмечается, что хотя механизмы уноса капель исследовались в макроканалах, но влияние турбулентных пульсаций и вихревых структур в газовом потоке на унос как в крупномасштабных каналах, так и в мини- и микроканалах осталось нераскрытым.

Вторая методическая глава объединяет ряд материалов, связанных с методологией, постановкой задач (в результативной 4 главе они не рассматриваются), валидацией и верификацией численных моделей. Так, валидация численной модели метода VoF с учетом термокапиллярной конвекции и теплового расширения выполнена в программном комплексе Ansys Fluent.

Третья глава центральная, экспериментальная содержит ряд интереснейших выводов. Так, впервые показано, что помимо механизма перехода от слоистого двухфазного течения к кольцевому, унос капель играет значительную роль в формировании жидкой плёнки на верхней стенке плоского миниканала.

Хотя вычислительная четвертая глава является дискуссионной, она содержит ряд вполне оправданных гипотез о сложнейших процессах в двухфазных микроканальных потоках. Так, описана волновая структура плёнки в режиме с уносом капель в миниканале. Показано, что при переходе от крупномасштабных каналов к миниканалам продольный размер волн возмущения уменьшается на порядок, а их высота примерно в 5–7 раз. При этом волны быстрой ряби, играющие критическую роль в уносе капель в крупномасштабных каналах, подавляются, тогда как волны медленной ряби сохраняются. Переход от макро- к миниканалам приводит к существенному росту частот волн возмущения – до 5 раз.

В заключении выделены прорывные результаты, касающиеся толщина плёнки, волновой структуры плёнки в режиме с уносом капель, механизмов генерации начальных волн и волн быстрой ряби, а также уноса капель в миниканале, перехода к кольцевому режиму.

Квалификационная состоятельность работы Мунгалова А.С. как кандидатской диссертации по физико-математическим наукам по специальности 1.1.9 не вызывает сомнений.

Тем не менее, по работе есть ряд замечаний.

1.Кардинальное замечание – некорректность использования двумерного LES. Основанная на вихреразрешающих методах двумерная модель турбулентного двухфазного (да и однофазного тоже) течения приводит к ошибкам в описании каскадных процессов вихреобразования. Об этом можно почерпнуть из книги Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012 – 88 с.

Следует также указать на опущенную в литературных источниках ссылку на труды оппонента, например, Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб: БГТУ, 2001. 107с.

Автор попробовал обосновать применимость двумерной модели сравнением с экспериментом. Несмотря на то, что такое обоснование не правомочно, есть основание полагать, что предложенный подход может рассматриваться как сугубо приближенный, упрощенный, инженерный, учитывая фантастическую сложность проведения расчетов в рамках такого приближения. Как говорится, «за неимением гербовой пишем на простой».

2.Выбранный CFD-подход в вычислительном отношении чрезмерно затратен. Недели счета для 2D-вариантов и месяцы для 3D-аналогов, конечно, связаны с заданными квадратными и кубическими сетками, размеры которых все равно не дотягивают до необходимых для обеспечения точности прогнозов. Не вполне понятно, почему не были применены менее затратные гибридные подходы, сочетающие RANS и LES (DES и IDDES, например). Ориентация только на однородные сеточные структуры также не вполне оправдана. Есть гибридные сетки с неоднородными расчетными ячейками, а также сочетающие структурированные и неструктурированные фрагментарные сетки.

3. Есть более мелкие замечания, привязанные к страницам диссера.

3.1. Стр.95. Константа Смагоринского выбрана 0.1., а должна быть 0.2 (см. Гарбарук).

3.2. Стр.102. Хотелось бы объяснить причины значительного различия расчетных и экспериментальных данных на Рис.2.20.

3.3. Стр.104. И все-таки можно воспринимать 3D расчет как достоверный?

3.4. Стр.129. Хотелось бы объяснить, почему сочетается число Рейнольдса для жидкой фазы со скоростью газовой?

3.5. Стр.139. Все-таки с каплями есть ли ясность, какие они? сколько их? какой они формы и размера?

3.6. Стр.149. Что можно сказать о турбулентности в газовой фазе?

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Заключение

Указанные замечания не умаляют общей положительной оценки диссертации Мунгалова Александра Станиславовича, которая является законченной научно-квалификационной работой, посвященной экспериментальному и численному исследованию газожидкостного пленочного течения в плоском миниканале с акцентом на анализ структуры волнового стратифицированного течения, в том числе с уносом

капель, и переходом от расслоенного режима течения к кольцевому. Выполненная работа удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, а ее автор Мунгалов Александр Станиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа и плазмы, профессор Исаев Сергей Александрович

12 октября 2026 года

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб, Пилотов, 38, info@spbguga.ru, 9214045516

Подпись профессора Исаева С.А. заверяю

Проректор по научной и инновационной работе Г.А. Костин