МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА (МГУ)

Ленинские горы, Москва,
ГСП-1, 119991
Телефон: 8-495-939-10-00
Факс: 8-495-939-01-26

16.10.2026 № 447-26/013-03
На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», член-корр. РАН

Федянин Андрей Анатольевич

«16» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

о диссертационной работе Мунгалова Александра Станиславовича «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью анализа структуры газожидкостного пленочного течения в стесненных условиях для развития технологий охлаждения, способных отводить сверхвысокие плотности теплового потока (свыше 1 кВт/см²), которые в ближайшем будущем будут востребованы в микроэлектронике, силовой электронике и системах искусственного интеллекта. При этом эффективное управление процессами теплообмена и реализация потенциала подобных систем требуют глубокого понимания гидродинамики потока, в том числе в адиабатических условиях, поскольку параметры течения, включая скорость пленки и ее мгновенную, а также среднюю толщину, волновые характеристики и структуру вихревых течений в жидкой и газовой фазах, являются одними из ключевых факторов, определяющих интегральную интенсивность теплоотдачи.

Научная и практическая значимость диссертационной работы обусловлена установлением влияния масштабного фактора на структуру высокоскоростного газожидкостного плёночного течения. Получено, что в миниканалах по сравнению с крупномасштабными каналами толщина плёнки уменьшается, а частота волн многократно возрастает, что создаёт предпосылки для интенсификации теплообмена. Впервые показано,

что унос капель с волновой поверхности в плоских миниканалах является одним из ключевых факторов, инициирующих переход от стратифицированного к «кольцевому» режиму течения при высоких скоростях фаз. Это важно учитывать при моделировании таких течений и проектировании систем охлаждения на основе миниканалов.

Общая характеристика 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.

Во введении диссертации обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современного состояния проблемы, включающий классификацию двухфазных режимов течения и анализ механизмов гидродинамических неустойчивостей. Показано, что волновая структура и унос капель в крупномасштабных каналах исследованы достаточно подробно, тогда как для мини- и микроканалов такие данные практически отсутствуют. Численные работы, посвящённые структуре высокоскоростного газожидкостного плёночного течения, немногочисленны и выполнены в основном для каналов большего масштаба.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки, экспериментальных методик, а также методов численного моделирования. Она содержит описание использовавшегося в работе экспериментального стенда и рабочих участков с различной геометрией, методов визуализации двухфазного течения в плоском миниканале и измерения толщины пленки при расслоенном течении. Численное моделирование выполнено методом конечных объемов в двумерной и трехмерной постановках с применением метода объема жидкости, а также сочетания метода объема жидкости с методом функции уровня. Проведена валидация моделей по экспериментальным данным, показавшая удовлетворительное согласие и способность численных подходов воспроизводить волновую структуру и механизмы уноса капель.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования перехода к кольцевому режиму течения в плоских миниканалах в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Впервые показано, что унос капель с волновой межфазной границы является значимым механизмом формирования кольцевого течения. Выявлено, что уменьшение высоты канала (с 1 мм до 0,5 мм) существенно (более чем в два раза) увеличивает долю орошения верхней стенки за счет уноса капель. Получено, что толщина пленки в миниканалах при стратифицированном течении значительно (до четырех раз) меньше, чем в крупномасштабных трубах при сопоставимых условиях.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования газожидкостного пленочного течения в плоских миниканалах. Показано, что механизм генерации начальных волн сохраняется вплоть до масштабов миниканалов и качественно совпадает с механизмом генерации волн быстрой ряби. Выявлено, что переход к стесненным условиям приводит к уменьшению продольного размера волн возмущения на порядок и росту их частоты до пяти раз. Определен доминирующий механизм уноса капель в миниканалах, связанный с потерей устойчивости волны возмущения при ее взаимодействии с крупномасштабными вихрями газовой фазы. Проведено сопоставление различных методов моделирования межфазной границы и выявлено, что гибридный подход,

сочетающий метод объема жидкости и метод функции уровня, обеспечивает удовлетворительную точность на относительно крупных расчетных сетках.

В заключении приведены основные выводы работы. Основные результаты работы обладают научной новизной и практической значимостью.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом, сочетающим экспериментальные методы (конфокальная оптика, шлирен-визуализация) с валидированным численным моделированием. Достоверность расчетных моделей подтверждена сопоставлением с собственными и литературными экспериментальными данными, а также анализом сеточной сходимости. Дополнительным критерием надежности служит публикация ключевых результатов работы в ведущих рецензируемых научных журналах.

Публикации

Опубликованы 10 работ в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

Соответствие автореферата и диссертации

Основные разделы работы, результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует содержанию диссертации и удовлетворяет требованиям ВАК.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты работы могут быть рекомендованы к ознакомлению в научных подразделениях университетов (физический и механико-математический факультеты МГУ, Московский энергетический институт, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Пермский государственный университет и др.), а также в академических институтах РАН (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Объединённый Институт высоких температур РАН, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Институт механики сплошных сред УрО РАН и др.).

Замечания по диссертационной работе

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. Терминология требует уточнения: «переход к кольцевому течению в плоских миниканалах» немного режет слух. Понятно, что имеется в виду дисперсно-пленочное течение с плёнкой по всему периметру.

2. На стр. 85 автор вводит понятие «энстрофия», ссылаясь на не слишком широко известную работу. В русской литературе эта величина называется скоростью вязкой диссипации или работой внутренних поверхностных сил в единицу времени (Л.И.Седов. Механика сплошной среды, том. 1 и 2. М. «Наука» 1971.)

3. Многие интересные результаты в работе получены, как следствие численного моделирования. Не подвергая сомнению верифицированность и валидированность вычислительного кода, хотелось бы также иметь оценки накопления вячислительных ошибок при проведении расчетов нестационарных процессов. Известно, что численное решение системы уравнений в частных производных стремится к точному при уменьшении размера расчетной ячейки (стремлении к нулю). В реальных расчетах размер ячейки всегда конечен, что ведет к накоплению ошибки на каждом вычислительном шаге. Величина ошибки зависит от порядка точности расчетной схемы, размера ячейки, количества шагов интегрирования. Хотелось бы видеть оценки, до каких величин могла накопиться ошибка при получении результатов, представленных в работе.

Заключение

Диссертация Мунгалова Александра Станиславовича «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах» является законченной научно-исследовательской работой.

Содержание диссертации соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор работы, Мунгалов Александр Станиславович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, содержит важные новые результаты в области моделирования расслоенного течения. Представленные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в научных и образовательных учреждениях, таких как МГУ, Нижегородский государственный университет, Саратовский государственный Университет, МФТИ, Институт химической физики РАН, Институт прикладной физики РАН, ИВТАН, ИТПМ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании Кафедры газовой и волновой динамики Механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (протокол № 5 от «12» октября 2026 г.), и направляется в диссертационный совет 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьев , д. 1.

Отзыв составил:
Зав. лабораторией волновых процессов,
профессор кафедры газовой и волновой
динамики, д.ф.-м.н., профессор Смирнов Николай Николаевич

Декан механико-математического ф-та,
член-корреспондент РАН, профессор Шафаревич Андрей Игоревич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес ведущей организации: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

Телефон: (495) 939-27-29, e-mail: info@rector.msu.ru

Официальный сайт: www.msu.ru