



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
Академик РАН Маркович Д.М.


« 30 » 04 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)**

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах» выполнена Мунгаловым Александром Станиславовичем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН).

В 2022 году А.С. Мунгалов получил квалификационную степень магистра, окончив Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению 03.04.02 – «Физика». В настоящее время А.С. Мунгалов работает младшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (ИТ СО РАН) в лаборатории № 6.6 интенсификации процессов теплообмена.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. Развитие современных технологий и устойчивый тренд к миниатюризации устройств приводят к критическому росту тепловых нагрузок на высокотеплонапряженные элементы, включая процессоры, компоненты систем искусственного интеллекта, силовую электронику, светодиоды и элементы современных синхротронов, в которых локальные плотности теплового потока могут достигать 1 кВт/см^2 и имеют тенденцию к дальнейшему увеличению. В лаборатории 6.6 ИТ СО РАН показано, что эффективным методом охлаждения, способным обеспечить отвод таких тепловых нагрузок, является течение тонкой жидкой пленки, увлекаемой высокоскоростным газовым

потоком в плоских миниканалах. Для наибольшей эффективности данного метода охлаждения целесообразно поддерживать расслоенный (стратифицированный) режим течения, поскольку при нем обеспечивается меньший перепад давления по сравнению с кольцевым течением. Таким образом, переход к кольцевому режиму течения является нежелательным процессом и может снизить эффективность данного метода охлаждения. Кроме того, для реализации подобных методов охлаждения необходимо детальное понимание структуры течения в адиабатических условиях, поскольку толщина и скорость пленки, амплитуда и частота волн являются важными факторами, влияющими на интегральную интенсивность теплоотдачи.

Цель работы:

Целью диссертационной 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.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

1. Методами вычислительной гидродинамики впервые продемонстрировано, что переход от макро- к микросканалам при сопоставимых значениях плёночного числа Рейнольдса и скоростей газа 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. Выявлено 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 численного моделирования впервые описаны механизмы уноса капель в плоском микросканале и выявлена роль стеснённости газожидкостного плёночного 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 микросканале, а при исключении контакта жидкости с боковыми стенками становится определяющим механизмом перехода при высоких скоростях фаз. При этом площадь орошения верхней стенки микросканала за счет уноса капель увеличивается при уменьшении его высоты.

Научная и практическая значимость работы:

Результаты работы подтверждают перспективность микросканальных систем охлаждения, функционирующих при высоких расходах фаз, в том числе в турбулентных условиях. Выявленная трансформация волновой структуры пленки при переходе к микросканалам обеспечивает потенциал для значительной интенсификации теплообмена. Доказано, что унос капель является одним из ключевых факторов смены режимов течения в стеснённых условиях, что обуславливает необходимость учета данного эффекта как при проектировании таких систем, так и при разработке теоретических и численных моделей. Существенный рост частот волн по сравнению с крупномасштабными каналами прямо указывает на принципиально более высокую интенсивность волновых процессов, а следовательно, и на высокий потенциал микросканальных плёночных систем для охлаждения высокотемпературных элементов.

Степень достоверности результатов:

Комплексный подход, сочетающий прецизионные методы измерения, а также валидированные и верифицированные численные модели обеспечивает достоверность полученных результатов. Экспериментальные методы измерения включают конфокальный метод для измерения толщины пленки жидкости и Шлирен-метод, который позволяет регистрировать жидкость на верхней стенке миниканала и переход к кольцевому течению, соответственно. Численное моделирование выполнено в двумерной и трехмерной постановках с использованием различных методов описания межфазной границы, а достоверность полученных результатов подтверждена валидацией моделей на основании собственных экспериментальных данных, сопоставлением с экспериментальными данными, полученными другими авторами, а также верификацией моделей. Ключевые результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях.

На защиту выносятся:

- Трансформация гидродинамических характеристик высокоскоростного газожидкостного пленочного течения при переходе от крупномасштабных каналов к миниканалам: уменьшение продольного размера волн возмущений на порядок величины и их высоты относительно остаточной пленки в 5–7 раз, что приводит к подавлению волн быстрой ряби; увеличение частот волн возмущений до 5 раз; уменьшение средней толщины пленки до 4 раз
- Качественное подобие механизмов формирования начальных волн и волн быстрой ряби на волне возмущения, обусловленное влиянием мелкомасштабных вихрей в газовой фазе и вихревого течения в жидкости, способствующих зарождению обоих типов волн при совместном течении пленки жидкости и газа в миниканале
- Механизм уноса капель в условиях стесненного газожидкостного пленочного течения, связанный со взаимодействием волны возмущения с пульсациями, в частности, с крупномасштабными вихрями в газовой фазе, вызывающим осцилляции вертикального градиента давления над волной, что приводит к росту амплитуды волны, формированию лигамента жидкости и его разрыву на капли, которые преимущественно осаждаются на верхнюю стенку миниканала
- Механизм формирования кольцевого режима течения в плоском миниканале за счет уноса капель от волновой межфазной границы и выявленная закономерность существенного увеличения площади орошения верхней стенки миниканала за счет уноса капель при уменьшении его высоты

Личный вклад автора:

Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад соискателя заключался в проектировании и сборке экспериментальной установки и рабочих участков, в подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, в настройке и калибровке оборудования, обработке и анализе результатов эксперимента, в построении численных моделей, верификации расчетных сеток, валидации моделей с помощью экспериментальных данных, полученных соискателем лично, подготовке публикаций в рецензируемые журналы, а также выступлений с докладами на российских конференциях.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Mungalov, A. S., Kochkin, D. Y., & Kabov, O. A. "Free surface deformations of the horizontal liquid film heated from the substrate side. Experiment and numerical simulation." *Interfac. Phenom. Heat Transfer* 11(2), pp. 95–107 (2023).
2. Kochkin, D., Mungalov, A., Zaitsev, D., & Kabov, O. "Use of the reflective background oriented schlieren technique to measure free surface deformations in a thin liquid layer non-uniformly heated from below." *Exp. Therm. Fluid Sci.* 133, 110576 (2022).
3. Lobasov, A. S., Shebelev, A. V., Kochkin, D. Y., Mungalov, A. S., Zaitsev, D. V., Minakov, A. V., Karchevsky, A. L., & Kabov, O. A. "A comprehensive study of thermocapillary rupture of liquid layer." *Phys. Fluids* 36(10), 102024 (2024).
4. Mungalov, A. S., Kochkin, D. Y., Pukhovoy, M. V., Zolotarev, K. V., & Kabov, O. A. "Measurement of submicro-deformation of optical elements using reflective background oriented schlieren technique." *Eurasian J. Math. Comput. Appl.* 13(1), pp. 79–88 (2025).
5. Mungalov, A. S. & Derevyannikov, I. A. "Reflective synthetic schlieren technique for measuring liquid surface deformations." *AIP Conf. Proc.* 2422, 040012 (2021).
6. Mungalov, A. S. & Kochkin, D. Y. "Surface deformation of non-uniformly heated thin layer of liquid." *AIP Conf. Proc.* 2422, 040011 (2021).

Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих всероссийских конференциях и семинарах: Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках", посвященная 100-летию академика В.Е. Алемасова (г. Казань, 23-27 мая 2023 г.); XVII Всероссийская школа-конференция

“Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (г. Шерегеш, 19-24 марта 2023 г.); Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену (РНКТ-8) (г. Москва, 17-22 октября 2022 г.); VII Всероссийская научная конференция “Теплофизика и физическая гидродинамика” (г. Сочи, 5-14 сентября 2022 г., диплом первой степени); XXXVIII Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 29 - 31 августа 2022 г., диплом второй степени); XXXVII Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 14 - 16 сентября 2021 г., диплом третьей степени); Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики (г. Новосибирск, 24-27 ноября 2020 г., диплом за лучший доклад студента); XXVI Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 5-7 октября 2020 г., диплом за лучший доклад студента); Семинар по материалам кандидатской диссертации, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН под руководством академика РАН В.А. Стенникова, 15.05.2025, г. Иркутск; Семинар по материалам кандидатской диссертации, Институт вычислительного моделирования СО РАН, 10.04.2025, г. Красноярск; Семинар по материалам кандидатской диссертации: Сибирский федеральный университет, 11.04.2025, г. Красноярск.

Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите:

Диссертация А.С. Мунгалова, посвященная структуре расслоенного течения в режиме с уносом капель и переходу к кольцевому течению в плоских миниканалах, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – “Механика жидкости, газа и плазмы” для физико-математических наук по направлениям исследований п. 7. «Течения многофазных сред (газожидкостные потоки)», п. 15. «Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах».

Решение о рекомендации к защите:

Диссертация «Структура расслоенного течения в режиме с уносом капель и переход к кольцевому течению в плоских миниканалах» Мунгалова Александра Станиславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – “Механика жидкости, газа и плазмы”.

Заключение принято на объединенном заседании секций 4 “Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы” и 5 “Теплофизические основы энергетике (включая горение)” Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством академика РАН С.В.

Алексеевко. В заседании приняло участие 21 человек, из них: 10 докторов наук, 6 кандидатов наук.

Решение «за» принято единогласно, протокол № 1 от 25 июня 2025 года.

Председатель объединенного заседания
Секций 4 и 5 Ученого совета ИТ СО РАН;
Научный руководитель ИТ СО РАН,
Академик РАН

Сергей Владимирович Алексеевко

Секретарь объединенного заседания
Секций 4 и 5 Ученого совета ИТ СО РАН;
Заведующий лабораторией 6.5 ИТ СО РАН
кандидат физико-математических наук,

Вячеслав Владимирович Чеверда

Подписи С.В. Алексеевко и В.В. Чеверды заверяю

Начальник отдела кадров
ИТ СО РАН



Светлана Юрьевна Грехнева