



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН
Академик РАН
Д.М.Маркович

18 июня 2026 г.
М.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С.КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК

По диссертации Назарова Никиты Андреевича «Аэродинамика турбулентного пульсирующего течения в плоском канале при отрыве потока» на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация выполнена в Лаборатория термогазодинамики (2.2.).

В 2021 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру ФФ НГУ по направлению подготовки 03.04.02 Физика. В период с 01.09.21 г. по 29.08.26 г. обучается в аспирантуре ИТ СО РАН.

Научный руководитель: Терехов Владимир Викторович, ИТ СО РАН, Лаборатория термогазодинамики, д.-ф.м.н., проф. РАН, заведующий лабораторией.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Актуальность темы:

Проблема теплопередачи в отрывных пульсирующих течениях представляет как фундаментальный, так и технический интерес с точки зрения увеличения плотности теплового потока в современных инженерно-технических системах. Отрывные потоки возникают практически во всех современных системах охлаждения, например при охлаждении серверной микроэлектроники, системах со вдувом, как при охлаждении лопаток газовых турбин, при охлаждении помещений. При этом отрывные потоки характеризуются наличием областей рециркуляции, которые могут как приводить к ухудшению теплообмена, так и к его повышению за счет интенсификации массопереноса. Нестационарные характеристики потока и тепловые колебания наблюдаются вокруг точки

отрыва потока и повторного присоединения, и этот механизм очень сложен. Одним из наиболее простых в реализации способов интенсификации тепло-массо переноса в системах с отрывными течениями является добавление пульсаций расхода. Кроме того, исследования пульсирующих течений диктуются их активным применением в современной биомедицине, при изучении природных явлений, в машиностроении. Также большой интерес вызывают исследования сопротивления пульсирующих потоков в гладких каналах и трубах, поскольку они являются неотъемлемой связующей частью охлаждающих систем.

Для широкого диапазона колебательных частот, амплитуд и чисел Рейнольдса большинство осредненных по времени характеристик потока в каналах и трубах совпадает со значением, ожидаемым для стационарного потока. При этом, в различные фазы колебаний поток имеет различную степень турбулентности и его характеристики могут существенно отличаться от стационарных. Это обобщение не распространяется на параметры трения, средние по времени значения которых отличаются от стационарных. Несмотря на значительное число исследований, в литературе практически отсутствует детальное описание динамики пристенных характеристик пульсирующих течений. Отсутствует универсальный закон трения и не определены чёткие границы применимости квазистационарных моделей. Недостаточно данных о процессах ламинаризации и турбулизации потока при высокоамплитудных колебаниях.

В системах с наличием рециркуляции и отрыва потока практически всегда отмечается наличие оптимальной частоты пульсаций, при которой происходит значительное усиление теплообмена. Однако добавление пульсаций не всегда сопровождается качественной перестройкой потока и резонансом. При этом механизмы взаимодействия пульсаций потока с вихревыми структурами могут значительно отличаться для разных геометрий. Обобщению поддаются геометрии с резким отрывом потока (ребра, диафрагмы), которые сглаживают влияние предыстории потока на вихревые структуры за препятствием.

2. Цель работы:

Целью работы является экспериментальное исследование аэродинамических параметров пульсирующего потока и структуры квазистационарного течения в различных геометриях в широком диапазоне чисел Рейнольдса. Проверка применимости модели стационарного стратифицированного безградиентного течения для нахождения коэффициента трения в квазистационарном потоке в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи: создание стенда для измерения аэродинамических свойств турбулентных пульсирующих течений, обладающей высоким пространственным и временным разрешением; усовершенствование алгоритмов анализа PIV экспериментов; исследование динамики интегральных характеристик турбулентного квазистационарного пульсирующего течения в канале. сравнение различных методик измерения трения в пульсирующем потоке; исследование динамики рециркуляционной зоны в квазистационарном пульсирующем потоке за ребром.

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

Впервые проведено систематическое сравнение двух независимых методов определения напряжений трения на стенке — теплового датчика трения и метода Клаузера на основе PIV-данных — в условиях квазистационарного пульсирующего течения в прямоугольном канале. Впервые разработан способ анализа PIV-данных с помощью графических процессоров за счет использования высокоуровневых предкомпилированных библиотек для тензорных вычислений. Впервые исследована структура течения и аэродинамические свойства в каналах с системой ребер в квазистационарном режиме пульсирующего турбулентного течения.

4. Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные данные о характере изменения стенного трения при пульсациях расхода востребованы при проектировании теплообменников, систем охлаждения и других устройств, работающих в условиях нестационарного течения. Предложена и обоснована концепция построения высокопроизводительных алгоритмов обработки PIV-данных на основе высокоуровневых фреймворков глубокого обучения (PyTorch/CUDA) без необходимости написания низкоуровневого CUDA-кода пользователем.

5. Степень достоверности результатов:

Достоверность результатов подтверждается оценкой погрешностей измерений, высокой воспроизводимостью экспериментальных данных в исследованных режимах, а также их согласованностью с данными других авторов, установленной в ходе верификационных экспериментов.

6. На защиту выносятся:

1. Методика анализа PIV экспериментов с использованием графических процессоров.
2. Результаты экспериментального исследования динамики интегральных характеристик квазистационарного пульсирующего потока в плоском канале.
3. Результаты экспериментального исследования трения на стенке плоского канала с использованием двух различных методик: метода Клаузера и измерение тепловым датчиком трения.
4. Экспериментально полученный обобщённый динамический закон трения на стенке в турбулентном пульсирующем квазистационарном потоке в широком диапазоне чисел Рейнольдса: $5 \cdot 10^3 - 10^5$.
5. Результаты экспериментального исследования вихревой динамики в отрывном пульсирующем квазистационарном течении за ребром.

7. Личный вклад автора:

Личный вклад автора заключается в разработке, сборке и модернизации экспериментальных установок, настройке и калибровке измерительной аппаратуры, проведении экспериментов по аэродинамике пульсирующих течениях в различных геометрия, разработке программного обеспечения для обработки и интерпретации экспериментальных данных, а также в подготовке научных докладов и публикаций. Все представленные в диссертации результаты получены автором самостоятельно. Постановка задач исследования осуществлена научным руководителем — д.ф.-м.н. В.В. Тереховым.

8. Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях (в т.ч. рекомендованных ВАК):

1. Nazarov N.A., Terekhov V.V. High level GPU-accelerated 2D PIV framework in Python // Computer Physics Communications. 2024. V. 295. P. 109009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2023.109009>.
2. Назаров Н.А., Герасимов А.С., Терехов В.В., Терехов В.И. Экспериментальное исследование пульсирующего потока в прямоугольном канале // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 36. № 6. С. 1063-1069.

3. Назаров Н.А., Герасимов А.С., Леманов В.В., Стерлягов С.А., Терехов В.И. Влияние пульсаций расхода газа на касательные напряжения на стенке плоского канала // Изв. РАН. МЖГ. 2026. (Статья принята к публикации).
4. Назаров Н.А. Программа для расчета и визуализации скоростей и статистических характеристик групп частиц в сечении потока с возможностью использования GPU (Torch PIV). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669638, 21.10.2022. Заявка № 2022668760 от 07.10.2022.

9. Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. XXIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 2022 год. (устный доклад)
2. XVII Международная научно-техническая конференция Оптические методы исследования потоков, Москва, 2023 год. (устный доклад)
3. XXIV Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск, 2023 год. (устный доклад)
4. Всероссийская конференция с международным участием «XL Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 2024 год. (устный доклад)
5. XI Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, Казань, 2026 год. (устный доклад)

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

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом от 23.08.1996 г. № 127-83 «О науке и государственной научно-технической политике».

11. Решение о рекомендации к защите:

Диссертация Назарова Никиты Андреевича «Аэродинамика турбулентного пульсирующего течения в плоском канале при отрыве потока» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Настоящее заключение подготовлено на основании решения Секции Ученого совета по научному направлению

Присутствовало на заседании 13 человек, в том числе 8 докторов наук, 5 кандидатов наук.



Зам. председателя секции 2 Ученого совета ИТ СО
РАН к.ф.-м.н. Д.Ф. Сиковский

Секретарь секции 2 к.ф.-м.н. В.С. Наумкин

16 июня 2026 г.