



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Федеральное государственное
унитарное предприятие
**РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР**
Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

доктор технических наук, профессор

В.Е. Костюков

2026 г.



№ _____

На № _____

от _____

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР – ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ФИЗИКИ» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)**

Диссертация на тему «Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров» выполнена в Институте лазерно-физических исследований (ИЛФИ) Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

В период подготовки диссертации соискатель Балабина Татьяна Юрьевна работала в научно-исследовательском отделе 1354 Института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») в должности начальника научно-исследовательской группы.

В 2013 г. окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по специальности «Прикладная математика».

Удостоверение № 680 о сдаче кандидатских экзаменов по дисциплинам «История и философия науки» и «Иностранный (английский) язык» выдано 28.11.2023 г. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». Справка о сдаче кандидатского экзамена по дисциплине «Механика жидкости, газа и плазмы» выдана 28.11.2023 г. Федеральное государственное бюджетное образовательное

5979

учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Дерюгин Юрий Николаевич, работает в научно-исследовательском отделе 0813 Института теоретической и математической физики (ИТМФ) Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») в должности главный научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

1. Актуальность темы исследования

Исследования в области лазерной техники представляют большой интерес. Нарращивание мощности лазерного излучения, получение рекордных показателей по КПД, в том числе и оптимизация массогабаритных характеристик, приводит к тому, что решение априорных вопросов в лазерных системах становятся крайне актуальными. При этом вопросы, касающиеся развития лазерного направления, основываются как на задачах, в решении которых газодинамики накопили огромный опыт, так и выдвигается целый ряд новых проблем.

С увеличением мощности лазеров с замкнутым циклом потока возрастает роль газо- гидродинамического контура. Организация замкнутого контура для активной среды должна быть устроена таким образом, чтобы реализовывалась минимальная неоднородность потока в зоне генерации, которые приводят к локальным изменениям волнового фронта световой волны при ее прохождении через активную среду. Причинами изменения фазы является неоднородность потока, обусловленная как конструктивными элементами канала, так и внешним воздействием. В условиях ограничения массы и габаритов устройства возникает необходимость выравнивания потока на возможно меньшем расстоянии от места возмущения на малых размерах порядка нескольких характерных размеров канала. В качестве одного из возможных способов выравнивания профиля скорости потока могут быть использованы вставки конструктивных элементов из открытопористых материалов. Наибольший интерес представляют материалы с высокой пористостью в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления.

Таким образом, важной задачей является разработка способов нивелирования неоднородности потока от конструктивных элементов, которые формируются, попадая в зону генерации. Одним из таких способов, который рассматривается в данной работе является применение открытопористой структуры.

В настоящее время численное моделирование становится базовым методом в науке и производстве. Безусловно, оно имеет ряд преимуществ, как в изучении какого-либо физического процесса, так и в разработке конкретного изделия. Сейчас существует большое количество программных комплексов для решения конкретных инженерных задач. Благодаря постоянно возрастающей вычислительной мощности ЭВМ, методов распараллеливания задач, расчет

сложных изделий занимает все меньше времени. Однако до сих пор полное описание системы не всегда является возможной из-за построения математической модели, ограничения аппаратных ресурсов и временных затрат, которые потребуются на расчет такой системы. В то же время построение полномасштабного экспериментального макета зачастую приводит к еще большим затратам. И здесь наиболее выгодно выступает симбиоз расчетных методик и верификационных экспериментов.

Поэтому из всех приведенных фактов вытекает необходимость исследований, выполненных в настоящей диссертации.

2. Основные положения, выносимые на защиту:

1. С применением разработанного вихререзающего подхода установлен стохастический характер течения за коленом, при этом осредненные параметры показывают формирования двух зеркально симметричных вихревых структур, что согласуются с решением, полученному по RANS подходу.

2. Получены параметры вторичного течения в канале с коленом и определено его влияние на основной поток в диапазоне скоростей от 5 до 30 м/с.

3. Предложено и теоретически обосновано применение в газодинамический контур открытопористой вставки высокой пористости для выравнивания профиля скорости газодинамического потока. На данное устройство получен патент.

4. На основе моделирования течения на микроуровне проведена оценка неоднородностей потока, порождаемых открытопористой вставкой. Определены параметры фильтрационной макромодели Форхгеймера-Бринкмана и эффективного коэффициента диффузии для полномасштабного моделирования течения в газодинамическом тракте газового лазера.

5. Создана расчетная технология для описания влияния различных конструктивных элементов на пульсационные характеристики потока в полномасштабной установке газодинамического контура газового лазера.

3. Личное участие соискателя

Автором диссертации лично или при его определяющем участии выполнены:

1. непосредственном участии в постановке основных задач по теме исследования диссертации;

2. проведении численных исследований структуры потоков проектируемых конструкций начиная с формулировки математической задачи, построения расчетной и сеточных геометрий, подготовкой начальных и входных данных, проведением расчетов с последующей обработкой и интерпретацией полученных результатов;

3. непосредственном участии в постановке верификационных экспериментов, обсуждении полученных результатов и сопоставлении их с расчетными данными, калибровки расчетной технологии моделирования структуры течения в канале по экспериментальным данным;

4. апробации результатов исследования и подготовки материалов для

публикаций по выполненной работе.

Совместно с коллегами из ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева» проведена верификация и адаптация расчетной технологии к промышленным задачам.

4. Достоверность научных утверждений и выводов

Достоверность научных положений, выводов и результатов, приведенных в работе, обусловлено использованием математических моделей на основе системы полных уравнений Навье-Стокса, базирующихся на фундаментальных законах механики сплошной среды, многократно апробированных вычислительных методов для численного моделирования структуры течений, а также системных сопоставлений с экспериментальными данными, с результатами, полученными другими авторами, и с результатами расчетов на различных сетках.

Секретных сведений диссертационная работа не содержит.

5. Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и школах, таких как всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики» (Дюрсо, 2018), международная научная конференция «Дифференциальные уравнения и их приложения в математическом моделировании» (Саранск, 2023, 2025), международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Нижний Новгород, 2023), всероссийская школа по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2023), всероссийская школа-семинар НЦФМ по математическому моделированию на Супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности (Саров, 2023, 2024), международная научная молодежная школа-семинар «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (Саранск, 2022), международный научный молодежный форум «Ломоносов» (Саров, 2022), Российская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике» (Светлогорск, 2024), научно-техническая конференция «Молодежь в науке» (Саров, 2017), конференция «Вычислительная классическая и многофазная гидродинамика и термомеханика сплошной среды» (Сириус, 2024), а также на семинарах Московского государственного университета (филиал в г. Саров), Института лазерно-физических исследований ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

Некоторые результаты используются научно-исследовательской работе в рамках программы "Лаборатория молодых ученых" Министерства образования и науки РФ (задание № FSWE-2024-0003) при финансовой поддержке Национального проекта "Наука и университеты", а также в других исследовательских проектах, выполняемых при участии автора диссертации.

Данные проекты выполнялись при активном участии диссертанта.

6. Научная ценность и новизна работы

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными оригинальными результатами:

Установлен стохастический характер течения на основании моделирования вихреразрешающей моделью турбулентности, при этом осредненные параметры, соответствуют решению, полученному на основании численного моделирования по RANS подходу и осредненным значениям экспериментальных данных.

На основании численного моделирования установлено, что порожденное поле завихренности за коленом сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы и при прохождении 60% поворота канала формируется вторичное течение, которое оказывает влияние на основной поток на расстоянии равном 45 диаметрам трубы.

Предложено использование открытопористой структуры высокой пористости для снижения уровня завихренности. На основании численного моделирования подтверждено, что с использованием пористой вставки за коленом уровень завихренности резко снижается до уровня однородного потока на расстоянии менее одного диаметра трубы в диапазоне скоростей от 5 до 30 м/с. Результаты численного исследования подтверждены экспериментальными данными.

В результате численного исследования установлено, что открытопористая структура формирует пульсации, которые характеризуются размером пор, носят низкочастотный характер и затухают на расстоянии 6 диаметров поры. Крупные возмущения потока, обусловленные геометрией канала, гасятся на расстоянии 5 диаметров трубы.

7. Практическая ценность работы

Практическая значимость полученных автором результатов заключается в следующем:

Результаты численного моделирования течения в конструктивных элементах и пористых вставках могут быть использованы при разработке теплообменного, массообменного оборудования атомных и тепловых электростанций, химических производств.

Полученные результаты исследования использовались в разработке газовых проточных лазерах с замкнутым циклом. Результаты численного моделирования использовались для оптимизации отдельных элементов конструкции. На основе результатов моделирования течения через пористую вставку предложена конструкция выравнивания потока, на которую получен патент.

Разработана расчетная технология исследования структуры газодинамического потока с позиции влияния конструктивных элементов на пульсационные характеристики среды. Технология может применяться для оптимизации конструкций лазерных систем и описания структуры течения во всем тракте.

Построенные цифровые модели открытопористая структура могут быть использованы как прототипы для исследования в рамках цифровых экспериментов для изучения различных показателей потока через пористые вставки.

8. Соответствие содержания диссертации специальности

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»:

- в работе исследуются турбулентные потоки внутри канала, математическая модель которых строится на основе системы уравнений Навье-Стокса с применением RANS моделей турбулентности и вихреразрешающего подхода моделирования турбулентности, что соответствует пункту 4 «ламинарные и турбулентные течения»;

- исследовано течение газа через открытопористую структуру на разномасштабных вычислительных моделях микро- и макроуровнях. С целью получения эмпирических зависимостей описания пористой вставки проводятся исследования течения газа через пористую структуру «впрямую» на микромодели, в дальнейшем полученные коэффициенты применяются макро моделировании, где пористая вставка описывается математической моделью. Данное направление работы соответствует пункту 8 «течение жидкостей и газов в пористых средах».

9. Публикации по теме диссертации

Основные положения диссертации представлены в 12 публикациях: 4 статья в журналах, включенных в список ВАК (2 из которых входят в индекс цитирования SCOPUS и/или Web of Science), 8 работ в трудах конференций. Получено 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение.

Публикации:

Публикации в журналах, включенных в список ВАК:

1. Балабина Т.Ю., Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Некоторые результаты расчетов турбулентных течений в криволинейных каналах с использованием вихреразрешающего подхода // Журнал Средневолжского математического общества, 2024, Т. 26, № 4, С. 424-441. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202404.424-441

2. T. Yu. Balabina and Yu. N. Deryugin Multiscale modeling of gas dynamic flow characteristics through open-pored media // Lobachevskii Journal of Mathematics, 2025, Vol. 46, No. 5, pp. 2312–2324 DOI: 10.1134/S1995080225607192

3. Балабина Т.Ю., Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальное исследование применения открытопористых структур высокой пористости для выравнивания профиля турбулентного потока // Сибирские электронные математически известия, 2025, том 22, № 1, стр. 465-478 DOI: /10.33048/semi.2025.22.031

4. Балабина Т.Ю. К вопросу о методах построения расчетных моделей пористых структур, применяемых в ядерных и изотопных установках, и оценке их неоднородности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №4. С. 42-53. DOI:10.46960/1816-210X_2021_4_43

Свидетельство о регистрации патента на изобретение:

Тимаев Д.С., Рогачев В.Г., Кудряшов Е.А, Балабина Т.Ю. и др. Устройство для выравнивания профиля скоростей потока жидкости или газа от 30.09.2021 г. № 2020131886

Диссертация соответствует п.14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»: использование чужого материала без ссылок на автора или без ссылок на источник заимствования материалов или отдельных результатов, результатов научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, без ссылок на соавторов, не выявлено. Приоритетных претензий на предзащите диссертации высказано не было.

Диссертация Балабиной Татьяны Юрьевны «Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров» **рекомендуется к защите** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» на базе диссертационного совета 24.1.237.01 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им.М.В. Келдыша РАН»

Заключение принято на заседании НТС в Институте лазерно-физический исследований (ИЛФИ) Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») № 26-10 протокол от 05.03.2026 № 195-96/7353-ПР.

Присутствовали на заседании 17 членов НТС ИЛФИ, из них 1 академик РАН, 5 докторов физико-математических наук, 2 доктора технических наук, 4 кандидата физико-математических наук, 1 кандидат технических наук, а также 18 специалистов по теме диссертации (2 доктора физико-математических наук, 7 кандидатов физико-математических наук, 1 кандидат технических наук).

Результаты тайного голосования: «за» – 17, «против» – 0, «воздержались» – 0 (протокол от 05.03.2026 № 195-96/7353-ПР).

Председатель НТС ИЛФИ
Генеральный конструктор по лазерным системам, заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ по лазерно-физическому направлению, директор ИЛФИ, доктор физико-математических наук, академик РАН

С.Г. Гаранин

Секретарь НТС ИЛФИ
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,
Начальник НИО 1316-1

Н.А. Зарецкий

Балабина Татьяна Юрьевна
8(83130) 2-26-09