

На правах рукописи



Балабина Татьяна Юрьевна

**СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКА
ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ
КОНТУРЕ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

Специальность 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саров – 2026

Работа выполнена в Институте лазерно-физических исследований
Федерального государственного унитарного предприятия «Российский
федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики»

Научный руководитель: **Дерюгин Юрий Николаевич,**
доктор физико-математических наук, главный
научный сотрудник, ФГУП «Российский
федеральный ядерный центр - Всероссийский
научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»

Официальные оппоненты: **Вельмисов Петр Александрович,**
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
технический университет», профессор кафедры
«Высшая математика»
Храмченков Максим Георгиевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
НИЦ «Курчатовский институт», ведущий
научный сотрудник

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого»

Защита диссертации состоится « 10 » сентября 2026 г. в 11 ч. 00 мин. на
заседании диссертационного совета 24.1.237.01, созданного на базе ИПМ им. М.В.
Келдыша РАН, расположенного по адресу: 125047, г. Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМ им. М.В.
Келдыша РАН <http://keldysh.ru/council/3/D00202403/defence3.htm>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.237.01
кандидат физико-математических наук



Корнилина М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последнее время исследования в области лазерной техники представляют большой интерес. Наращивание 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 [1].

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 предлагается использовать вставки конструктивных элементов из открытопористых материалов. Наибольший интерес представляют материалы с высокой пористостью в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления [2].

Экспериментальная отработка применимости открытопористых структур для нивелирования неоднородности потока требует использование высокоточной диагностической аппаратуры, что в свою очередь связано с большими затратами. Кроме того, при такой постановке экспериментальные данные будут малоинформативны, в связи с этим актуальной задачей является применение методов математического моделирования в исследовании структуры потока в газодинамическом контуре газовых лазеров и метода ламинаризации этого потока.

Степень разработанности темы диссертации:

Рассматривая задачу выравнивания неоднородности потока, следует учитывать, что каждый источник генерации возмущений порождает определенный вид неоднородности. То есть первоочередной задачей является получение представления о формировании той или иной неоднородности, которая порождается характерными элементами конструкции, и на какое расстояние оказывает свое влияние на структуру потока.

В конструировании газодинамического контура замкнутого цикла характерным элементом выступает поворот канала. Повороты каналов (так называемое «колено») являются важной частью любой трубопроводной конструкции, поскольку они обеспечивают гибкость системы. Исследования течения в колене имеют большое значение для понимания и улучшения их

характеристик и минимизации потерь. Хорошо известно, что течение несжимаемых вязких жидкостей в криволинейных каналах характеризуется не стационарностью, отрывом потока, приводящее к образованию вторичного течения, которые зависят от числа Re , а также радиуса кривизны поворота канала.

Качество лазерного излучения напрямую зависит от оптических неоднородностей, которые формируются из многих факторов. Для проточных лазеров одним из таких факторов является качество прокачиваемой среды. В работах [3,4] показано влияние турбулентных пульсаций газового потока на характеристики волнового фронта и угловую расходимость излучения. При конструировании канала для прокачки активной среды уделялось внимание вопросу минимизации турбулентности в потоке. Наиболее распространенным видом конструкции ликвидации турбулентности использовался сопловой аппарат, который делил канал на части, тем самым распределяя поток равномерно по сечению и рассеивая турбулентные пульсации больших масштабов. В работе [5] показано, что мелкомасштабные пульсации, образующиеся после конструкции из плоскопараллельных пластин, которые используются в качестве ламинаризатора, приводят к изменению интерферометрической картины излучения, что приводит к рефракционным потерям излучения.

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.

Цель диссертационной работы:

Целью диссертационной работы является исследование структуры потока в типичных элементах конструкции газового лазера замкнутого цикла с применением открытопористых структур для минимизации неоднородностей в течении на рабочих участках.

Для достижения цели автором необходимо было решить следующие **задачи**:

- 1 На основе обзора литературы по проблемам газодинамических лазерных установок и методам моделирования течения в каналах сформулировать математические постановки задач для описания турбулентного течения в каналах с открытопористыми структурами. Рассмотреть вопросы о методах для снижения неоднородностей в газодинамическом контуре.

- 2 Провести численные исследование влияния характерных элементов конструкции проточного лазера с замкнутым циклом на структуру течения с

применением различных подходов описания турбулентности. Выполнить сопоставления численных результатов с данными эксперимента. Сделать оценку влияния характерных элементов конструкции на однородность течения.

3 Рассмотреть вопрос выравнивания профиля скорости потока с помощью открытопористой структуры. Исследовать течение газа в пористой вставке на микроуровне. Сделать обзор возможных принципов построения цифровых моделей пористой вставки в микромасштабе с оценкой качества полученных моделей. На основании численного эксперимента определить характеристики пористой среды для моделирования в макромасштабе.

4 Разработать расчетную технологию полномасштабного моделирования течения в канале проточного лазера с пористыми вставками.

Научная новизна работы

1 Установление стохастического характера 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.

2 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.

3 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.

4 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.

5 Результаты проведенных исследований использовались в разработке и оптимизации элементов конструкции проточных газовых лазерах с замкнутым циклом, что позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики конструкции газодинамического лазера.

Положения, выносимые на защиту

1. С применением разработанного вихреразрешающего подхода установлен стохастический характер течения за коленом, при этом осредненные параметры показывают формирования двух зеркально симметричных вихревых структур, что согласуется 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 макромоделей 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.

Практическая значимость работы

Практическая значимость полученных автором результатов заключается в следующем:

Полученные результаты исследования использовались в разработке газовых проточных лазерах с замкнутым циклом. Результаты численного моделирования применялись для оптимизации отдельных элементов конструкции. На основе результатов моделирования течения через пористую вставку предложена конструкция выравнивания потока, на которую получен патент [Б5].

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

Построенные цифровые модели открытопористой структуры (ОПС) используются как прототипы для исследования в рамках цифровых экспериментов для изучения различных показателей потока через пористые вставки.

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

Соответствие паспорту 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 системе уравнений Навье-Стокса с применением RANS моделей турбулентности и вихреразрешающего подхода моделирования турбулентности, что соответствует пункту 4 «ламинарные и турбулентные течения»;

- адаптировано применение разномасштабных вычислительных экспериментов: с целью получения эмпирических зависимостей описания пористой вставки проводятся исследования течения газа через пористую структуру «впрямую» на микромоделях, в дальнейшем полученные коэффициенты участвуют в полномасштабном моделировании, где пористая вставка описывается математической моделью. Данное направление работы соответствует пункту 8

«течение жидкостей и газов в пористых средах».

Достоверность полученных результатов

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.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях и школах, таких 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).

Результаты диссертации докладывались на семинарах Московского государственного университета (филиал в г. Саров), Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 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.

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 13 работах, из которых 4 — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и/или входящих в мировые индексы цитирования (SCOPUS, Web of Science) [B1-B4], 9 — в сборниках трудов конференций, получено 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение.

Личный вклад автора заключается в:

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

Структура и объем работы

Полный объем работы диссертации составляет 148 страниц, включая 80 рисунков и 4 таблицы, ссылается на 140 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются основные цели и задачи исследования.

Первая глава посвящена постановке задачи, направлению исследований и обзору литературы по теме диссертации включающих описание различных подходов к моделированию нестационарных течений в канале, в том числе и с пористыми вставками. Представлено описание основных уравнений (системы уравнений Навье-Стокса), описание наиболее часто используемых моделей турбулентности, которыми замыкается система, SA и SST. Рассмотрены RANS и вихреразрешающие подходы к моделированию турбулентных течений. Приводятся свойства пористых сред и их зависимости. Рассмотрены различные подходы к моделированию течений в пористых вставках. Показаны особенности модификации уравнений для расчета течения в пористой вставке.

В **п. 1.1** приводятся проблемы газодинамического лазера с замкнутым контуром.

Наиболее сильно неоднородности плотности сказываются на характеристиках излучения лазеров, работающих при достаточно высоких давлениях газа в активной зоне. Изменение фазы излучения $\Delta\phi$ связано с изменением плотности среды $\Delta\rho$ соотношением [1]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} h A_{\text{component}} \frac{\Delta\rho}{\rho_s} \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения, h – ширина потока, $A_{\text{component}}$ – постоянная Глэдстона-Дейла, ρ_s – плотность среды при нормальных условиях.

В свою очередь пульсации плотности напрямую зависят от пульсаций скорости. Это связано с тем, что в проточном лазере с замкнутым циклом объем

газа в процессе работы системы не меняется. Скорость прокачки газа в канале много меньше скорости звука, поэтому изменение плотности (при условии отсутствия стороннего нагрева) напрямую связано с изменением пульсации скорости, т.е.:

$$Q = \rho u s \Rightarrow (\bar{\rho} + \rho')(\bar{u} + u')s \Rightarrow \rho' \approx u' \frac{\bar{\rho}}{\bar{u}} \quad (2)$$

В отсутствии нагрева поток активной среды, протекающий через кювету в рабочем режиме, не вносит видимых искажений в плоский волновой фронт зондирующего лазера. Однако при нагреве лазерной кюветы до рабочих температур концентрация паров активных атомов в среде значительно возрастает, что приводит к тому, что возрастает величина неоднородностей потока активной среды. Из этого можно сделать вывод, что аберрации вызваны совокупностью двух факторов – тепловыми неоднородностями и наличием турбулентности в потоке с активной средой [6]. Стороннего источника нагрева автором в работе не рассматривается.

Поэтому понижение уровня неоднородностей потока в активной зоне является одной из основных проблем, возникающих при создании лазерных устройств. Т.е. необходимо применение устройств, которые на минимальном расстоянии эффективно выравнивали поток. Таким устройством может послужить конструкции из пористых структур.

В п. 1.2 рассмотрены подходы к моделированию течений в каналах с пористыми вставками. В общей постановке математическая модель достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Поэтому вводятся различного рода допущения и эмпирические зависимости для коэффициентов переноса, входящих в уравнения и граничные условия.

Использование современных математических моделей, современных компьютерных технологий и методов анализа позволяет по-новому взглянуть на сложные процессы, протекающие в пористых средах.

Заметным ограничением при проведении численного моделирования течения через пористую среду являются ресурсные возможности, которыми располагает разработчик. Как правило, возникает потребность в структурировании функционального исследования и соответствующего разделения объекта исследования на части. Такая позиция функционального разграничения исследования позволяет распределять и распараллеливать работу над сложной системой объектов, что способствует эффективности и производительности труда разработчиков.

В настоящее время предложено несколько подходов классификаций масштабов исследования структур. В данной работе рассмотрен подход разбиения функциональных моделей на три масштаба: микро-, макро- и метауровни.

В п. 1.3 приводится обзор литературы по физическим свойствам пористых сред и методах их исследования.

На сегодняшний день отсутствует универсальная методика для описания детальных свойств пористой среды. Пористое тело отличается по материалу, структуре, по способу происхождения и т.д. Поэтому, как правило, решение задачи течения газа через пористую среду в рамках исследования макромоделей касается

конкретных образцов или категорий.

При описании крупномасштабных явлений пористый материал рассматривается как сплошная среда, характеристики которой в каждой точке получаются в результате осреднения в некоторой окрестности, содержащей достаточно большое количество пор. Величина пористости, размер пор, распределение пор в пространстве и их форма обуславливают такие важнейшие свойства, как прочность, электро- и теплопроводность, гидравлическая прочность, фильтрационные характеристики и т.д. [7].

С позиции исследования газодинамических характеристик течения через пористое тело анализ описания пористой среды проводился по таким характеристикам как пористость, характерный размер пор, извилистость, проницаемость.

В п. 1.4 приводятся модели описания пористых сред. Основной акцент анализа литературы смещен в сторону модели Дарси и Форхгеймера-Бринкмана.

Закон Дарси выражается следующим образом:

$$-\nabla p = \frac{\mu u_\phi}{K}, \quad (3)$$

где u_ϕ – скорость фильтрации, p – давление, K – проницаемость среды, μ – вязкость.

Главная особенность закона Дарси, что его применение сохраняется только в определенной области скоростей фильтрации, вне которой должны быть использованы более общие уравнения течения. В средах с высокой пористостью и проницаемостью или при больших градиентах давления, линейный закон фильтрации не выполняется ввиду усложнения конфигурации течения на микроскопическом уровне [6].

За счет явлений отрыва и струйных эффектов в переходном и турбулентных режимах течения зависимость градиента давления от скорости приближается к квадратичной:

$$\frac{\Delta P(u)}{\Delta l} = \tilde{A}u + \tilde{B}u^2 \quad (4)$$

где u – скорость потока, $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ – размерные вязкостной и инерционный коэффициенты сопротивления пористого тела, найденные с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Их величина не зависит от свойств жидкости.

В пп. 1.5 и 1.6 приведены математические модели для описания турбулентных и фильтрационных течений и применение математического моделирования для описания течений в пористых структурах.

Математическая модель, используемая для описания турбулентных течений газа в криволинейном канале, состоит из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и уравнений модели турбулентности [8,9]. Для несжимаемого газа уравнения Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier-Stocks или RANS) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \bar{u} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \nabla) \cdot \bar{u} &= -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t), \end{aligned} \quad (5)$$

здесь $\bar{u}$ – вектор скорости осредненного течения, τ_m и τ_t молекулярная и турбулентная составляющие тензора касательных напряжений.

При описании турбулентных течений в рамках подхода Рейнольдса, для замыкания уравнений используются ряд дифференциальных моделей турбулентности, среди которых две модели, которые нашли наибольшее применение в численном анализе, это: однопараметрическая модель SA [10] Спаларта-Аллмареса и двухпараметрическая модель SST [11] Ментера. В настоящее время для расчета потоков с пристенной турбулентностью развиваются вихреразрешающие модели, которые позволяют увеличить разрешающую способность моделирования турбулентных течений и получать более адекватные результаты.

Далее в параграфе приведено описание вышеуказанных моделей и их особенности применения.

В рамках макроподхода, в области, где среда имеет пористую структуру, для описания течения газа используются уравнения Бринкмана-Форшгеймера, которые имеют следующий вид:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

и уравнения сохранения импульсов

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho(\alpha_x |V| + \beta_x)u + \nu \nabla^2 u \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho(\alpha_y |V| + \beta_y)v + \nu \nabla^2 v, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho(\alpha_z |V| + \beta_z)w + \nu \nabla^2 w, \end{aligned} \quad (7)$$

здесь u, v, w – компоненты фильтрационной скорости, α_i, β_i – компоненты тензоров сопротивления пористого тела.

Уравнение теплопереноса в форме Кирхгофа относительно температуры T :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = -\frac{\partial q_{T,j}}{\partial x_j} \quad (8)$$

Во **второй главе** приводятся результаты численного исследования структуры турбулентных потоков в основном конструкционном элементе, которым является колено. Для него построены сеточные модели, отвечающие подходам моделирования турбулентности: подходы, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS), замкнутых с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности, а также вихреразрешающий, в частности, метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES). Расчеты течений были выполнены как в стационарной, так и нестационарной постановках по комплексу «ЛОГОС» [12] на параллельном суперкомпьютере. Из анализа полученных результатов делается вывод о том, что осредненные параметры потока в нестационарной постановке с использованием зонного RANS-LES перехода в модели турбулентности [13] качественно и количественно лучше совпадает с экспериментальными данными, чем результаты стационарных расчетов, основанные на использовании RANS подхода. Верификация численной методики проводилась экспериментальными данным, которые были получены на

аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [14]. Количественным критерием влияния конструкционных изменений на однородность потока является уровень завихренности.

В пп. 2.1 и 2.2 приводится постановка задачи и описаны сеточные модели, подходы и методы решения, используемые для моделирования.

Рассматривается задача о структуре турбулентного течения воздушного потока за коленом и определении расстояния, на котором затухают возмущения, вызванные поворотом потока. Исследуемая конструкция состоит из прямолинейного участка трубы длиной 20 калибров, поворота на угол 90 градусов (так называемое «колесо») и последующего прямолинейного участка трубы длиной 100 калибров.

В пп.2.3 и 2.4 приведены результаты численного моделирования на основе RANS и вихреразрешающего подходов.

На вход в канал поток формируется с помощью компрессора и имеет неоднородности в компонентах скорости и, соответственно, в турбулентных параметрах. Для оценки влияния неоднородностей были проведены расчеты в RANS постановке для различного уровня задания начальных возмущений. В этих расчетах компоненты вектора скорости на входе в цилиндрической системе координат определялись зависимостями:

$$u = u_m + \Delta u \cos\left(\pi \frac{r}{d} n\right), \quad (9)$$

$$v = \Delta u \sin\left(\pi \frac{r}{d} n\right).$$

где n - полагалась равной 10, а Δu - определялось через заданную величину интенсивности $(T_t)_{in}$ по формуле:

$$\Delta u = \sqrt{3 / 2 (T_t)_{in}^2 u_m} \quad (10)$$

Значение u_0 - задавалось из условия, что средняя скорость на входе в канал равна заданной скорости потока u_{in} .

На рисунке 1 показаны расчетные и экспериментальные распределения маршевой компоненты скорости в рассматриваемом сечении. На этом же рисунке приведены значения уровней начальных возмущений, при которых получено наилучшее согласие расчета с экспериментом по распределению маршевой скорости и формы области вторичного течения. Отметим, что экспериментальная картограмма была получена по 200 точкам, в которых производился сбор данных, а расчетное поле течения построено по 3600 точкам, которые приходились на одно сечение. Здесь и далее в качестве относительной скорости использована величина, равная отношению расходной составляющей скорости к средней расходной скорости u_{in} . Среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 13%.

Приведем теперь результаты, полученные при использовании, вихреразрешающего зонного RANS-LES подхода. Здесь, нестационарное моделирование турбулентного течения за коленом, было выполнено в два этапа. На первом этапе на сетке, построенной для RANS-LES подхода, был проведен расчет стационарного течения в RANS постановке. С полученных результатов был

продолжен расчет течения в нестационарной постановке, в котором на входе в зону RANS-LES задавалась генерация синтетической турбулентности. Поскольку сбор данных для последующей обработки в экспериментах производился в каждой точке в течение 2 секунд, то нестационарный расчет также был выполнен до того же времени.

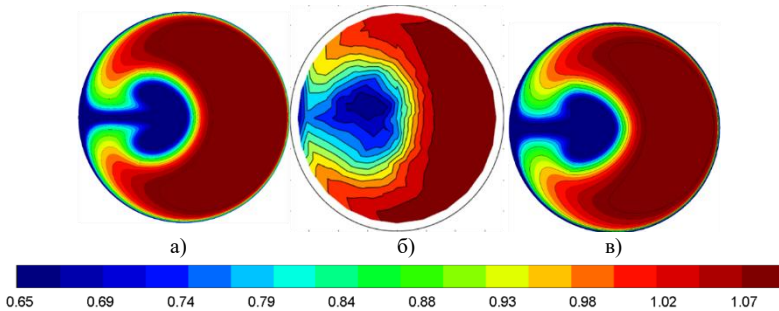


Рис. 1. Сравнительный анализ численных расчетов с данными эксперимента.
а) модель турбулентности SA при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм, б) эксперимент, в) модель турбулентности SST при начальной интенсивности 10% и масштабом турбулентности 5 мм

На рисунке 2 приводится сравнительный анализ экспериментального и осредненного распределения маршевой компоненты вектора скорости в сечении сбора информации. Здесь среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 4,9%, что говорит о лучшем согласии результатов расчета с данными эксперимента.

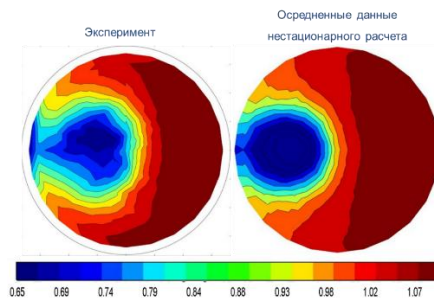


Рис. 2. Сравнительный анализ численных расчетов с данными эксперимента

В п. 2.5 приведена оценка влияния колена на однородность течения. В качестве оценочных параметров рассматривается поле модуля скорости в продольном и поперечных сечениях, профили расходной составляющей скорости в поперечных сечениях, точечное исследование траектории частиц, выходящих из-за поворота. Так как анализируемое течение является сугубо турбулентным, в исследовании рассматривается осредненный показатель модуля завихренности.

В следствие искривления потока по форме канала появляются центробежные силы, повышающее статическое давление потока от центра

кривизны, что приводит к перепаду давления по сечению трубы и, соответственно, изменению скорости. В области у внешней стенки формируется вторичное течение, где вектор скорости сильнее направлен к внешней поверхности канала. Образуется вторичное течение, за счет увеличения масштаба турбулентности и силы трения по мере движения потока увеличивается в размерах и оттесняет к внутренней стенке центральную часть потока, которая имеет максимальную скорость и малые масштабы турбулентности. При дальнейшем движении, за счет увеличения масштаба турбулентности и трения на внутренней поверхности канала за коленом, происходит образование вторичного течения, которое оттесняет поток к внешней поверхности. В следствие этого, за поворотом поток с максимальной скоростью занимает большую площадь у вогнутой поверхности, поглощая область вторичного течения у выпуклой поверхности.

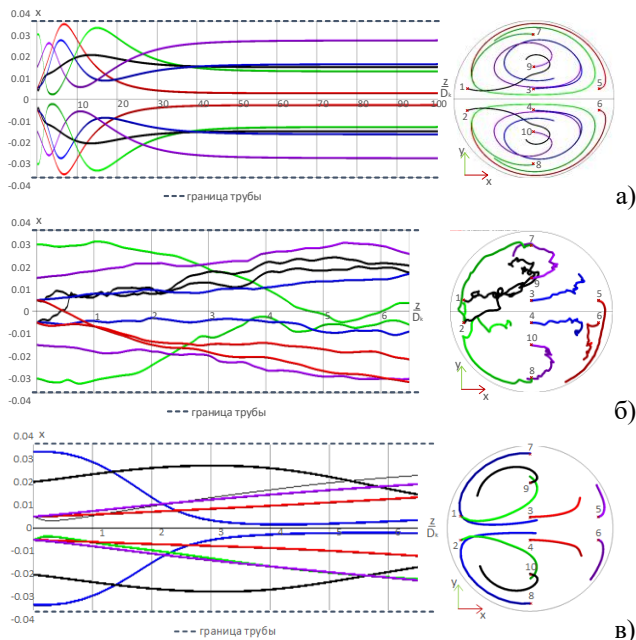


Рис. 3. Сравнительный анализ траекторий движения для RANS (а), вихреразрешающего (б) и осредненные по времени показатели в вихреразрешающем (в) подходов

Полученные результаты показывают, что на входе в зону поворота основной поток проходит по наименьшей траектории, образуя повышение скорости в области внутренней стенки, а плавное скругление внешней стенки канала минимизирует образование вихревой зоны. Относительно выхода из зоны поворота наблюдается образование большой вихревой зоны, которая приводит к закручиванию потока.

На рисунке 3(а) представлены траектории движения по RANS подходу указывают на симметричность картины течения относительно центральной плоскости, образуя два зеркально симметричных вихревых движения. В реальной

жизни система ведет себя не симметрично, но осредненные по времени траектории частиц имеют схожую структуру, что и в RANS. Данное явление показано на рисунке 3(б, в).

В п. 2.6 подводятся основные итоги второй главы.

В третьей главе представлены результаты исследования течения на микроуровне в каналах с пористыми вставками. Объектом исследования стал фрагмент пористой структуры из сетчатого материала (ПСМ). Приводятся принципы построения геометрической модели пористой структуры, а также оценка неоднородности образца. Моделирование на микроуровне позволило получить фильтрационные характеристики пористой вставки. Эти характеристики были использованы для описания модели на макроуровне. Проводится оценка формирующихся пульсаций, которые порождаются за пористой структурой, и их затухание с использованием спектрального анализа возмущений. Показана применимость полученных характеристик пористой вставки на микроуровне в полномасштабных расчетах макроуровня с применением описания модели пористой вставки на основе уравнений Форхгеймера-Бринкмана. Рассмотрено влияние пористого тела на диффузионное перемешивание двух компонент потока на микроуровне.

В п.3.1 и 3.2 постановка задачи исследования процесса ламинаризации и диффузионного перемешивания потока, содержащего пористую вставку. Исследование в данной главе основано на использовании методов сквозного счета пористой структуры в микро и макро-масштабах.

Критически важным аспектом при решении задач на микроуровне является точность построения расчетной сетки, которая в свою очередь зависит не только от критериев выбора сеточного разрешения, но и от адекватности построения геометрического каркаса исследуемого объекта. В зависимости от сложности исследуемого объекта построение геометрического каркаса проводится с помощью либо штатных модулей комплекса инженерных расчетов, либо с использованием специализированных CAD-пакетов.

Далее в работе описывается методика построения сеточных каркасов в различных CAD-пакетах. Изначально к анализу были представлены построены два образца:

- образец 1 - пористая вставка типа ПСМ, выполненная из сеток с последующим развернутым на угол 45° относительно предыдущего;
- образец 2 - пористая вставка типа ПСМ, выполненная из сеток с развернутым вторым слоем на угол 45° и попарно смещенные слои на $\frac{1}{2}$ шага вбок, вниз;

После построений образцов, был проведен сопоставительный анализ достоверности полученных 3D моделей с экспериментальным образцом. Анализ проводится на основе вычисления коэффициента пористости относительно площади входного и выходного сечений с последующим вычислением объема содержания ячейки и определения отклонения от экспериментального образца, представленного на рисунке 4. Экспериментальный образец оценивался путем просвечивания рентгеном с последующей обработкой результата по оценке пористости.

Из рисунка 4 видно, что экспериментальный образец и образец 2 имеют схожую структуру показателей. Значения показателя пористости расположены в интервале 0,7 до 0,92. Ширина на полувысоте для экспериментального образца 1 составила 0,56, для образца 2 – 0,24. Последующее исследование газодинамических характеристик проводило на основе образца 2.

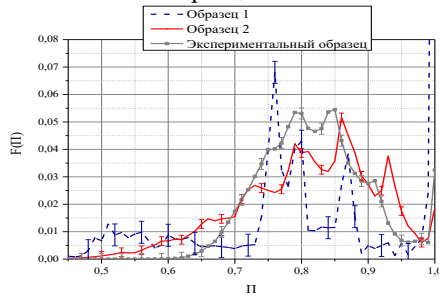


Рис. 4. Распределение плотности вероятности пористости по экспериментальному образцу и 3D моделей образца 1 и образца 2

В п.3.3 описаны сеточные модели для расчетов течений на микроуровне.

Для построения полномасштабной модели открытопористой вставки потребуется более миллиарда ячеек, поэтому исследование проводилось поэтапно и на фрагменте. Исследование характера течения газа через открытопористую структуру были разделены на две задачи:

1 Моделирование течения через пористую структуру и получение профиля скорости на выходе из ОПС.

2 Моделирование спутного следа и исследование процесса затухания порожденных открытопористой структурой вихрей.

Для построения сеточной модели описания течения в пористой вставке используется сеткопостроитель комплекса ЛОГОС.

Для первой постановки построение призматического слоя требуется внутри области пористой структуры. Начальный размер призматического слоя около жесткой стенки скелета пористой вставки полагался равным 1 мкм, а сгущение проводилось по восьми призматическим слоям. Подобного количества слоев достаточно для обеспечения расчета пограничного слоя около каркаса пористой вставки, а также обеспечение качественного перехода к основному ядру потока.

Сеточное разрешение в области основного потока выбирается из возможности адекватного описания каналов внутренней структуры. Масштаб ячейки в области основного потока полагался равным – 12,5 мкм. Таким образом количество ячеек в расчетной сетке для моделирования течения через пористую структуру составило $\sim 6,8 \times 10^7$.

Вторая постановка включает в себя исследование спутного следа и исследование процесса затухания вихрей, порожденных открытопористой структурой. Исследование проводилось на расчетной геометрии, которая представляет собой параллелепипед, где входная граница имеет такие же размеры, как и выходная граница в задаче моделирования течения через пористую вставку.

Длина параллелепипеда составляет 100 калибров. Сеточное разрешение представлено в двух уровнях 12 калибров покрыты сектой в 12,5 мкм, остальная часть сеткой в 100 мкм. Таким образом количество ячеек в модели составило 94×10^6 .

В п. 3.4 приведены результаты течения газа через пористую вставку на микроуровне. Основной зависимостью, определяющей режим течения газа в пористой вставке, принято считать связь между скоростью движения жидкости в порах и градиентом давления в пористой среде. Оценивая зависимость отношения градиента давления к толщине пористой вставки от скорости потока выявлена нелинейная зависимость, что означает отклонение от ламинарного режима течения.

Помимо общих характеристик пористого тела не менее значимыми показателями являются градиенты скорости, траектории движения газа в самом пористом теле. Данные показатели являются ключевыми для получения характеристик пористой среды таких как эффективный коэффициент диффузии, а также вязкостной и инерционных коэффициенты.

Преимущество моделирования на микроуровне заключается в подробном моделировании структуры и наглядной демонстрации распределений компонент вектора скорости внутри модели пористого тела (рисунок 5). Из анализа структуры течения установлено, что в области пористой вставки в исследуемом диапазоне скоростей течение имеет пульсационный характер. За пористой вставкой относительные характеристики потока линейно возрастают с увеличением скоростного напора. В тоже время пульсации набегающего потока перед пористой вставкой с увеличением скорости уменьшаются.

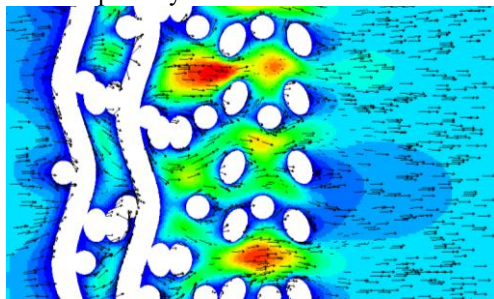


Рис.5. Векторное поле на фрагменте пористой вставки (расчет в ЛОГОС при н.у.)

В п. 3.5 приведены результаты моделирования спутного следа за пористой вставкой. Целью подобного исследования является определение расстояния, на котором затухают неоднородности возникающие от пористой вставки. Оценка такого рода проводилась на основе изменения отношения маршевой и поперечных компонент вектора скорости к входной в зависимости от расстояния, отсчитанного от пористой вставки. Анализ показал, что значительный спад градиента скорости для всех вариантов наблюдается на первых 5 калибрах.

Также был проведен анализ амплитудно-частотных характеристик для маршевой и поперечных компонент скорости, который показал, что спектр неоднородности за пористой вставкой описывается низкочастотными характеристиками. Для исследуемого диапазона скоростей установлено, что на

расстоянии одного калибра амплитуда частот существенно снижается.

Преимущество численного исследования на микроуровне – наглядная демонстрация пульсаций, которые возникают в потоке и их влияние вниз по потоку. Полученные результаты расчета показывают, что пульсации, возникающие в потоке за счет пористой вставки, затухают на существенно малом расстоянии, т.е. при моделировании полномасштабных конструкций данным видом неоднородности можно пренебречь.

В п.3.6. приведены результаты моделирования структуры потока с пористой вставкой на макроуровне. Для оценки влияния пористой вставки на неоднородный турбулентный поток целесообразно использовать моделирование в макромасштабе с использованием математической модели описания пористого тела на основе фильтрационного уравнения (4), в котором применяется осредненные показатели характеристик пористого тела.

В качестве неоднородности потока использовался профиль скорости течения за коленом, рассмотренный в главе 2.

Полученные результаты показали, что градиент скорости существенно снижается за пористой вставкой. На рисунке 6 показан график отношения модуля скорости к массовой (K_{mass}) по оси симметрии на расстоянии одного характерного диаметра для моделей с пористым регионом и без него, согласно которому видно, что пористая вставка существенно выравнивает поток. Загибы графиков к значениям $-d_x/2$ и $d_x/2$ по оси абсцисс обусловлены наличием пограничного слоя.

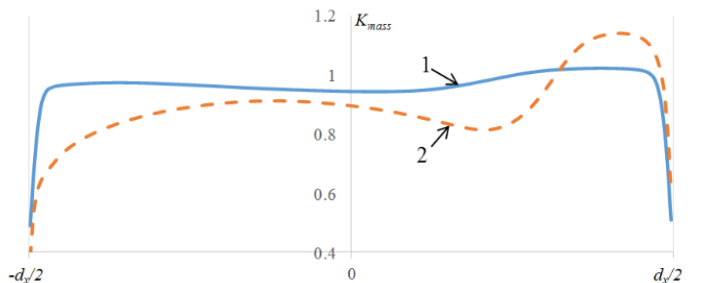


Рис. 6. График распределения K_{mass} по оси симметрии на расстоянии одного характерного диаметра для расчетов с пористым регионом (1) и без него (2)

В п.3.7 приведены результаты исследования диффузионного перемешивания потоков на микроуровне в пористой вставке.

Процесс перемешивания в пористой вставке происходит интенсивнее. За счет сложной структуры каналов, на выходе из пористой вставки пассивная примесь имеет сложную хаотичную форму пятна (рисунок 7). За счет решения задачи в стационарной постановке, линии тока соответствуют траекториям движения частиц через пористую вставку.

В работе представлены результаты размытия пигмента в потоке на больших толщинах пористой вставки. Для организации такого исследования использовалась разбивка модели с последующим переносом выходных данных из предыдущего расчета на входную границу. Таким образом было проведено 10 расчетов с

суммарной толщиной пористой вставки 2 см, содержащей 80 слоев сетки.

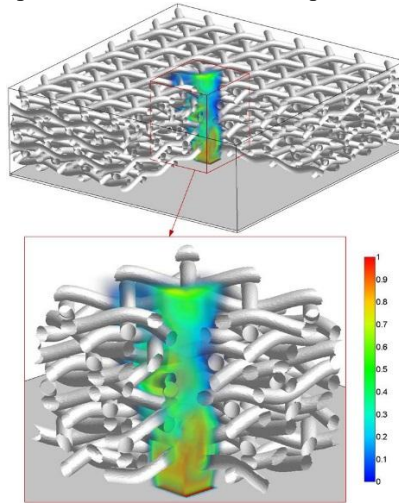


Рис. 7. Трехмерное распределение пассивной примеси в области пористой вставки в относительных единицах

На основании проведенных расчетов делается вывод, что поток, проходя через пористую вставку приобретает хаотичную форму и с увеличением количества слоев сетки в пористой вставке происходит его смещение, то есть центр струи смещается. Это говорит о том, что диффузия в пористой вставке имеет анизотропный характер, который определяется структурой пористой вставки, и должен определяться тензором коэффициента диффузии. Однако учесть эту анизотропию весьма проблематично для рассматриваемой геометрии пористой вставки.

В п. 3.8 суммированы результаты третьей главе.

В четвертой главе описывается технология моделирования течения для проведения подобного класса задач. Данный раздел является неким под итогом все проведенной работы в рамках данной диссертации. Показаны особенности выбранных подходов.

В п. 4.2 на примере конструкции теплообменника проточного газодинамического лазера с пористой вставкой и без нее, показано применение расчетной технологии. Полученные данные численного моделирования для разных чисел Рейнольдса верифицируются экспериментальными данными. Экспериментальные данные для расчета также были получены на аэродинамическом стенде ФТ-18 на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева [11].

Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета проводился по двум контрольным сечениям. На рисунке 8 показаны результаты в контрольном сечении за конфузоре стационарного расчета по RANS подходу и осредненные характеристики нестационарного режима счета вихреразрешающего подхода, а также экспериментальные данные при начальной скорости потока 20 м/с. По результатам анализа установлено, что основные характеристики потока

качественно совпадают, наиболее близкие к экспериментальным являются результаты с использованием вихреразрешающего подхода.

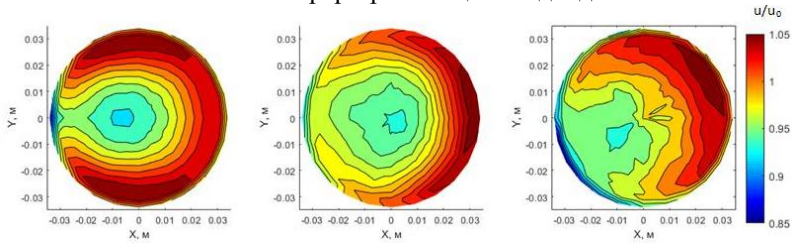


Рис. 8. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за конфузорм

На рисунке 9 приводится сравнение результатов расчетов течения в конструкции теплообменника с пористой вставкой с экспериментальными результатами. Из качественного сопоставления структуры потока и количественных различий делается вывод, что лучшее согласование с экспериментальными данными показывает вихреразрешающий подход, чем RANS постановка.

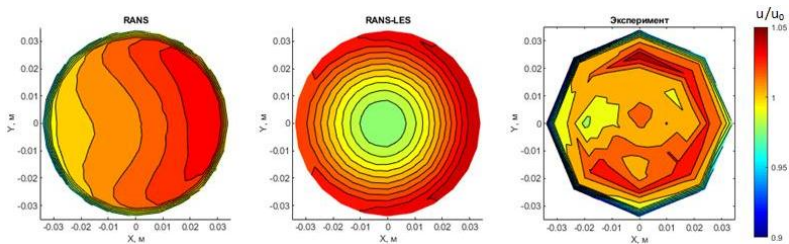


Рис. 9. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за теплообменником с учетом пористой вставки

Количественной оценкой неоднородности потока использовалось изменение модуля завихренности по потоку, рассчитанного по формуле:

$$\Omega = \frac{\int \text{rot } u \, ds}{ds} \cdot \frac{d_x}{u} \quad (12)$$

где $\bar{u} = \int u \, ds / ds$.

На рисунке 10 представлены графики изменения модуля завихренности в теплообменнике между двумя экспериментальными сечениями. Из графика видно, что в RANS постановках уровень завихренности существенно ниже за счет осредненных значений пульсаций в расчете. В то же время применение пористой вставки приводит к торможению потока и увеличению уровня завихренности вблизи нее. Более реалистичная картина описания турбулентности представлена в вихреразрешающем подходе. Моделирование турбулентных пульсаций в пористой вставке не происходит в силу наличия пористого скелета, поэтому уровень завихренности снижается до уровня расчета как в RANS.

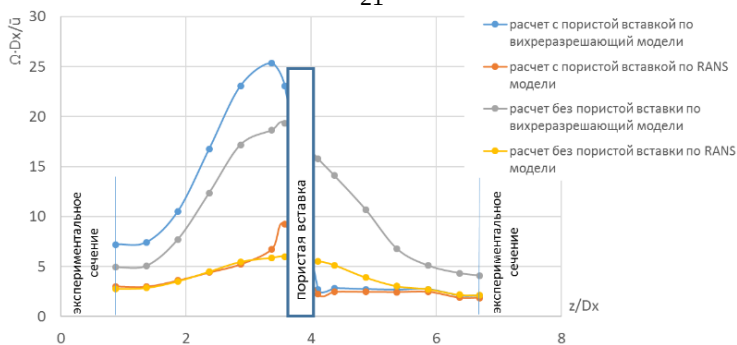


Рис. 10. График изменения уровня завихренности между экспериментальными сечениями

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе, которые можно сформулировать следующим образом:

1 Численно исследована структура потока в газодинамическом контуре на основе вихререзающего подхода. Анализ результатов показывает, что течение принимает стохастический характер, при котором, происходит перемешивание по всему сечению канала. В тоже время осредненные характеристики линий тока повторяют двух зеркально симметричных вихревых движения, полученных по RANS подходу. Сделано предположение, что в фазовом пространстве линии тока осредненного по времени течения являются аттракторами траекторий отдельных частиц потока.

2 Влияние вторичного течения, порожденного поворотом трубы на 90°, оказывает влияние на основной поток на расстоянии 40-45 диаметров трубы. С применением пористой вставки, установленной на расстоянии 2 диаметров трубы от поворота, влияние вторичного течения сокращается до 3-4 диаметров трубы. В результате моделирования турбулентного течения показано, что порожденное поле завихренности для исследуемого профиля скорости сохраняется на расстоянии 20 диаметров трубы. Применение открытопористой структуры уменьшает уровень завихренности до значений аналогичных цилиндрической трубы с однородным потоком на расстоянии 0.2 диаметра трубы.

3 Показано успешное применение диакоптических методов в моделировании течения через пористую вставку на микро- и макроуровнях. Для микроуровня построена 3D модель фрагмента пористой вставки, проведена калибровка схемы построения геометрической модели в микромасштабе, сформулированы рекомендации для дальнейшей компоновки и моделирования детали из ОПС. Приведенные результаты позволяют численно моделировать открытопористые структуры и учитывать их в перспективных проектах. Подход численного моделирования структуры пористой вставки на микроуровне позволил получить детальную информацию о течении внутри пористой вставки, которая в последующем применяется в моделировании турбулентных течений на макроуровне. Получены параметры для описания пористого тела на основе уравнения Форхгеймера-Бринкмана. Для данной модели пористой вставки

определен эффективный коэффициент диффузии. Полученные результаты указывают на перспективность использования пористой вставки типа ПСМ для различных практических приложений.

4 Численно исследовано течение на микроуровне в пористой вставке и за ней. Из анализа полученных результатов следует, что для однородного потока формируются пульсации, размеры которых характеризуются масштабом пор. Возникающая при этом пульсационная картина затухает на расстоянии 5-6 характерных размеров порового пространства. Из исследований на микроуровне получены коэффициенты для описания течения в ОПС на макроуровне. В исследованиях на макроуровне показано, что крупные возмущения потока, обусловленные геометрией канала за счет применения ОПС, гасятся на расстоянии 3-5 диаметра трубы.

5 На основании моделирования спутного следа за пористой вставкой и спектрального анализа возмущений установлено, что пульсации, возникающие в потоке за счет пористой вставки, затухают 3-5 характерных размеров порового пространства.

6 На основании проведенных численных экспериментов обоснована применение ОПС для выравнивания профиля скорости потока в газодинамическом тракте газового лазера. На данное устройство получен патент.

7 Предложена расчетная технология для исследования структуры газодинамического потока для описания влияния различных конструктивных элементов на пульсационные характеристики потока в полномасштабной установке с пористыми вставками.

Дальнейшее развитие направления предполагает включение в численное исследование кинетики наработки активной среды и утилизация тепла, возникающего в процессе работы лазера с замкнутым циклом.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ,

- 1 Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Кузнецов М.М. Газодинамические проблемы в лазерной технике. Учеб. пособие— М.: МФТИ, 2015. — 103 с.
- 2 Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007, 240 с.
- 3 А. А. Веденов, А. В. Губарев, А. М. Камчатнов, А. Ф. Мамзер, В. Р. Четчин Влияние турбулентности газового потока на угловую расходимость излучения в плоскопараллельном оптическом резонаторе
- 4 В.Д. Дубров, Ю.Н. Завалов Особенности турбулентного потока активной среды мощных СО₂-лазеров с аксиальной прокачкой газа
- 5 В. В. Боровков, Б.В. Лажинцев, В. А. Нор-Аревян, А. Н. Сизов, А. А. Синянский, Г. И. Федоров Особенности газодинамики прокачных лазеров, возбуждаемых осколками деления ядер урана. // Квантовая электроника, – 1995. – Т. 22 № 12 – с.1187–1191.
- 6 А.А. Бабин, О.И. Белошицкая, В.А. Богачев, С.Г. Гаранин, Г.Н. Качалин и др. Интерференционные измерения оптических неоднородностей в активной среде лазера на парах щелочных металлов // Физика лазеров – 2015 – стр. 276-287.

- 7 Ghisalberti M., Nepf H. The structure of the shear layer in flows over rigid and flexible canopies // *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3, 2006. pp. 277–301.
- 8 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1986.
- 9 Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
- 10 Spallart P.R., Allmaras S.R., A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. // *La Recherche Aerospaciale*, 1994, № 1, 5-21
- 11 Wilcox D.C. 1998. “Turbulence Modelling for CFD”. 2nd edition, DCW.
- 12 ЛОГОС — Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования. [Электронный ресурс]. — URL: <http://logos.vniief.ru/>
- 13 Гарбарук А. В. Современные подходы к моделированию турбулентности: учеб. пособие/А. В. Гарбарук [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 234 с.
- 14 Разработка и обоснование экспериментального стенда ФТ-18 для исследования процессов смешения в моделях различной геометрии – Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.М. Кузьма и [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. - № 2 (125). – с. 94-104. – DOI 10.46960/1816-210X2019_2_94

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и/или входящих в международные базы цитирования WoS и SCOPUS:

- B1 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 **(ВАК, SCOPUS)**
- B2 Balabina T. Yu. and Deryugin Yu. N. 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 **(ВАК, SCOPUS, Web of Science)**
- B3 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 математические известия*, 2025, том 22, № 1, стр. 465-478 DOI: /10.33048/semi.2025.22.031 **(ВАК, SCOPUS, Web of Science)**
- B4 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 **(ВАК)**

Свидетельства о регистрации патента на изобретение:

- B5 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

Балабина Татьяна Юрьевна

Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в
газодинамическом контуре газовых лазеров

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 23.06.2026 г. Заказ 747
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,44. Тираж 80 экз.

ООО «Арзамасская типография»
607226, Нижегородская область, город Арзамас, ул. Куликова, д. 55, помещ. 12