ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Балабиной Татьяны Юрьевны на тему: «Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертационного исследования. В создании газовых лазеров с замкнутым циклом большой акцент делается на проектирование газодинамического контура, и ключевой проблемой в нем является обеспечение однородного потока в зоне резонатора. Возникающие неоднородности в процессе циркуляции вещества по каналу существенно искажают поток, и для восстановления однородного профиля скорости требуются большие расстояния.

Диссертационная работа посвящена численному исследованию снижения неоднородностей, возникающих в потоке в процессе циркуляции газа по контуру. В работе предложен перспективный вариант гашения возникающих неоднородностей в потоке на минимальном расстоянии с помощью применения открытопористой структуры.

Также, помимо реального конструкционного решения, требуется разработка инструмента, который в перспективе позволит прогнозировать возможные исходы при проектировании газодинамического контура. Автором рассмотрен подход расчетных методик разномасштабного моделирования и верификационных экспериментов. В основу исследования положен вычислительный эксперимент, в качестве инструмента используется отечественный программный комплекс ЛОГОС.

Расчетные модели исследования строятся на использовании математических моделей на основе системы полных уравнений Навье-Стокса, базирующихся на фундаментальных законах механики сплошной среды. Для замыкания системы уравнений используются устоявшиеся и широко распространенные RANS модели турбулентности, а также современные методы исследования турбулентных течений, базирующиеся на вихреразрешающих подходах к моделированию турбулентных течений.

Для описания течения в открытопористой структуре используется подход многомасштабного моделирования, который включает в себя исследование в

микромасштабе (моделирование структуры течения в представительном объеме пористой структуры с целью определения параметров для макромоделирования) и макромоделирования, который ориентирован на описание общего характера потока газа. Развитие вычислительных технологий хоть и позволяет использовать значительные объемы ресурсов для описания турбулентности, но, к сожалению, до сих пор не располагает к описанию полномасштабной установки с учетом всех мелких структур, поэтому подход многомасштабного моделирования на сегодняшний день является **актуальным** решением.

Достоверность представленных на защиту результатов определяется расчетами на сходимость сеточных моделей и сопоставлением результатов расчетов с экспериментальными данными. Данная работа показывает актуальность фундаментальных исследований в прикладных задачах.

Структура диссертации включает введение, четыре главы, заключение и список литературы.

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности темы, формулируются основные цели и задачи исследования. На защиту выносятся пять положений.

Первая глава диссертации посвящена постановке задачи, выбору направления исследования и обзору литературы по теме диссертации, включающему описание различных подходов к моделированию нестационарных течений в криволинейном канале, в том числе с пористыми вставками. Автором выработаны критерии оценки качества потока и выделены физические характеристики описания пористой структуры для последующего описания структуры в макромасштабе, обоснован подход многомасштабного моделирования.

Во **второй главе** приводится исследование структуры потока в колене с углом 90 градусов с использованием RANS и вихреразрешающего подходов моделирования турбулентности. Автором выполнена калибровка начальных турбулентных параметров согласно эксперименту, показано формирование структуры течения за коленом, приведена оценка масштабов затухания возникающей неоднородности.

Результаты, полученные во второй главе, полностью обосновывают первое и второе положение, выносимое на защиту.

В **третьей главе** представлены результаты исследования течения в пористой структуре в микромасштабах. Автором подробно описан подход к моделированию течения в пористой структуре, в том числе описание построения достоверного объекта моделирования пористой структуры. Показана применимость полученных характеристик пористой вставки на микромодели в полномасштабных расчетах макромодели с применением описания модели пористой вставки на основе уравнений Форхгеймера-Бринкмана.

Результаты, полученные в третьей главе, полностью обосновывают третье и четвертое положение, выносимое на защиту.

Четвертая глава подытоживает все полученные результаты. В ней представлено описание расчетной технологии для полномасштабного моделирования полноценного узла газодимического тракта. Полученные данные численного моделирования для разных чисел Рейнольдса верифицируются экспериментальными данными.

Результаты, полученные в четвертой главе, полностью обосновывают пятое положение, выносимое на защиту.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, указаны перспективы применения результатов.

Полный объем работы диссертации составляет 148 страниц, включая 80 рисунков и 4 таблицы, содержатся ссылки на 140 источников. Основные результаты работы, представленные в диссертации, в достаточном объеме отражены в 4 статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК, получено 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение. Результаты работы также неоднократно докладывались на отечественных и международных конференциях. Это свидетельствует о полноте представления основных результатов работы в научных публикациях и достаточности для широкой дискуссии по этой работе. Тема диссертации и результаты исследований полностью соответствуют паспорту специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Научная новизна определяется тем, что в диссертации получены новые знания о характере течения внутри открытопористой структуры, и с применением современных подходов к моделированию турбулентных течений показано гашение

пульсаций скорости.

В диссертации получены следующие научные результаты:

1 Установление стохастического характера течения на основании моделирования с использованием вихреразрешающей модели 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 лазеров с замкнутым циклом, что позволило существенно повысить эксплуатационные характеристики конструкции газодинамического лазера.

Практическая значимость работы состоит в применении полученных автором результатов 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 конструкционных элементов на пульсационные характеристики среды. Технология применяется для оптимизации конструкций лазерных систем и описания структуры течения во всем тракте.

Отметим **ряд замечаний**:

1. При большом многообразии моделей турбулентности в работе рассматриваются две модели. Из каких соображений были они выбраны – не совсем понятно. Аналогичный вопрос относится к выбору вихреразрешающего подхода.

2. Неясна схема расчета пограничного слоя в расчетах турбулентных течений с коленом.

3. При использовании выхреразрешающего подхода указано использование «синтетической» турбулентности, но не дается алгоритм ее генерации.

4. В работе рассматривается только один вид колена с поворотом на угол 90 градусов с фиксированным диаметром изгиба. Было бы интересно рассмотреть другие формы изгиба колен.

Отмеченные недостатки имеют рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. В целом, за исключением обозначенных моментов, работа хорошо и подробно изложена на достаточно высоком научном уровне с приведением всех необходимых выкладок и пояснений.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Заключение. Диссертация написана на высоком научном уровне и показывает, что автор имеет высокую математическую культуру и может самостоятельно проводить полномасштабное научное исследование – от анализа проблем и постановки задач до разработки численных алгоритмов, проведения объемного вычислительного эксперимента, анализа результатов, сопоставления расчета и эксперимента.

Анализ диссертации, автореферата и публикаций автора, соответствующих основному содержанию исследования диссертации, позволяет сделать вывод, что работа Балабиной Т.Ю. представляет собой законченное самостоятельное исследование, в котором приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение важной актуальной задачи по созданию

методологии численного исследования структуры потока в каналах с пористой структурой.

Таким образом, диссертация Балабиной Татьяны Юрьевны «Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по снижению неоднородности в потоке газодинамического контура, имеющей важное значение для развития лазерной техники. Выполненная работа удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в ред. от 16.10.2024 № 1382), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика, жидкости, газа и плазмы»

Официальный оппонент:
Д.ф.-м.н., профессор кафедры «Высшая математика»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»
432027, г.Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, 8(8422) 43-06-43, rector@ulstu.ru

_____ / Вельмисов П.А. /

«30» июля 2026 г.

Подпись Вельмисова П.А. удостоверяю:
Ученый секретарь Ученого совета УлГТУ _____ О.Е. Фалова