



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

22.07.2026 № 02-21-4-342

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

Ю.В. Фомин

2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 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 исследования.

Диссертационная работа Т.Ю. БАЛАБИНОЙ посвящена исследованию структуры потока в типичных элементах конструкции газового лазера замкнутого цикла и применению открыто-пористых структур для минимизации неоднородности течения в активной среде лазера. Это необходимо для проектирования газодинамического контура лазера, включающего повороты, теплообменники и другие конструкционные элементы. Их наличие приводит к формированию вторичных течений и неоднородности плотности, которые сохраняются на значительных расстояниях вниз по потоку и ухудшают характеристики лазерной системы.

Сильной стороной работы является подход, рассматривающий эту проблему как комплексную многоуровневую задачу. В диссертации последовательно анализируются течение за характерным элементом контура, течение через открыто-пористую структуру на микроуровне, переход к макромоделю Форхгеймера-Бринкмана и использование ее параметров, полученных на этом этапе, в полномасштабном расчете. Такой подход соответствует реальной инженерной логике, согласно которой расчет отдельных узлов должен быть согласован с расчетом всего газодинамического тракта.

Анализ содержания диссертационной работы.

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список работ автора и список литературы. Она содержит 147 страниц текста, 74 рисунка, 4 таблицы и достаточно представительный библиографический список из 140 источников.

В первой главе приведены постановка задачи, обзор проблем, связанных с проектированием проточной части газовых лазерных установок, методов моделирования течения в каналах и подходов к описанию течения в пористых средах. Сформулированы математические постановки для описания турбулентного течения в каналах с открыто-пористыми структурами и обсуждены способы снижения степени неоднородности потока в газодинамическом контуре.

Во второй главе численно исследуется течение в канале с поворотом на 90 градусов. Эти исследования выполнены как с использованием RANS, так и вихреразрешающего подхода. Полученные результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными, полученными на аэродинамическом стенде ФТ-18. Показано, что после прохождения потоком примерно 60% «колена» в нем формируется вторичное течение и что влияние этого течения на поле скорости основного потока сохраняется на расстоянии порядка 40–45 диаметров трубы, а на поле завихренности – порядка 20 диаметров трубы.

Третья глава посвящена моделированию течения в открыто-пористой структуре типа ПСМ. В ней разработана технология построения сеточной модели пористой вставки на микроуровне, исследовано течение внутри пористой структуры и вниз по потоку от нее, определены вязкостные и инерционные коэффициенты макромоделей Форхгеймера–Бринкмана, а также эффективный коэффициент диффузии. Показано, что возмущения, возникающие за пористой вставкой, связаны с масштабом пор и затухают на расстояниях порядка 5–6 характерных размеров порового пространства.

В четвертой главе разработанная расчетная технология применяется к элементу газодинамического контура, включающему теплообменник, как при отсутствии, так и при наличии пористой вставки. Выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных для разных чисел Рейнольдса. На основании расчетов предложена конструкция устройства для выравнивания профиля скорости потока, на которую получен патент.

Научная новизна и значимость результатов.

К основным новым научным результатам диссертации следует отнести количественную оценку протяженности влияния вторичного течения и поля завихренности за поворотом канала; обоснование применения открыто-пористой структуры высокой пористости для снижения уровня завихренности и выравнивания профиля скорости; определение параметров макромоделей Форхгеймера–Бринкмана и эффективного коэффициента диффузии по результатам микромоделирования; создание расчетной технологии для анализа влияния конструктивных элементов газодинамического тракта лазера на пульсационные характеристики потока в полномасштабной установке.

Научная значимость работы состоит в согласованном использовании нескольких уровней решения сложной важной с инженерной точки зрения задачи.

Автор переходит от анализа характерного элемента контура к моделированию течения в ОПС на микроуровне, а затем к макромоделю пористого тела и к расчету фрагмента реального газодинамического тракта. Такой переход особенно продуктивен для задач, в которых прямое разрешение пористой структуры на микроуровне невозможно, а ее эмпирическое описание не обеспечивает достаточной для практики точности.

Обоснованность и достоверность результатов.

Достоверность результатов обеспечивается использованием общепринятых уравнений механики жидкости и газа, сравнением результатов RANS- и вихреразрешающих подходов между собой и с экспериментальными данными, анализом влияния размера вычислительной сетки на решение и согласованием результатов моделирования пористой вставки на микро- и макроуровнях. Представленные результаты расчетов и их анализ в целом достаточны для обоснования основных выводов диссертации, хотя отдельные элементы расчетной технологии нуждаются в более подробной количественной проверке, что отражено ниже в замечаниях.

Основные выводы диссертации соответствуют представленным в ней расчетным и экспериментальным материалам, которые достаточно полно опубликованы в научных статьях и прошли апробацию на научных конференциях. Кроме того, по теме работы получен патент.

Согласно диссертации и автореферату, личный вклад соискателя состоит в постановке задач, построении расчетных моделей, участии в разработке расчетной технологии, выполнении расчетов, а также в обработке и анализе их результатов.

Практическая значимость и рекомендации по использованию результатов.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов при разработке проточных газовых лазеров замкнутого цикла для оптимизации отдельных элементов их газодинамического контура. Предложенный способ выравнивания потока с помощью ОПС защищен патентом, а расчетная технология может применяться для предварительной оценки влияния конструктивных элементов газодинамического тракта лазера на степень неоднородности потока в его активной среде.

Представляется целесообразным использовать разработанную технологию в расчетно-проектных подразделениях, занимающихся газодинамическими контурами лазерных систем. Самостоятельную практическую ценность имеют построенные модели открыто-пористых структур, определенные в диссертации параметры макромоделей Форхгеймера–Бринкмана и предложенный подход к учету ОПС в полномасштабных расчетах без микромоделирования пористой вставки.

Замечания по диссертационной работе.

1. В разных местах текста диссертации используются близкие, но не полностью эквивалентные формулировки ее целей: «минимизация неоднородностей», «выравнивание профиля скорости», «снижение уровня завихренности», «ламиниризация» и «уровень однородности потока». При этом

количественный критерий допустимой неоднородности потока на рабочем участке газового лазера не определен. Желательно указать, какая именно величина является основным критерием эффективности ОПС в каждом разделе работы, и связать используемые показатели – неоднородность профиля скорости, величину завихренности, интенсивность пульсаций, перепад давления на пористой вставке – с этим критерием.

2. Обзор литературы по течению в каналах с поворотом на 90 градусов представляется недостаточно полным. В частности, полезно было бы обсудить классическую экспериментальную работу Sudo K., Sumida M., Hibara H. *Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend* // *Experiments in Fluids*. 1998. Vol. 25. P. 42–49, где подробно исследована структура турбулентного течения в «колене». Это позволило бы лучше позиционировать полученные результаты по вторичному течению и протяженности его влияния.

3. Возможность описания стохастического характера турбулентного течения за «коленом» канала с поворотом в вихреразрешающем расчете хорошо известна. Новым результатом является количественное сопоставление осредненной картины течения из вихреразрешающего расчета с RANS-решением и с экспериментом для конкретной конфигурации. Поэтому соответствующую формулировку в тексте диссертации следовало бы уточнить и не выносить как самостоятельный элемент научной новизны без дополнительных аргументов.

4. В работе исследуется влияние расчетной сетки на решение, однако в некоторых случаях результаты на двух наиболее мелких сетках недостаточно близки между собой. В такой ситуации исследование влияния сетки выглядит не вполне завершенным, и следовало бы провести ее дальнейшее измельчение.

5. При обсуждении вихреразрешающих расчетов не всегда достаточно подробно приведены такие параметры, как шаг по времени, характерные числа Куранта, момент начала осреднения решения, длина временной выборки и т.д. Эти сведения необходимы для оценки качества проведенного вихреразрешающего расчета.

6. Микромасштабная модель ОПС типа ПСМ строится на основе выбранного фрагмента спрессованных слоев сетчатого материала. При этом неясными остаются вопросы о репрезентативности этого фрагмента и о влиянии технологического разброса геометрии, локальных контактов проволок и условий на границах расчетной области. Было бы полезно оценить возможный разброс определенных в работе вязкостных, инерционных и диффузионных коэффициентов макромодели на нескольких статистически независимых фрагментах.

7. В диссертации прямо отмечено, что диффузия в пористой вставке имеет анизотропный характер и должна определяться тензором коэффициента диффузии, однако учет такой анизотропии для рассматриваемой геометрии затруднен. В связи с этим желательно оценить ошибки такого упрощения и указать, в каких случаях скалярное описание эффективной диффузии является допустимым.

8. Применение ОПС снижает неоднородность потока, но одновременно создает дополнительное гидравлическое сопротивление. В работе определяется перепад давления на пористой вставке, однако практическая оптимизация устройства требует совместного анализа трех факторов: степени выравнивания профиля скорости, уровня пульсаций и энергетических потерь на прокачку потока

через вставку. Такая многопараметрическая постановка сделала бы инженерные рекомендации более завершенными.

9. В тексте диссертации встречаются опечатки и неточности, в том числе в математических формулах и обозначениях, например, в гипотезе Буссинеска (1.25) и формулировке модели Спаларта–Аллмараса (1.28)–(1.30).

Указанные замечания относятся главным образом к уточнению терминологии, границ применимости и количественной верификации отдельных элементов разработанной в диссертации расчетной технологии. Они не ставят под сомнение основные результаты диссертации и не влияют на ее общую положительную оценку как завершеного научно-квалификационного исследования.

Заключение.

Диссертационная работа Татьяны Юрьевны БАЛАБИНОЙ представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, в котором решена актуальная задача анализа структуры потока в типичных элементах газового лазера замкнутого цикла и обосновано применение открыто-пористых структур для уменьшения неоднородностей течения на рабочих участках. Работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и предлагает расчетно-методические решения, имеющие значение для механики жидкости и газа и для проектирования газодинамических контуров лазерных установок.

Автореферат в целом правильно отражает содержание диссертации. Представленные материалы соответствуют специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Основные результаты опубликованы, прошли необходимую апробацию и использованы при разработке технического решения, защищенного патентом.

Диссертационная работа «Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, БАЛАБИНА Татьяна Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв заслушан и одобрен на заседании Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института ФГАОУ ВО «СПбПУ» (Протокол № 06-26 от 30.06.2026). Присутствовало 24 чел. «За» 24 чел.; «против» - нет; «воздержалось» - нет.

Отзыв составили:

ГАРБАРУК Андрей Викторович

(Ф.И.О.)

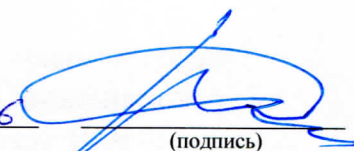
15.07.26
(дата)


(подпись)

Профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Физико-механического института, доктор физико-математических наук, доцент

ФРОЛОВ Максим Евгеньевич

(Ф.И.О.)

16.07.26 (дата)  (подпись)

Директор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики
Физико-механического института, доктор физико-математических наук, доцент

Составители отзыва дают согласие на обработку своих персональных
данных, связанных с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела
БАЛАБИНОЙ Т.Ю.

Данные организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»

Адрес: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ
Академическое, ул. Политехническая, д.29 литера Б

Телефон: 7(812) 552-60-80, +7 (812) 297-20-95, 8 (800) 707-18-99

Сайт: <https://www.spbstu.ru/>

Адрес электронной почты office@spbstu.ru

