

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

Балабиной Татьяны Юрьевны

на тему: **Снижение уровня неоднородности потока пористыми вставками в**

**газодинамическом контуре газовых лазеров**

по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

### **1. Актуальность избранной темы диссертации.**

Диссертационная работа Балабиной Татьяны Юрьевны посвящена исследованию и моделированию структуры потока в типичных элементах конструкции газового лазера замкнутого цикла с применением открытопористых структур для минимизации неоднородностей в течении на рабочих участках. Подобные исследования и математические постановки тесно связаны с задачами увеличения мощности газовых лазеров с замкнутым циклом потока, когда возрастает роль конструктивной организации газо- гидродинамического контура. Организация замкнутого контура для активной среды должна быть устроена таким образом, чтобы реализовать минимальную для данной конструкции неоднородность потока в зоне генерации. Неоднородность потока приводят к локальным изменениям волнового фронта световой волны при ее прохождении через активную среду и снижает эксплуатационные характеристики лазера. В условиях ограничения массы и габаритов устройства возникает необходимость выравнивания потока на возможно меньшем расстоянии от места возмущения (на размерах порядка нескольких характерных размеров канала). В качестве одного из возможных способов выравнивания профиля скорости потока предлагается использовать вставки конструктивных элементов из открытопористых материалов, в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления. Такие задачи относятся к задачам моделирования комбинированных газодинамических течений (течения вязкого газа в трубах, переходящих в фильтрационные течения в открытопористых вставках) и, несомненно, являются актуальными.

### **2. Общая методология и методика исследования.**

Общая методология исследований заключается в численном решении уравнений одновязкостной гидродинамики в трубе с коленом и последующем переходе в течение в многослойной сеточной конструкции (открытопористой вставке по терминологии автора) на выходе из нее. Методика решения поставленных задач заключалась в использовании пакетов прикладных компьютерных программ применительно к условиям поставленной задачи, осреднением решений для микро-уровня в пористой вставке с целью перехода к более экономным численным моделям.

### **3. Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Степень обоснованности и достоверность научных положений основаны на корректном использовании базовых концепций механики сплошной среды; выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертации Балабиной Т.Ю. и полученные на основе убедительных численных решений соответствующих краевых задач, являются достоверными и важными.

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 ИЦФМ 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.

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) [Б1-Б4], 9 — в сборниках трудов конференций, получено 1 свидетельство о регистрации патента на изобретение.

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

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 (Reynolds Averaged Navier- Stokes – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса) 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.

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, 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 «ЛЮГОС» 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 качественно и количественно лучше совпадает с экспериментальными данными, чем результаты стационарных расчетов, основанные на использовании RANS подхода.

В **третьей главе** представлены результаты исследования течения на микроуровне в каналах с пористыми вставками. Объектом исследования стал фрагмент пористой структуры из сетчатого материала (PCM). 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 микромодели в полномасштабных расчетах макромодели с применением описания модели пористой вставки на основе уравнений Форхгеймера-Бринкмана. Рассмотрено влияния пористого тела на диффузионное перемешивание двух компонент потока на микроуровне.

В четвертой главе описывается технология моделирования течения для проведения подобного класса задач. Данная глава является итогом проведенной работы. Показаны особенности выбранных подходов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

#### **4. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Результаты и рекомендации диссертации Балабиной Т.Ю. могут быть использованы при конструировании газовых лазеров с целью увеличения их мощности и повышения эффективности.

#### **5. Общая оценка содержания диссертации и завершенность.**

Диссертация Балабиной Т.Ю. обладает всеми признаками завершенной научно-квалификационной работы, обладает отличительными чертами научной новизны и практической ценности полученных результатов.

#### **6. Список замечаний по недостаткам в содержании и оформлении диссертации соискателя и прилагаемого к ней автореферата.**

Диссертация и автореферат диссертации хорошо (и в некоторых местах даже красочно) оформлены. Тем не менее, по работе могут быть высказаны следующие замечания. Текст диссертации во многих местах свидетельствует о трудностях использования русского языка, на котором написана диссертация. Приведу несколько прямых цитирований:

С.5: «Таким образом, важной задачей является разработка способов нивелирования неоднородностями потока от конструктивных элементов, которые формируются попадают в зону генерации».

С.5: «В то же время исследованиями конкретных вопросов занимались многие газодинамики и внесли ощутимый вклад в эту новую науку».

С.6: «Наиболее распространенным видом конструкции ликвидации турбулентности использовался сопловой аппарат, который делил канал на части...»

С. 6 – 7: «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». И так далее, в полном соответствии

с шутливой фразой классика советской сатиры о том, что сила в словах автора есть, только он их расставить не может. Впрочем, этот недостаток имеет и положительную коннотацию, поскольку говорит о самостоятельной работе автора над текстом диссертации, без всякого там модного ныне у студентов ИИ.

В названии диссертации и далее в тексте используется термин «пористые вставки», хотя из опыта обращения с природными пористыми средами (керны горных пород, дерево, строительные материалы, глины, почвы, капилляры человеческого тела и т.д.) скорее хочется говорить о многослойных сетчатых материалах, причем имеющих регулярную, а не стохастическую структуру.

В разделе «Научная новизна работы» четко не указано, с использованием, с использованием каких программных продуктов получены результаты диссертации.

В п.1 «Научной новизны» используется термин «осредненные параметры». Вопрос – осредненные по чему, по времени, как в RANS?

В п.2 «Научной новизны» встречается такая фраза «...на расстоянии 20 диаметров трубы за коленом и при прохождении 60% формируется вторичное течение, оказывающее влияние на основной поток на расстоянии 45 диаметров трубы». Отсюда вопрос – была ли попытка перейти к безразмерной постановке и говорить о численных значениях параметров?

С.17, формула (1.1), она же формула (1) автореферата – для обозначения плотности среды используется обозначение  $\rho_s$ . Индекс s означает среду? Может, лучше использовать индекс m (от английского medium)?

С.17, формула (1.2), она же формула (2) автореферата -  $Q = \rho u s \Rightarrow (u' + \bar{u})(\rho' + \bar{\rho})s \Rightarrow \rho' = u' \bar{\rho} / \bar{u}$ , первая часть формулы представляет собой равенство, вторая – обозначение, третья – снова равенство. Возникает вопрос – как это получено? И еще один вопрос – а не забыт ли знак «минус» в финальном равенстве, поскольку если пульсации скорости положительны, следовательно, само значение скорости становится больше, следовательно, давление уменьшается, следовательно, объем увеличивается, следовательно, плотность уменьшается, тогда пульсация плотности отрицательна, и финальная часть формулы (1.2) должна содержать знак «минус».

На странице 18 сказано, что при работе лазера выделяется тепло. Тогда, если вязкость активной среды зависит от температуры, то в уравнениях Навье-Стокса появится член вида  $2\nu'V_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$ ,  $\nu' = \frac{1}{\rho} \frac{d\mu}{dT}$  (уравнение (14.16) в книге А.А. Ильюшина «Механика сплошной среды», с. 195, МГУ, 1990). Где этот член? Что автор может на это ответить?

Ничего также не говорится о вкладе, вносимом, вносимом колебаниями элементов сетки каркаса на возмущения скорости потока, а ведь для верхнего значения диапазона скорости в работе 30 м/с (109 км/час) – по международной шкале Саффира-Симпсона вполне себе неплохой пред-ураган (ураган по этой шкале начинается со 32 м/с, так что 30 м/с – это хоть и не ураган, но очень сильный ветер).

При описании свойств пористой среды ничего не говорится о так называемом представительном элементе объема (ПЭО), а ведь именно по этому параметру должно проводиться осреднение микропараметров, и именно для этого параметра вводится понятия пористости и проницаемости, а не для всей пористой среды, как это молчаливо предполагает автор.

В формуле (1.3) пористость определена как  $\Pi = V_B / V$ . Тогда индекс В – это от английского «bulk», или это русское «в» от «вода»? Индексы русские или латинские?

В формуле (1.4), как она приведена в тексте диссертации, имеющей вид  $\Pi_{eff} = ax^3 - (2a + \Pi_c)x + (a + 1 + \Pi_c)x$ ;  $a = 0,3$ ;  $\Pi_c = 0,53$ ;  $x = (\Pi - \Pi_c) / (1 - \Pi_c)$ , дается определение эффективной пористости. Если раскрыть скобки и подставить численные значения констант для  $\Pi = 0,83$ , то получится  $\Pi_{eff} = ax^3 + (1 - a)x \approx 0,5$ . Как это согласуется с определением, данным автором для высокопористой вставки?

При описании свойств пористой вставки автор сбивается на термин «коэффициент пористости». Этот термин в механике пористых сред имеет собственное значение  $e = \Pi / (1 - \Pi)$ , отличающееся от пористости  $\Pi$ .

На с.26 диссертации говорится: «Подробный анализ исследований о проницаемости сделал Шейдеггер [59]». Автору, при всем уважении к прекрасной книге А.Э. Шейдеггера «Физика течения жидкостей через пористые среды» за 1960 год, хотелось бы рекомендовать очень приличную библиотеку с подробным анализом исследований о проницаемости от М. Маскета «Течение однородных жидкостей в пористой среде» (1937 г.) до хотя бы Е.С. Ромма «Структурные модели порового пространства горных пород» (1985 г.).

В формуле Козени-Кармана для проницаемости стоит постоянная Козени-Кармана. Откуда ее брать для расчетов? Если она не используется, зачем эту формулу приводить?

Для определения значений пористости той структуры, о которой идет речь в работе, и в тех приближениях хорошо подходит простой и эффективный метод взвешивания (конечно, пренебрегая весом воздуха внутри), а также метод известного ученого Архимеда решения задачи об определении объема короны царя г.Сиракузы Герона II.

На с.29 вводится описание процесса диффузии примеси в потоке в пористой среде и дается определение коэффициента эффективной диффузии  $D_{ef} / D = \Pi / \tau^2$ , являющееся

фактически обобщением значения коэффициента молекулярной диффузии  $D$  на молекулярную диффузию в пористой среде. Однако хорошо известно, что основной вклад в рассеяние частиц примеси в пористой среде дает не молекулярная диффузия, а так называемая гидродисперсия, т.е. рассеяние частиц примеси от соударений с частицами пористого скелета. Как это учитывается в расчетах (вернее, почему не учитывается)?

Приводимая на с.31 формула Дарси (1.9) и комментарий к ней не содержит определения скорости фильтрации. Автору хотелось бы напомнить, что скорость фильтрации – это, по существу, фиктивная величина, которая получается «размазыванием» фактического потока в пористой среде на все сечение фильтрующего образца так, чтобы совпадали итоговые объемы вытекающего флюида за единицу времени через реальные поры и в гидравлическом приближении (фильтрации). Т.е. скорость фильтрации – это объем, вытекающий за единицу времени через все сечение фильтрации (в некоторых практических задачах это называется дебитом), деленный на площадь поперечного сечения фильтрующего пористого образца. В связи с этим вопрос к формуле (1.21) на с.32 – что такое скорость потока  $u$ , и как она связана со скоростью фильтрации? Сравнивая формулы (1.21) и (1.22), получим, что скорость потока равна скорости фильтрации, но это не так!

Из анализа системы уравнений (1.23) следует, что рассматривается несжимаемый газ в изотермическом приближении. Это фантастика!

С.39 – зачем приведено уравнение (1.37) для температуры в потоке, если она не меняется?

На с.39 есть предложение: «К сожалению, универсальной модели для точного описания процесса течения вещества в пористой среде в настоящий момент не существует...» Тогда как соотносятся с этим утверждением модели течения в пористой среде (т.н. микрофильтрации), основанные на уравнениях Навье-Стокса и LBM?

С.71 – почему в качестве формы пористой вставки выбран параллелепипед, а ранее говорилось о трубе?

Рис.3.30 порождает главный вопрос по диссертации – как задавать входное граничное условие для пористой вставки в макро-задаче? Набегающий поток, встречая сопротивление пористой вставки, будет сжимать газ на входе в пористую среду, поэтому, скорее всего, будет изменяться плотность на входе. Поэтому в систему уравнений (1.34) – (1.37) нужно добавить уравнение состояния газа, а для пористой среды – еще и уравнение баланса массы фильтрующегося газа, которое будет иметь вид модифицированного уравнения Лейбензона (Л.С. Лейбензон получил уравнение для фильтрации идеального газа).

Уравнение (3.6) – странно, что число Шмидта в правой части (3.6) безразмерно, а левая часть уравнения (3.6) размерна.

На с.94 мы встречаем систему уравнений (3.5) – (3.8). На с.103 вновь встречаются уравнения под номером (3.5) – (3.6). Этот же феномен повторяется на с.111. Вопрос к уравнениям (3.5) – (3.6), что на с.111: в уравнении (3.5) стоит  $\bar{u}$ , а в уравнении (3.6) – просто  $u$ . Это правильно? Что означает черта над  $u$ , это вектор?

С.136, «Список литературы» составлен в разнобой, некоторые источники описаны в соответствии со старым ГОСТом, некоторые – в соответствии с новым.

#### **7. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

#### **8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Тем не менее, сделанные замечания не влияют на общее положительное впечатление от диссертации. Таким образом, диссертация Балабиной Т. Ю. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи снижения уровня неоднородности потока открытопористыми вставками в газодинамическом контуре газовых лазеров, имеющей значение для развития моделей комбинированных течений газа, а также изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития соответствующих технологий, а ее автор, Балабина Т. Ю., заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Отделения суперкомпьютерных систем и параллельных вычислений НИЦ «Курчатовский институт»,  
123182, Москва, пл. академика Курчатова, 1, телефон: +7(903)341-34-67,  
mkhramch@gmail.com

Храмченков М.Г.



« 30 » 07 2026г.

Подпись Храмченкова М.Г. заверяю:

Заместитель директора-  
руководитель Аппарата Центра



Н.Е. Филимонова

