

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ
ОТКРЫТОПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЙ
ПОРИСТОСТИ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ПРОФИЛЯ
ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА

Т.Ю. Балабина, А.А. Добров, Г.Н. Качалин, Е.А.
Кудряшов, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов

Представлено М.А. Шишлениным

Abstract: Results of settlement pilot study of gasdynamic characteristics of a subsonic current through the design consisting of a cylindrical pipe, turn on a corner of 90 degrees, the diffuser, a gas-permeable porous insert and a confusor for two values of number of Reynolds - 5×10^4 and 10^5 are given. It is settlement and experimentally shown that use of a porous insert gives as a result almost uniform profile of speed of gas at the design exit. Heterogeneity of size of speed in output section makes 3 percent while in lack of a porous insert heterogeneity makes 15 percent.

Keywords: gasdynamic stream, structure of a stream, porous body, Forchgeymer-Brinkman's model, turbulence, SIMPLE algorithm, stream speed profile.

BALABINA T., DOBROV A., KACHALIN G., KUDRYASHOV E., LEGCHANOV M., KHROBOSTOV A., SETTLEMENT PILOT STUDY OF APPLICATION OF OPEN-POROUS STRUCTURES OF HIGH POROSITY FOR ALIGNMENT OF A PROFILE OF A TURBULENT STREAM.

© 2024 Балабина Т.Ю., Добров А.А., Качалин Г.Н., Кудряшов Е.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е..

The results have been obtained with financial support from the Science and Universities National Project under the Young Scientists Lab Program of the RF Ministry of Education and Science # FSWE-2024-0003.

Поступила 10 октября 2024 г., опубликована 31 мая 2025 г.

1 Введение

Исследование характеристик дозвуковых течений является одной из основных фундаментальных задач прикладной газовой динамики при создании лазерных систем. В газовых лазерах нередко используется проточная активная среда, в которой и создаётся инверсная населённость. С увеличением мощности лазеров с замкнутым циклом возрастает роль газодинамического контура. Организация подобного контура для активной среды должна быть устроена таким образом, чтобы создать минимальную неоднородность потока в зоне генерации [1, 2]. Неоднородность оптических характеристик активной среды приводят к изменению фазового фронта световой волны при ее прохождении через активную среду. Причинами появления неоднородностей могут быть как исходные характеристики активных сред, так и воздействие на рабочее тело. В частности, для замкнутого контура причиной подобного воздействия являются конструкционные элементы в виде насосов, поворотов, переходов и т.д.

Газодинамические тракты, как правило, имеют распределенную архитектуру и достаточно сложную топологию. Таким образом, в условиях реальных устройств возникает необходимость организации выравнивания потока на минимальном расстоянии от места возникновения возмущения (порядка нескольких калибров канала).

В качестве перспективного способа выравнивания профиля скорости потока в данной работе предложено применение конструктивных вставок из открытопористых материалов, обладающих необходимыми гидродинамическими и прочностными характеристиками. Наибольший интерес для решения задачи получения однородного потока представляют материалы с высокой пористостью в виду их малого веса и низкого гидравлического сопротивления, однако этот класс материалов наименее исследован в настоящее время [3].

При проектировании сложных лазерных систем становится неотъемлемой частью численное моделирование [4, 5]. Однако полное описание системы не всегда является возможным 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.

Математическая модель описания дозвукового течения газа в указанном классе задач в общей нестационарной постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Поэтому вводятся различного рода допущения и полуэмпирические зависимости, для определения которых необходима существенная база экспериментальных и фундаментальных исследований.

Математическое моделирование течений в каналах с пористыми вставками основывается, как правило, на использовании фильтрационных моделей, в которых возникающее трение при взаимодействии потока с каркасом пористого материала описывается тензором проницаемости. Определение этих коэффициентов напрямую связано с пористой структурой. Результаты численного моделирования структуры потока при таком подходе существенно зависят от адекватности описания пористого материала тензором проницаемости. Получить коэффициенты данного тензора можно из эксперимента.

Целью работы является на примере типичных элементов газодинамического тракта с открытопористыми структурами высокой пористости численно и экспериментально описать структуру течения с последующим масштабированием полученных результатов для создания газовых трактов лазеров, работающих по замкнутому или открытому циклу, обеспечивающих получение расходимости излучения близкой к теоретическому пределу, определяемому процессом дифракции. Критерием согласования расчетов и экспериментов выступает определение профиля скорости в различных сечениях газодинамического тракта.

2 Постановка задачи

Для расчетно-экспериментального исследования определения структуры течения был выбран участок газодинамического тракта с открытопористыми структурами высокой пористости, который состоит из основных элементов конструкции: входной трубы длиной 20 диаметров, поворота на угол 90 градусов с постоянным сечением и блока диффузор – цилиндрическая труба – конфузор и выходной частью трубы длиной ~ 6 диаметров. Эскиз рабочей конструкции с габаритными размерами представлен на рисунке 1.

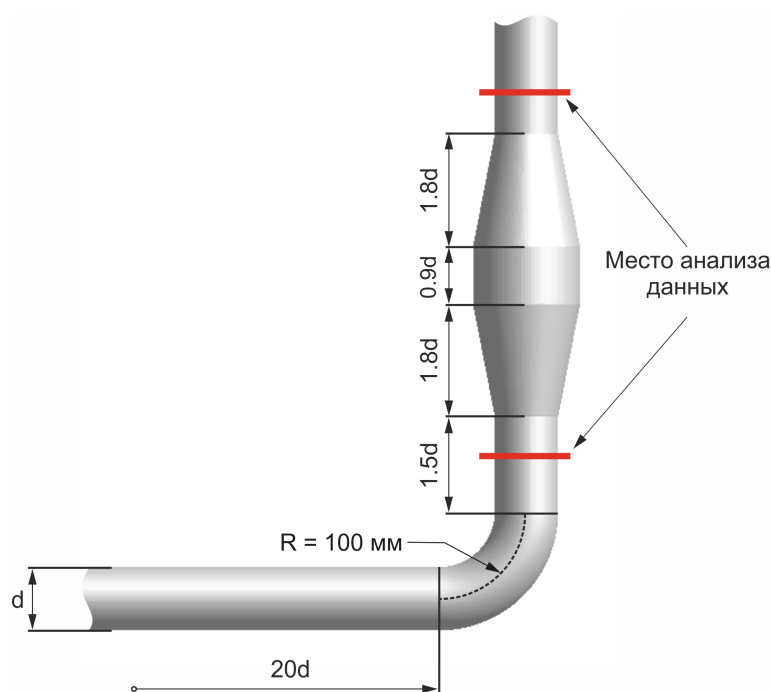


Рис. 1. Схема исследуемой конструкции

Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанный по параметрам входного сечения, равен $Re \sim 5 \times 10^4$ и 10^5 . Рабочий газ – воздух с температурой $25^\circ C$ при атмосферном давлении.

Число Рейнольдса определялось следующим образом:

$$Re = \frac{W_{cp}d}{\nu}, \quad (1)$$

где W_{cp} – среднерасходная скорость, полученная численным интегрированием по сечению; d – входной диаметр трубы; ν – кинематическая вязкость.

Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета проводился по двум контрольным сечениям, отмеченные на рисунке 1 красными линиями:

1. Область за поворотом на расстоянии $\sim 0,7d$ от края поворота,
2. Область за блоком диффузор-конфузор на расстоянии $\sim 0,7d$ от края конфузора.

На каждом сечении в расчетах были отмечены сенсоры – точки, в которых производилось сравнение расчёта и эксперимента. На рисунке 2 показана схема расположения сенсоров. В совокупности была определено около 200 сенсоров на каждое сечение. Время сбора информации в точке составляло 2 с.

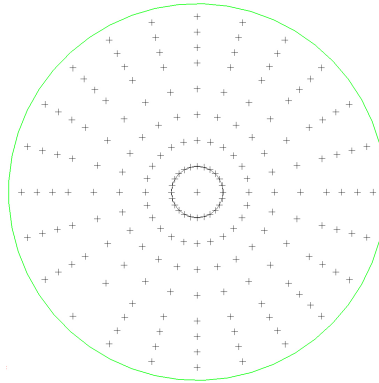


Рис. 2. Расположение сенсоров в сечении измерения

Одной из задач при конструировании газодинамического лазера с замкнутым циклом является утилизация тепла, которое образуется в результате генерации источника излучения. Для эффективного отвода тепла и увеличения теплообмена применяется специальная конструкция, в которой увеличивается поверхностная площадь канала. Вопрос об эффективном отводе тепла в данной работе не рассматривается.

Для минимизации габаритных характеристик конструкции рассматривается совмещенный теплообменник с пористой вставкой, который является перспективной схемой для отбора тепла и выравнивания профиля скорости потока. Схема конструкции теплообменника с пористой вставки представлена на рисунке 3.

3 Описание расчетной технологии

Численное исследование структуры турбулентных потоков в конструкции проводилось с использованием комплекса ЛОГОС [6], включающего в себя модуль расчета течений несжимаемого газа. В этом модуле уравнения Навье-Стокса совместно с уравнениями моделей турбулентности интегрировались на

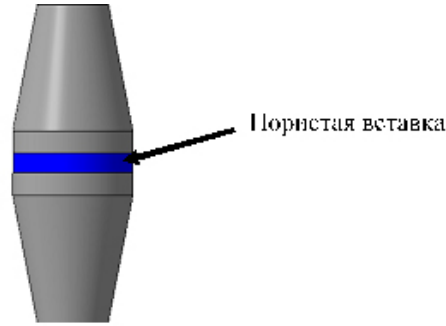


Рис. 3. Размещение пористой вставки внутри теплообменника

неструктурированных сетках, с использованием расщепления по физическим процессам. Рассматриваемое течение - турбулентное, поэтому в решении данной задачи использовались подходы, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS) и вихреразрешающий, в частности, метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES) [7, 8].

Для описания турбулентных течений газа в криволинейном канале в построении математической модели используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса и уравнение модели турбулентности. Для несжимаемого газа уравнения Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier-Stokes или RANS) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \vec{u}) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) &= -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_m + \tau_t), \end{aligned} \quad (2)$$

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

Молекулярная составляющая тензора касательных напряжений определяется с помощью реологического закона Ньютона:

$$\tau_m = 2\mu(\mathbf{S} - \frac{1}{3}\mathbf{I}\nabla \cdot \vec{u}), \quad (3)$$

где $\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \vec{u} + [\nabla \vec{u}]^t)$ - тензор скоростей деформаций, $\mathbf{I}$ - единичный тензор, а μ - коэффициенты динамической вязкости.

Турбулентная составляющая тензора касательных напряжений определяется в соответствии с гипотезой Буссинеска:

$$\tau_t = 2\mu_t(\mathbf{S} - \frac{1}{3}\mathbf{I}\nabla \cdot \vec{u}) + \frac{2}{3}k\mathbf{I}, \quad (4)$$

где μ_t - турбулентная вязкость, а k - кинетическая энергия турбулентности.

Для описания турбулентных течений применяются два подхода. В первом подходе (RANS-постановка) турбулентное течение моделировалось на основе полуэмпирической модели турбулентности, в качестве которой использовалась двухпараметрическая модель SST Менгера [9]. SST модель представляет собой комбинацию $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей, обеспечивающую сочетание лучших качеств

этих моделей [7]. Уравнения модели следующие

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) &= \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_T) \nabla k] + P_k - \beta^* \rho \omega k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \omega) &= \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \nabla \omega] + \gamma \frac{\rho}{\mu_T} P_k - \beta \rho \omega^2 + (1 - F_1) D_{k\omega}, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$P_k = \min(\mu_T S^2, 20\beta^* \rho k \omega), S^2 = 2S_{ij}S_{ij},$$

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\mu}{\rho d^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{C D_{k\omega} d^2} \right],$$

$$C D_{k\omega} = \max(D_{k\omega}, 10^{-20}), D_{k\omega} = \frac{2\sigma_{\omega 2}}{\omega} (\nabla k) \cdot (\nabla \omega),$$

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2, \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta\},$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega 2} = 0.856,$$

$$\beta_2 = 0.0828, \beta^* = 0.09, a_1 = 0.31,$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\beta_*} - \frac{\sigma_\omega \kappa^2}{\sqrt{\beta_*}}, \kappa = 0.41$$

Турбулентная вязкость в этой модели определяется выражением [9]

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}, F_2 = \tanh(\arg_2^2), \arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\mu}{\rho d^2 \omega} \right), \quad (6)$$

Газодинамические и турбулентные параметры потока были подобраны таким образом, чтобы обеспечить неопределенность структуры потока, формируемые компрессором. В расчетах по RANS подходе была построена равномерная блочно-структурированная сетка с масштабом ячейки 0.85 мм и пограничным слоем, состоящим из 5 призматических слоев. Общее количество ячеек в модели составило $\sim 9 \times 10^6$.

В вихреразрешающем подходе использовался зонный RANS-LES метод счета, согласно которому геометрия исследуемой конструкции делится на две части с заданными границами RANS и LES областями при этом на входе в LES область создается «искусственная» турбулентность (флуктуаций скорости). Сеточная модель адаптирована под условия расчета, а именно, выполнено зонирование по области разделения перехода от RANS в LES. Основу сеточной модели для вихреразрешающего подхода также составила блочно-структурированная сетка. Для LES области сеточная модель была построена с масштабом ячейки 0.425 мм, 15 призматическими слоями для описания пограничного слоя и состояла из $\sim 45 \times 10^6$ ячеек.

В расчете пористая вставка инициализирована отдельным регионом, в котором длина региона вниз по потоку равна толщине пористой вставки в экспериментальной конструкции. Моделирование потока в пористой вставке проводилось по макромоделю Форхгеймера-Бринкмана, в которой инерционный и вязкостный коэффициенты были определены по экспериментальной кривой в виде зависимости $\frac{\Delta P}{\Delta l} = f(u)$ представленной на рисунке 4 [10]. В этих коэффициентах содержатся физические свойства пористой вставки.

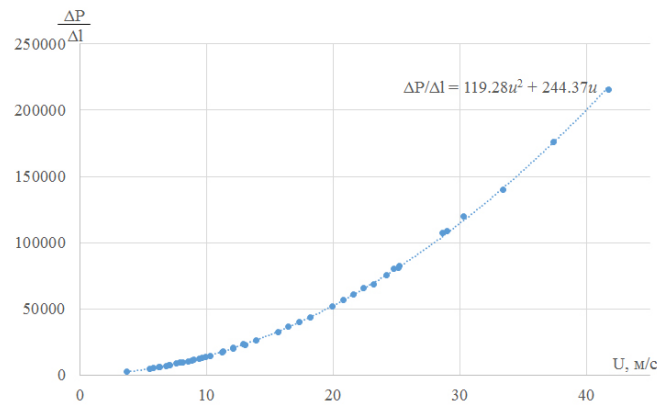


Рис. 4. Зависимость перепада давления от входной скорости потока [10]

4 Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментального исследования

Аэродинамическая часть стенда ФТ-18 [10] представляет собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. Общая схема аэродинамического участка стенда представлена на рисунке 5. Экспериментальный участок соединен с вентилятором с помощью трубопровода DN100 и концентрического перехода внутренними диаметрами 100×73 мм. Технические характеристики измерений:

- Рабочий диапазон 0.2-20 м/с
- Точность определения скорости $\pm(0.2 \text{ м/с} + 0.2\%, \text{ массового расхода})$
- Точность определения температуры $\pm 0.7^\circ\text{C}$
- Время отклика ≤ 1.5 с.

Схема экспериментального участка с указанием сечений измерения скорости рабочей среды представлена на рисунке 6. Исследуемый канал включает в себя прямые участки трубопровода, отвод на 90 градусов, диффузор, вставку из открыто-пористого проволочного материала, конфузор. Задачей экспериментального исследования являлось измерение локальных значений скорости потока рабочей среды в двух сечениях. Сечение измерения скорости №1 располагалось за отводом на 90 градусов перед диффузором. В нем исследовалась неравномерность профиля скорости, обусловленная поворотом потока в отводе. Сечение измерения скорости №2 располагалось на выходе из экспериментального канала, и по измеренному профилю скорости в нем оценивалась эффективность пористого материала как выравнивателя потока. Для оценки снижения степени неравномерности скорости на выходе из канала также проводились исследования на модели без пористой вставки (рисунок 6,б).

Пористая вставка была изготовлена из открыто-пористого проволочного материала, в основе которого проволока диаметром 0.42 мм, навитая в спирали и спрессованная в заданную форму. Вставка представляла собой диск диаметром 123 мм и толщиной 19.5 мм. Коэффициент пористости 0.8, который определялся путем взвешивания образца с точностью 0.01%.

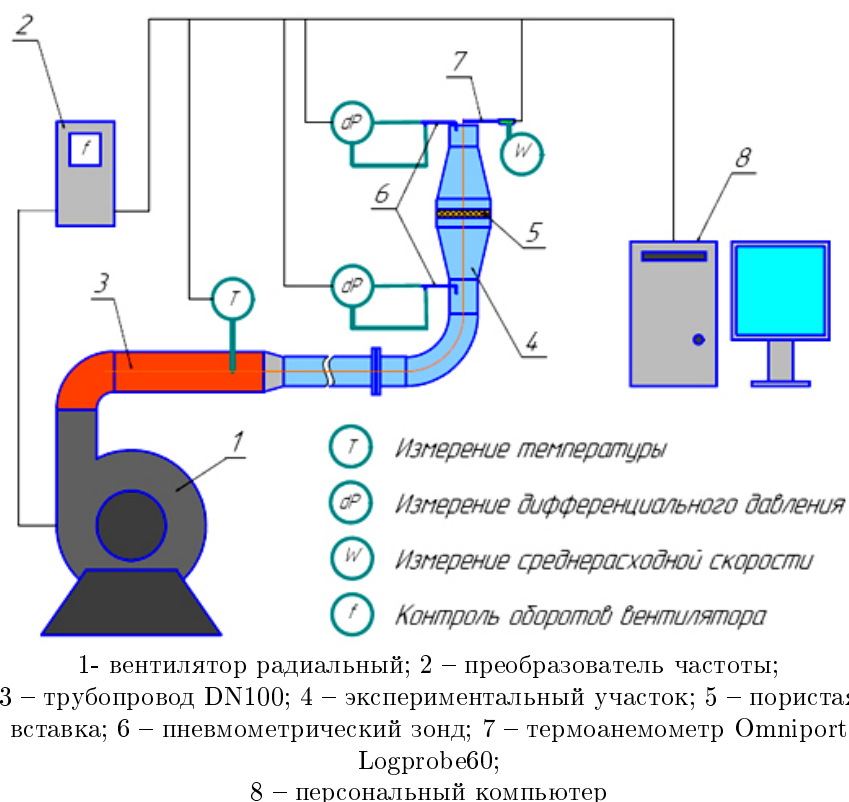


Рис. 5. Схема аэродинамического контура стенда ФТ-18

В каждом сечении измерения локальных значений скорости проводились с помощью пневмометрического зонда Пито-Прандтля и подключенного к нему преобразователя дифференциального давления. Зонд имел диаметр чувствительной части 3 мм и был заранее тарирован с помощью эталонного источника потока Dantec Dynamics StreamLine Pro Automatic Calibrator. В каждом сечении зонд последовательно располагался в нескольких точках, координаты которых записывались в полярной системе координат, согласно схеме, на рисунке 7. Среднерасходная скорость в выходном сечении измерялась с помощью термоанемометра Omniport Logprobe.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: с помощью преобразователя частоты устанавливался режим работы нагнетателя, который поддерживался постоянным во время проведения исследования. Производилось измерение динамического давления с помощью пневмометрического зонда в заданных точках во входном и выходном сечениях экспериментального участка (рисунок 7). В каждом сенсоре с помощью автоматизированной системы сбора данных производилась запись значений динамического давления с шагом измерения 2 секунды. Для усреднения получаемых значений и определения среднеквадратического отклонения измеряемого параметра в каждой точке осуществлялось 60 измерений. Результаты усреднялись и заносились в

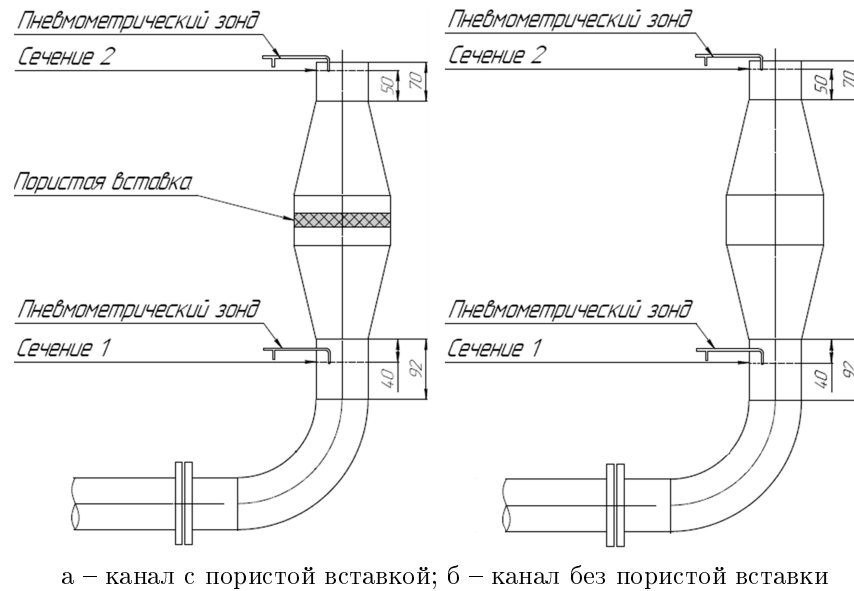


Рис. 6. Схема экспериментального участка


 Рис. 7. Расположение полярной системы координат $\{r, \varphi\}$ в сечении измерения

таблицу. По тарировочной характеристике пневмометрического зонда восстанавливались значения скорости потока рабочей среды. С учетом точности тарировки зонда, преобразователя дифференциального давления и вторичной системы преобразования сигнала, погрешность измерения локальной скорости пневмометрическим зондом не превышала 3% от величины скорости в диапазоне 15–45 м/с. По полученным данным строились картограммы распределения скорости в двух сечениях экспериментального участка.

5 Обсуждение результатов

Ниже приводятся результаты измерения на описанных выше конструкциях. Анализ проводился по распределению относительной осевой скорости в поперечных сечениях за коленом (сечение 1) и за конфузуром (сечение 2). На рисунках 8, 9 и 12 представлены картограммы распределения относительной осевой скорости в контрольных сечениях стационарного расчета по RANS подходу и осредненные характеристики нестационарного режима счета вихреразрешающего подхода, а также экспериментальные данные при $Re = 5 \times 10^4$ и 10^5 .

Относительная осевая скорость определялась следующим образом:

$$z = \frac{W_{r\varphi}}{W_{cp}}, \quad (7)$$

где $W_{r\varphi}$ – скорость в конкретной точке измерения.

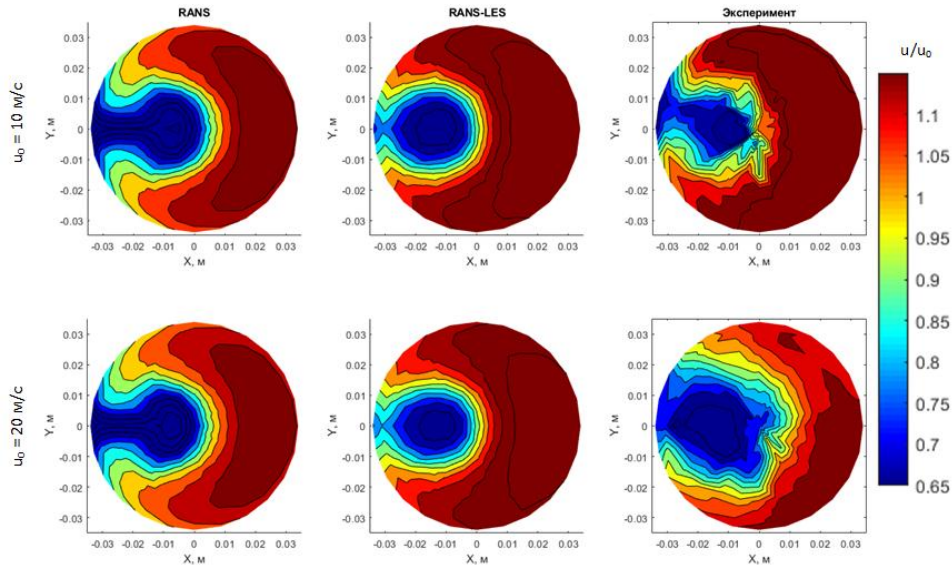


Рис. 8. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении 1

По результатам анализа установлено, что основные характеристики потока качественно совпадают. Поворот вносит существенные изменения в однородность потока и перепад скорости на участках составляет 45%. В сечении 1, представленном на рисунке 6, из распределения скорости отчетливо показаны расположение и форма застойной зоны, положение основного потока. В сечении 2, представленном на рисунке 9, видно, что наиболее близкие к экспериментальным являются результаты, полученные с использованием вихреразрешающего подхода. Неоднородность потока уменьшается и градиент по скорости в сечении снижается с 45% до 15%, расчётные размеры области вторичного течения идентичны экспериментальным данным. Отметим, что осредненные характеристики потока более гладкие, чем их мгновенные значения, что подтверждается экспериментом с учётом асимметричности течения. Аналогичные картины наблюдаются в расчетах на основе вихреразрешающего подхода моделирования течения в нестационарном режиме, что иллюстрируется рисунками 10 и 11, где показано мгновенное распределение скорости в различные моменты времени.

Из рисунков 10 и 11 видно, что течение в конструкции нестационарное и имеет пульсации, как в основном потоке, так и во вторичном течении. На рисунке 11 видно, что на выходе из теплообменника без пористой вставки в потоке по всему сечению канала присутствуют пульсационные характеристики по скорости на уровне 40%, имеющие стохастический характер. Следующая серия

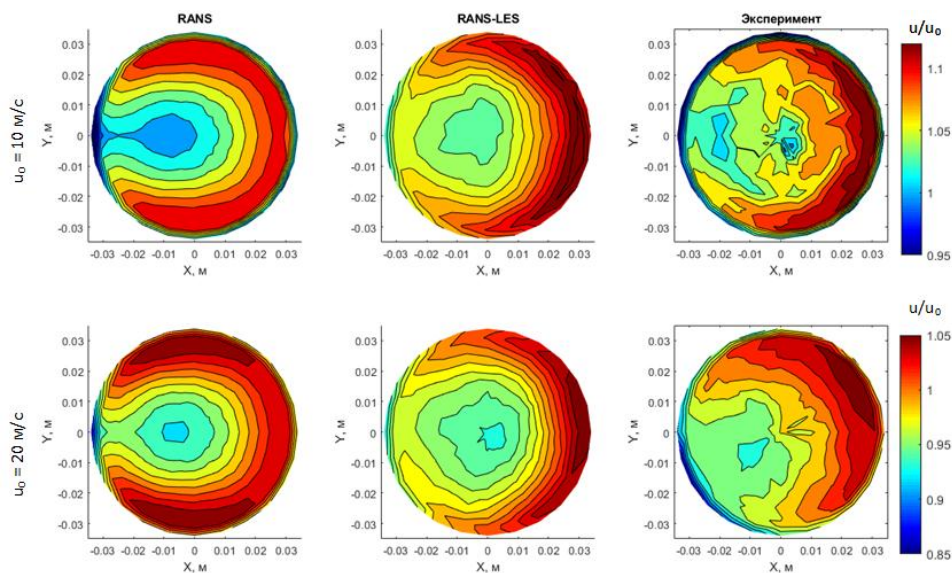


Рис. 9. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении 2

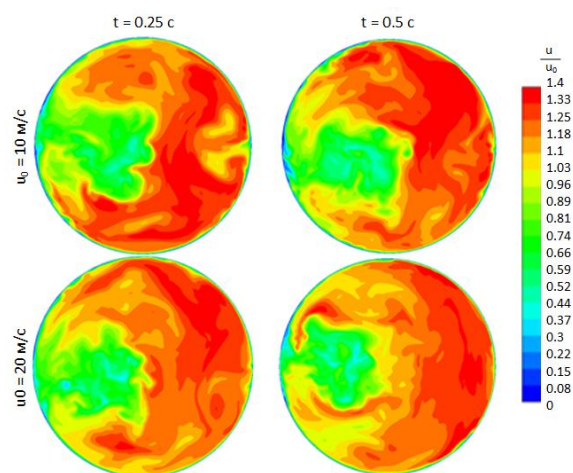


Рис. 10. Распределения маршевой компоненты скорости в сечении 1 в различные моменты времени

расчетов была посвящена исследованию структуры потоков в теплообменнике с пористой вставкой. На рисунке 12 приводится сравнение результатов расчетов течения в конструкции теплообменника с пористой вставкой с экспериментальными результатами. На этих рисунках показано изменение маршевой компоненты скорости в конструкции теплообменника с пористой вставкой с использованием RANS и вихреразрешающих подходов моделирования в сечении за теплообменником. Из качественного сопоставления структуры потока

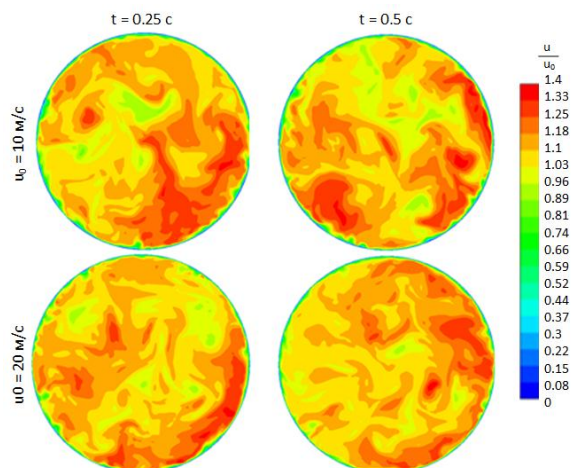


Рис. 11. Распределения маршевой компоненты скорости в сечении 1 в различные моменты времени

и количественных различий делается вывод, что лучшее согласование с экспериментальными данными показывает вихреразрешающий подход, чем RANS постановка.

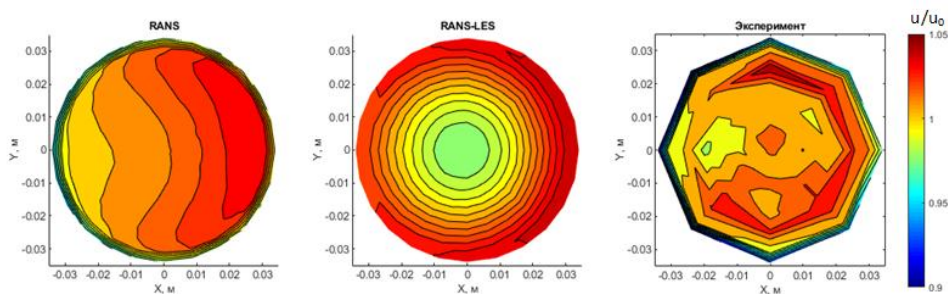


Рис. 12. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за теплообменником с учетом пористой вставки

6 Заключение

С использованием разработанной расчетной технологии проведено численное и экспериментальное исследование течения в конструкции части лазера с теплообменником с пористой вставкой и без нее. Из анализа полученных результатов показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов, что указывает на перспективу использования данной расчетной технологии в дальнейшем для подобного класса задач. Применение пористой вставки позволяет существенно снизить пульсации в потоке. Авторами расчётно показано, что осредненные параметры газового дозвукового потока в

нестационарной постановке с использованием зонного RANS-LES перехода в модели турбулентности качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными в пределах 10% полосы экспериментальных погрешностей, чем результаты стационарных расчетов, основанные на использовании только RANS подхода. В расчете по RANS подходу среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 13%, в то время как в расчете по вихреразрешающему подходу среднее отклонение расходной составляющей компоненты вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 5%. Продemonстрировано, что использование пористой вставки после углового поворота потока газа в трубопроводе на 90 градусов дает в результате практически однородный профиль скорости газа на выходе конструкции. Неоднородность величины скорости в выходном сечении составляет 3%, в то время как в отсутствии пористой вставки неоднородность составляет 40%. Результаты экспериментов подтверждены расчётным моделированием. Эти характеристики могут найти своё применение при создании лазерных трактов газовых лазеров, которые позволят минимизировать выходную расходимость излучения за счет уменьшения вклада нерегулярных неоднородностей плотности потока в устройствах технологической обработки материалов и лазерной связи. Расчётно и экспериментально показано, что использование пористых вставок приводит к снижению уровня неоднородности потока, изначально имеющего после поворота на 90 градусов неоднородное распределение поля скорости и плотности. Полученные результаты указывают на возможность применения пористых структур в качестве элементов выравнивания профиля скорости в перспективных лазерных устройствах.

Список литературы

- [1] B.V. Zhdanov, M.D. Rotondaro, M.K. Shaffer, R.J. Knize, *Low-pressure cesium and potassium diode pumped alkali lasers*, Optical Eng., **55**:2 (2015), Article ID 026105.
- [2] G.A. Pitz, D.M. Stalnaker, E.M. Guild, B.Q. Olier, P.J. Moran, S.W. Townsend, D.A. Hostutler, *Advancements in flowing diode pumped alkali lasers*, Proc. of SPIE, **9729**, 2015, Paper No. 972902.
- [3] I.A. Popov, *Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and devices. Intensification of heat exchange*, Center of innovative technologies, Kazan, 2007.
- [4] E. Yacoby, O. Sadot, B.D. Barmashenko, S. Rosenwaks, *3D CFD modeling of subsonic and transonic flowing-gas DPALs with different pumping geometries*, in David H. Titterton (ed.) et al., *Technologies for optical countermeasures XII; and high-power lasers 2015: Technology and systems*, Proc. of SPIE, **9650**, 2015. Paper No. 96500E.
- [5] B.D. Barmashenko, S. Rosenwaks, K. Waichman, *Semi-analytical and CFD model calculations of subsonic flowing-gas DPALs and their comparison to experimental results*, in Chun Tang (ed.) et al., *XX international symposium on high-power laser systems and applications 2014*, Proc. of SPIE, **9255**, 2015. Paper No. 925520.
- [6] A. Kozelkov, A. Kurkin, V. Kurulin, K. Plygunova, O. Krutyakova, *Validation of the LOGOS software package methods for the numerical simulation of cavitation flows*, Fluids, **8**:3 (2023), Article ID 104.
- [7] A. Kozelkov, E. Tyatyushkina, A. Kurkin, V. Kurulin, O. Kurkina, O. Kochetkova, *Fluid flow simulation in a T-connection of square pipes using modern approaches to turbulence modeling*, Sib. Elektron. Mat. Izv., **20**:1 (2023), 25–46. Zbl 1550.76122

- [8] K.N. Volkov, V.N. Yemelyanov, *Large eddy simulation in turbulent flow calculations*, Fizmatlit, Moscow, 2008.
- [9] F.R. Menter, *Zonal two-equation $k-\varepsilon$ turbulence models for aerodynamic flows*, 24th Fluid Dynamics Conference, AIAA-Paper, 1993, Paper No. 2906.
- [10] Yu.I. Anoshkin, A.A. Dobrov, M.M. Kuzma et al., *Development and justification of the FT-18 experimental stand for the study of mixing processes in models of various geometries*, Transactions NNSTU, **2019**:2(125) (2019), 94–104.

TATYANA YURIENVA BALABINA

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "RUSSIAN FEDERAL NUCLEAR CENTER
- ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PHYSICS"(FSUE "RFNC-
VNIIEF"),

SAROV, RUSSIA

Email address: tybalabina@vniief.ru

ALEXANDER ALEKSEEVICH DOBROV

FEDERAL STATE-FUNDED HIGHER EDUCATION INSTITUTION "NIZHNY NOVGOROD
STATE TECHNICAL UNIVERSITY N.A. R.E. ALEXEYEV

NIZHNY NOVGOROD, RUSSIA

Email address: dobrov@nntu.ru

GRIGORY NIKOLAEVICH KACHALIN

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "RUSSIAN FEDERAL NUCLEAR CENTER
- ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PHYSICS"(FSUE "RFNC-
VNIIEF"),

SAROV, RUSSIA

Email address: kachalingrigorij@mail.ru

EVGENY ALEKSANDROVICH KUDRYASHOV

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "RUSSIAN FEDERAL NUCLEAR CENTER
- ALL-RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PHYSICS"(FSUE "RFNC-
VNIIEF"),

SAROV, RUSSIA

Email address: eakudryashov@vniief.ru

MAXIM ALEKSANDROVICH LEGCHANOV

FEDERAL STATE-FUNDED HIGHER EDUCATION INSTITUTION "NIZHNY NOVGOROD
STATE TECHNICAL UNIVERSITY N.A. R.E. ALEXEYEV

NIZHNY NOVGOROD, RUSSIA

Email address: legchanov@nntu.ru

ALEXANDER EVGENYEVICH KHROBOSTOV

FEDERAL STATE-FUNDED HIGHER EDUCATION INSTITUTION "NIZHNY NOVGOROD
STATE TECHNICAL UNIVERSITY N.A. R.E. ALEXEYEV

NIZHNY NOVGOROD, RUSSIA

Email address: khrobostov@nntu.ru