

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРИМЕНЕНИЕ 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

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 confuser 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, Forchgymer-Brinkman's model, turbulence, SIMPLE algorithm, stream speed profile.

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.

BALABINA T., DOBROV A., KACHALIN G., KUDRYASHOV E., LEGCHANOV M., KHROBOSTOV A., SETTLEMENT PILOT STUDY OF APPLICATION OF ОТКРЫТОПОРИСТЫ СТРУКТУРЫ 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.

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 открыто пористых 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 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.

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 коэффициенты 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 описания структуры течения в типичных элементах 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 выступит 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.

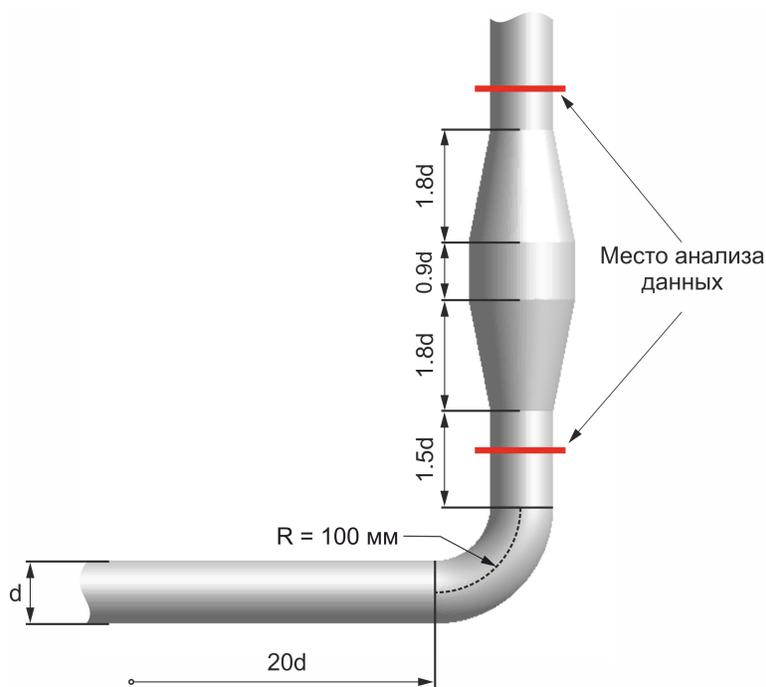


Рис. 1. Схема исследуемой конструкции

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°C при атмосферном давлении.

Число Рейнольдса определялось следующим образом:

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

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, по которым производился анализ эксперимента. На рисунке 2 показана схема расположения сенсоров. В совокупности было определено около 200 сенсоров на каждое сечение. Время сбора информации в точке составляло 2 с.

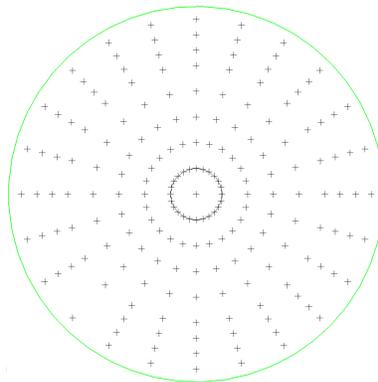


Рис. 2. Расположение сенсоров в сечении измерения

Одной из задач при конструировании газодинамического лазера с замкнутым циклом является утилизация тепла, который образуется в результате генерации источника излучения. Для эффективного отвода тепла и увеличения теплообмена применяется специальная конструкция, в которых увеличивается поверхность площади 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 потока. Схема конструкции теплообменника с пористой вставки представлена на рисунок 3.

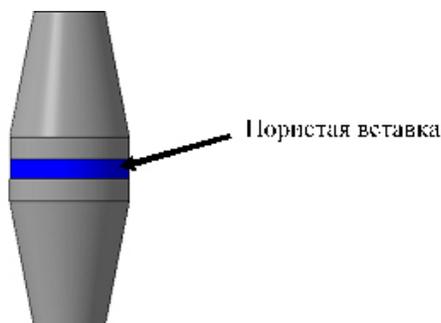


Рис. 3. Размещение пористой вставки внутри теплообменника

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 интегрируются на 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-Stocks или RANS) имеют следующий вид:

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

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:

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

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:

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

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 Ментера [9]. SST модель представляет собой комбинацию $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей, обеспечивающую сочетание лучших качества этих моделей [7]. Уравнения модели следующие

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

где

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

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

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

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

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega1} = 0.5, \beta_1 = 0.075, \sigma_{k2} = 1.0, \sigma_{\omega2} = 0.856,$$

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

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

Турбулентная вязкость в этой модели определяется выражением [9]

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

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 вихререзающем 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 вихререзающего 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.

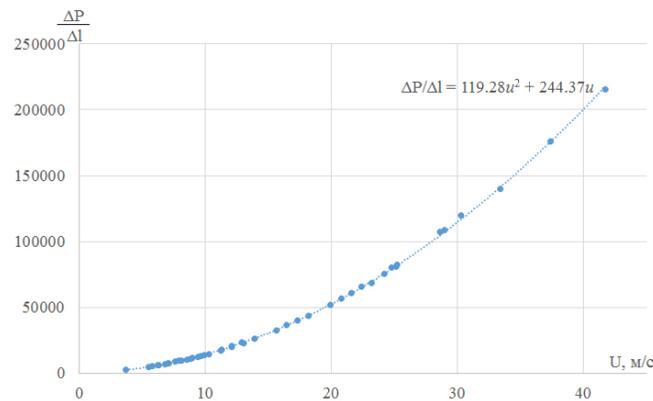


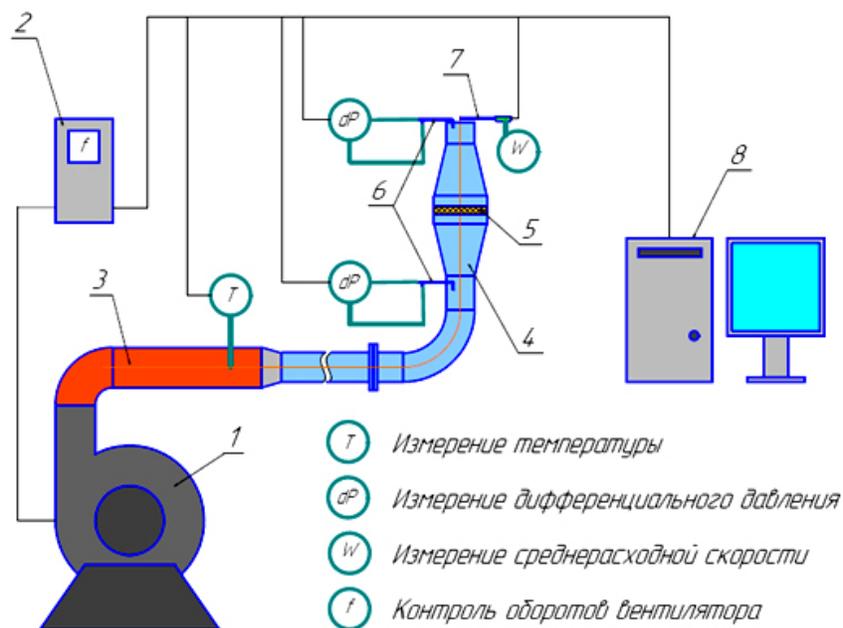
Рис. 4. Зависимость перепада давления от входной скорости потока [10]

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 вязкостной 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.

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 $\pm(0.2 \text{ м/с} + 0.2\%$, массового расхода)
- Точность определения температуры $\pm 0.7\text{C}$
- Время отклика $\leq 1.5 \text{ с}$.

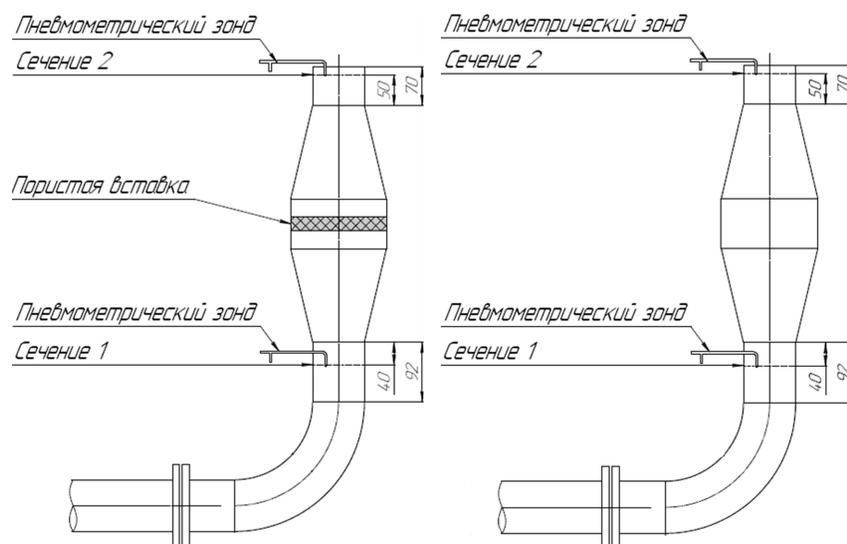


1- вентилятор радиальный; 2 – преобразователь частоты; 3 – трубопровод DN100; 4 – экспериментальный участок; 5 – пористая вставка; 6 – пневмометрический зонд; 7 – термоанемометр Omniport Logprobe60; 8 – персональный компьютер

Рис. 5. Схема аэродинамического контура стенда ФТ-18

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 %.



а – канал с пористой вставкой; б – канал без пористой вставки

Рис. 6. Схема экспериментального участка

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.

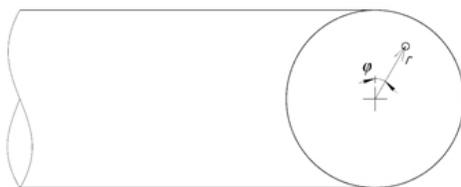


Рис. 7. Расположение полярной системы координат r, φ в сечении измерения

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 каждой точке 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 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 и за конфузуром. 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 определяется следующим образом:

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

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

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 с использованием вихреразрешающего

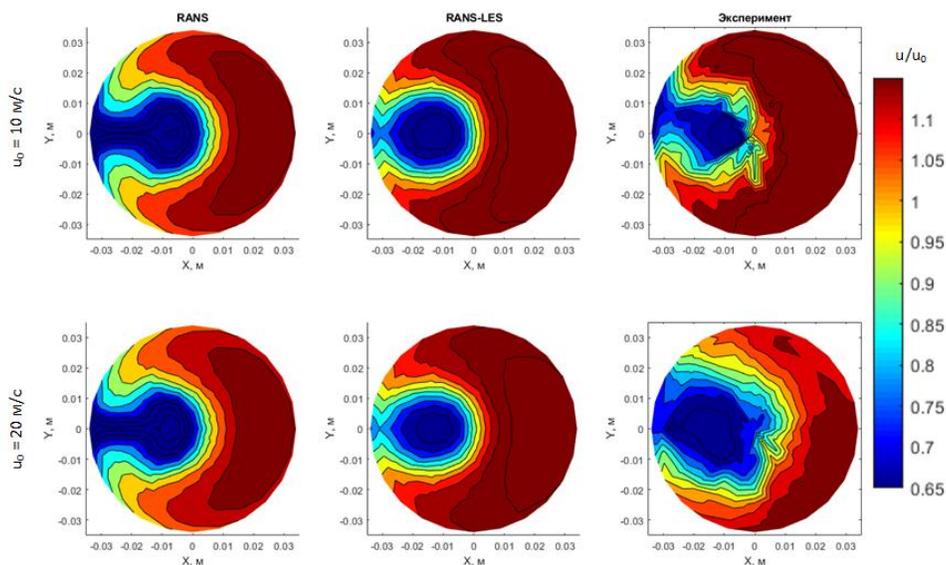


Рис. 8. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за поворотом

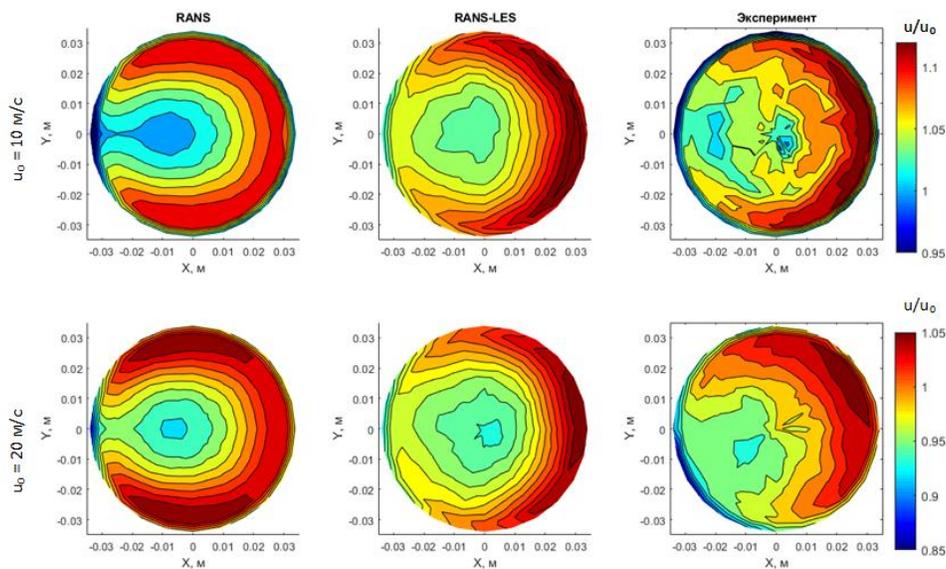


Рис. 9. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за конфузуром

подхода. Неоднородность потока уменьшается и градиент по скорости в сечении снижается с 45% до 15%, размеры области вторичного течения идентичны

размерам из экспериментальных данных. Отметим, что осредненные характеристики потока более гладкие, чем их мгновенные значения, что подтверждается экспериментальными данными. Экспериментальные данные указывают на асимметричность течения. Аналогичные картины наблюдаются в расчетах на основе вихререзающего похода моделирования течения в нестационарном режиме, что иллюстрируется на рисунках 10 и 11, где показано мгновенное распределение скорости в различные моменты времени.

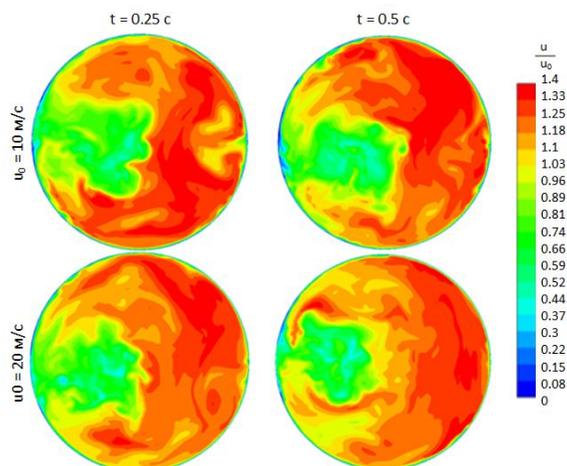


Рис. 10. Распределения маршевой компоненты скорости в сечении за коленом в различные моменты времени

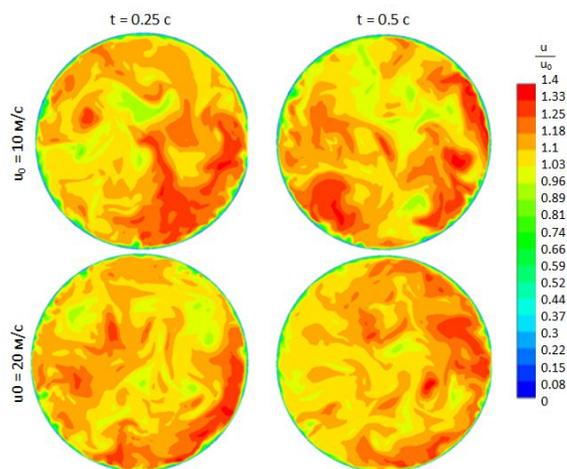


Рис. 11. Распределения маршевой компоненты скорости в сечении за коленом в различные моменты времени

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

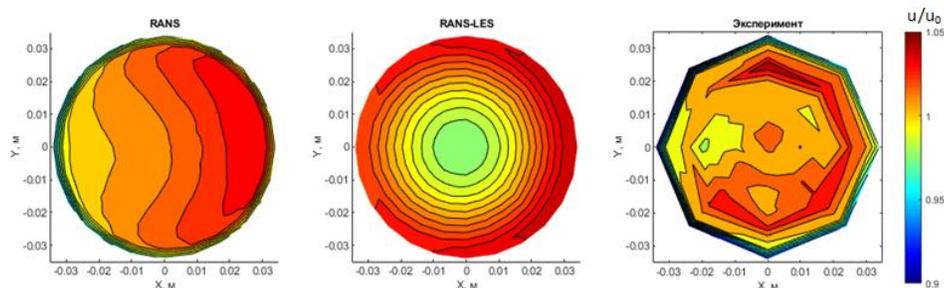


Рис. 12. Сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными по относительной скорости в сечении за теплообменником с учетом пористой

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 на подобном классе 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 вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 13%, в то время как в расчете по вихреразрешающему подходу среднее отклонение расходной составляющей вектора скорости по сечению от экспериментального значения составило менее 5%. Продемонстрировано, 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. Расчётное 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.

REFERENCES

- [1] B.V.Zhdanov, M.D.Rotondaro, M. K.Shaffer, R. J.Knize, /it Low-pressure cesium and potassium diode pumped alkali lasers, *Optical Engineering*, **55**(2) (2015), 026105, <https://DOI:10.1117/1.OE.55.2.026105>.
- [2] G. A. Pitzl, D. M. Stalnaker, E. M. Guild, B. Q. Olikek, P. J. Moran, S.W. Townsend, D. A. Hostutler /it Advancements in flowing diode pumped alkali lasers, *Proc. of SPIE Vol. 9729* (2015), 972902, <https://DOI:10.1117/12.2217078>.
- [3] I.A. Popov, *Hydrodynamics and heat exchange in porous heatexchange elements and devices. Heat exchange intensification: monograph. Center of innovative technologies, Kazan, (2007), 240 p.*
- [4] E.Yacoby, O.Sadot, B D.Barmashenko, S.Rosenwaks, 3D CFD modeling of subsonic and transonic flowing-gas DPALs with different pumping geometries *Technologies for Optical Countermeasures XII; and High-Power Lasers 2015: Technology and Systems*, edited by Harro Ackermann, Willy L. Bohn, David H. Titterton, Robert J. Grasso, Mark A. Richardson, *Proc. of SPIE Vol. 9650, 96500E*, <https://doi: 10.1117/12.2208264>.
- [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, *XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014, Proc. of SPIE Vol. 9255, (2015) 925520*, <https://doi: 10.1117/12.2070676>.
- [6] A. Kozelkov, A. Kurkin, V. Kurulin, K. Plygunova, O. Krutyakova, *Validation of the LOGOS Software Package Methods for the Numerical Simulation of Cavitational Flows, Fluids 8 (2023) 104*, <https://doi.org/10.3390/fluids8030104>.
- [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 Siberian Electronic Mathematical Reports*
- [8] K.N. Volkov, V.N. Yemelyanov *Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows. Fizmatlit, Moscow, (2008) 368 p.*
- [9] F.R. Menter *Zonal two-equation $k - \epsilon$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA-Paper 1993-2906.*
- [10] Yu.I. Anoshkin, A.A. Dobrov, M.M. Kuzma and [et al.] *Development and justification of the FT-18 experimental stand for the study of mixing processes in models of various geometries, Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, 2 (125) (2019), 94-104*, https://DOI 10.46960/1816-210X2019_2_94.

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: kachalingrigoirij@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