



ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ ДИФFUЗОРЕ ПРИ ПОДАЧЕ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ РАЗНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ТРУБОК

Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Медведев В.А., Смирных М.Д., Осипов Л.Е.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Вертикальные конические диффузоры применяются в различных технических приложениях: теплообменные аппараты, газоочистные агрегаты, котлы, промышленные печи, сушильные установки, вентиляционные устройства, системы форсунок и другие. Для их эффективной эксплуатации необходимо обеспечивать равномерный подвод рабочей среды в устройство, что определяется особенностями течения в диффузоре. Таким образом, изучение аэродинамики технологических устройств с коническими диффузорами является актуальной задачей для газодинамического совершенствования и поиска способов управления характеристиками потоков. **ЦЕЛЬ.** На основе экспериментальных данных о мгновенных значениях скорости потока воздуха установить эволюцию поля скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных конфигураций подающих трубок, а также определить величину изменения интенсивности турбулентности по высоте диффузора при разных начальных условиях. **МЕТОДЫ.** Измерение мгновенных значений скорости потока воздуха осуществляется с помощью термоанемометра постоянной температуры. В статье получены данные о полях скоростей и интенсивности турбулентности по высоте и вдоль диаметра цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки разных конфигураций. Использовались подающие трубки с поперечными сечениями в форме круга, квадрата и равностороннего треугольника. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье дано подробное описание экспериментального стенда (включая ключевые геометрические размеры), приборно-измерительной системы и методики обработки данных. Представлены диапазоны изменения начальных условий для проведения опытов. Производится сравнение аэромеханических характеристик потоков в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через разные конфигурации трубок. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что в диффузоре имеет место падение средней скорости вверх по течению, что характерно для всех конфигураций подающих трубок. Установлено, что профилированные трубки оказывают влияние на форму поля скоростей. Выявлено, что значения интенсивности турбулентности изменяются от 0,05 до 0,39 (наибольшие значения характерны при подаче воздуха через профилированные трубки). Показано, что интенсивность турбулентности имеет максимальные значения на высоте 300-350 мм, что характерно для всех исследуемых конфигураций трубок.

Ключевые слова: вертикальный конический диффузор; аэродинамика; стационарный поток; профилированные трубки; поле скоростей; интенсивность турбулентности; эмпирические закономерности.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Для цитирования: Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Медведев В.А., Смирных М.Д., Осипов Л.Е. Физическое моделирование аэродинамических характеристик потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через разные конфигурации трубок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 2. С. 187-200. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-187-200.

PHYSICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC FLOW CHARACTERISTICS IN A VERTICAL DIFFUSER WITH AIR SUPPLY THROUGH DIFFERENT PIPE CONFIGURATIONS

LV. Plotnikov, AF. Ryzhkov, VA. Medvedev, MD. Smirnykh, LE. Osipov
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE. Vertical cone diffusers are used in various technical applications: heat exchangers, gas cleaning units, boilers, industrial furnaces, dryers, ventilation devices, nozzle systems and others. For their efficient operation, it is necessary to ensure a uniform supply of the working medium to the device, which is determined by the characteristics of the flow in the diffuser. Thus, the study of the aerodynamics of technological devices with conical diffusers is an urgent task for gas-dynamic improvement and the search for ways to control flow characteristics. THE PURPOSE. To establish the evolution of the velocity field along the height of the cylindrical part of the diffuser for different configurations of the supply tubes, and also to determine the magnitude of the change in the intensity of turbulence along the height of the diffuser under different initial conditions based on experimental data on the instantaneous values of the air flow velocity. METHODS. Measurement of instantaneous values of air flow velocity is carried out using a constant temperature hot-wire anemometer. The article provides data on velocity fields and turbulence intensity along the height and along the diameter of the cylindrical part of the diffuser when air is supplied through tubes of different configurations. Feed tubes with cross sections in the form of a circle, a square and an equilateral triangle were used. RESULTS. The article provides a detailed description of the experimental stand (including key geometric dimensions), instrumentation and measurement system, and data processing techniques. The ranges of changes in the initial conditions for the experiments are presented. A comparison of the aeromechanical characteristics of flows in a vertical diffuser when air is supplied through different tube configurations is carried out. CONCLUSION. It is shown that in the diffuser there is a drop in the average velocity upstream, which is typical for all configurations of the supply tubes. It has been established that profiled tubes influence the shape of the velocity field. It was found that the values of turbulence intensity vary from 0.05 to 0.39 (the highest values were typical when air was supplied through profiled tubes). It is shown that the intensity of turbulence has its maximum values at a height of 300-350 mm, which is typical for all investigated tube configurations.*

Keywords: vertical cone diffuser; aerodynamics; stationary flow; profiled tubes; velocity field; turbulence intensity; empirical regularities.

Acknowledgments: The research funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Ural Federal University Program of Development within the Priority-2030 Program) is gratefully acknowledged.

For citation: LV. Plotnikov, AF. Ryzhkov, VA. Medvedev, MD. Smirnykh, LE. Osipov. Physical simulation of aerodynamic flow characteristics in a vertical diffuser with air supply through different pipe configurations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(2): 187-200. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-187-200.

Введение (Introduction)

Почти во всех отраслях техники применяют устройства, основной технологический процесс в которых связан с перемещением жидкости или газа. Примерами такого оборудования могут служить теплообменные аппараты, газоочистные агрегаты, котлы, различное химическое оборудование, промышленные печи), сушильные установки различных типов, вентиляционные устройства, системы форсунок и другие. Практически все эти устройства имеют рабочую камеру или подводящие каналы с коническим диффузором [1]. Эксплуатация описанных выше устройств показала, что их расчетная эффективность достигается не всегда [2]. Во многих случаях это обусловлено неравномерным подводом рабочей среды к рабочей зоне устройства, а соответственно, физическими особенностями течения в диффузоре и соответствующими

газодинамическими потерями [3, 4]. Все это свидетельствует о важности изучения аэродинамики технологических устройств с коническими диффузорами с точки зрения газодинамического совершенствования и поиска способов управления характеристиками потоков. Более того, необходимо получение достоверных экспериментальных данных об особенностях газодинамики потоков и их математическое описание для совершенствования инженерных методик расчета конических диффузоров и уточнения математических моделей [5, 6].

Краткий обзор классических (фундаментальных) исследований и современных данных об аэродинамических характеристиках в коническом диффузоре представлен ниже.

Существуют базовые исследования о газодинамике течений в конических диффузорах для разных конструкций и при различных начальных уровнях интенсивности турбулентности. Например, Klein A. Провел опыты и сделан анализ экспериментальных данных о влиянии условий на входе на характеристики конических диффузоров [7]. В частности, в статье описаны эффекты блокировки толщины входного пограничного слоя при разных формах входа потока, интенсивности турбулентности и числах Рейнольдса. Jeyachandran K. and Ganesan V. исследовали влияние различных газодинамических условий на входе в диффузор с помощью физико-математического моделирования [8]. В работе представлен анализ данных о профилях скорости, мощности импульса, коэффициенте формы, производительности и эффективности исследуемых диффузоров. Okwuobi P.A.C. and Azad R.S. экспериментально изучали структуру потока и характеристики турбулентности в коническом диффузоре при полностью развитом потоке на входе [9]. В итоге, установлены базовые физические закономерности и сформулированы рекомендации по проектированию конических диффузоров [7-9].

Следует отметить, что существуют современные исследования газодинамических характеристик потоков газа в различных конфигурациях диффузоров, которые нацелены на уточнение методик расчета, дополнение базы знаний о физических механизмах и создание оригинальных математических моделей [10-13]. Так, Ferrari A. предложил аналитические зависимости, которые дополняют модели Fanno, относящиеся к вязкому адиабатическому течению в трубе постоянного сечения и невязкому адиабатическому течению в коническом диффузоре [10]. Эти новые зависимости расширяют набор точных решений газовой динамики и позволят повысить качество математических моделей. Lee J. и соавторы исследовали характеристики турбулентности и когерентных структур в потоке газа через конический диффузор с разными углами раскрытия (2° , 4° и 8°) на основе численного моделирования [11]. Полученные данные позволили уточнить физические особенности газодинамики стационарных течений в диффузорах. Wu X. и др. обнаружили внутренний слой в потоке газа через ассиметричный плоский диффузор на основе физико-математического моделирования [12]. Исследования позволяют улучшить методики инженерных расчетов диффузоров. De Souza F.J. и соавторы исследовали газодинамику потока воздуха с различными частицами в вертикальном коническом диффузоре с помощью численного моделирования [13]. Было выявлено, что даже небольшое количество частиц существенно влияют на форму потока в диффузоре и поток может снова прилипнуть к стенке при некоторых условиях.

Следует отметить, что существует большое количество прикладных исследований по использованию диффузоров в различных технических устройствах. Например, диффузоры активно применяются в органическом цикле Ренкина [14-18]. В этом цикле ключевым устройством является турбодетандер, который оснащен диффузором на выходе для увеличения восстановления давления и улучшения КПД турбины. Так, Zou A. и др. осуществляли оптимизацию конструкции диффузора для конкретной турбины на основе численного моделирования [14]. Dong B. с соавторами проводили оценку влияния параметров газа на входе в диффузор на его газодинамические характеристики (в частности, коэффициент скорости) с помощью математического моделирования [15]. From C.S. и др. изучали влияние интенсивности турбулентности потока на входе в диффузор на газодинамику и ее влияние на показатели конкретной турбины [17]. Кеер J.A. с соавторами исследовали геометрию комбинированного (кольцевого-радиального) диффузора на газодинамические характеристики потоков и эффективность турбины в органическом цикле Ренкина [18].

Диффузорные каналы активно применяются и изучаются во многих других технических приложениях. Можно выделить некоторые из них. Например, остается актуальной задача по оптимизации формы и параметров потоков в диффузоре для камеры смешения в эжекторах [19, 20], доводка сверхзвуковых диффузоров [21], оценка параметров в диффузорах для авиационных газотурбинных двигателей [22], внедрение и расчет диффузора в реактор для окисления аммиака [23], моделирование и совершенствование аэродинамики диффузоров в трубчатом реакторе [24] и промышленной печи [25].

Таким образом, на основе анализа литературных данных других авторов можно сделать следующие выводы:

- газодинамическое совершенствование и разработка способов управления газодинамикой потоков в коническом диффузоре остается актуальной задачей для фундаментальной и прикладной науки;
- современные исследования газодинамических характеристик потоков в конических диффузорах осуществляются в основном посредством численного моделирования;
- существует недостаток достоверных экспериментальных данных о газодинамических характеристиках потоков в вертикальном коническом диффузоре для верификации математических моделей.

Соответственно, основные задачи данного исследования состояли в следующем:

- получить экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости потока воздуха по высоте и по диаметру цилиндрической части диффузора для разных начальных условий;
- установить эволюцию полей скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных конфигураций подающих трубок;
- экспериментально определить величину падения средней скорости и изменение интенсивности турбулентности по высоте диффузора при разных начальных условиях.

Материалы и методы (Materials and methods)

Аэродинамика стационарных потоков в вертикальном диффузоре исследовалось на лабораторной установке, основные элементы которой показаны на рисунке 1. Конический диффузор состоял из трех основных элементов: (1) основание с диаметром 50 мм, в которое устанавливались четыре подающие трубки под углом 45°; (2) конический участок с соотношением 1:2 (50 мм на 100 мм); (3) цилиндрический участок с диаметром 100 мм и высотой 1000 мм. По высоте диффузора было 4 контрольных сечения на высоте 100 мм, 300 мм, 500 мм и 800 мм. В каждом контрольном сечении проводились измерения мгновенных значений скорости потока воздуха вдоль диаметра цилиндрической части на расстояниях 10 мм (у стенки), 20 мм, 30 мм, 40 мм и 50 мм (в центре диффузора).

Рабочей средой в опытах является воздух с температурой $t = 20-22$ °С и барометрическим давлением $p_o = 0,1013$ МПа. Характерное сечение в данной работе было принято на высоте 100 мм и центре цилиндрической части диффузора (на расстоянии 50 мм). В ходе проведения экспериментов средняя скорость потока воздуха в характерном сечении изменялась от 4 м/с до 8 м/с ($26500 < Re < 53500$). Соответственно, режим течения в данном исследовании являлся развитым турбулентным.

Автоматизированная система измерений состояла из следующих основных элементов: термоанемометр с датчиками, аналого-цифровой преобразователь и ноутбук с программным обеспечением. Измерения мгновенных значений скорости потока воздуха w_x производились с помощью термоанемометра постоянной температуры. В качестве чувствительного элемента датчика термоанемометра использовалась нихромовая нить диаметром 5 мкм и длиной 4 мм. Было изготовлено 5 датчиков с расположением нити на расстояниях 10, 20, 30, 40 и 50 мм. Данные с термоанемометра (выходной сигнал от 0 до 5 В) поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее они передавались в ноутбук для обработки на специализированном программном обеспечении. Стандартная относительная неопределенность измерения скорости потока воздуха составляла 3,6 %. Измерительная система и особенности ее функционирования несколько подробнее описаны в [26, 27].

Средняя скорость потока w в измерительной точке определялась как математическое ожидание функции $w_x = f(\tau)$. Одной из ключевых аэродинамических характеристик потоков в диффузорах является интенсивность турбулентности Tu . В данном исследовании Tu

рассчитывалась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока [27].

Известно, что форма поперечного сечения трубопроводов оказывает существенное влияние на структуру потока в них [2, 28, 29]. Поэтому в данном исследовании воздух поступал в вертикальный диффузор через подающие трубки, имеющие разные формы поперечного сечения (рис. 2).

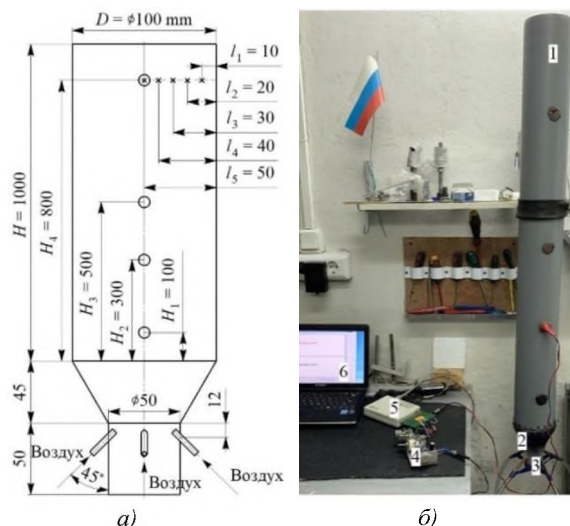


Рис. 1. Геометрические размеры (а) и фотография (б) экспериментальной установки для исследования аэродинамических характеристик потоков в вертикальном диффузоре: 1 – цилиндрическая часть установки; 2 – диффузор; 3 – основание с подающими трубками; 4 – термоанемометр для измерения мгновенных значений скорости потока; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – ноутбук для сбора и обработки экспериментальных данных

Fig. 1. Geometric dimensions (a) and photograph (b) of the experimental apparatus for the investigation of aerodynamic characteristics of streams in the vertical diffuser: 1 - cylindrical part of the installation; 2 - diffuser; 3 - base with feeding tubes; 4 - Thermoanemometer to measure instantaneous flow rates; 5 - analog-digital converter; 6 - notebook to collect and process experimental data

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

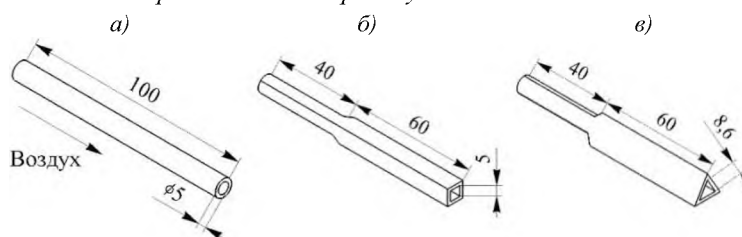


Рис. 2. Общий вид и основные размеры трубок для подачи воздуха в вертикальный диффузор: а – трубка с круглым поперечным сечением; б – трубка с участком с квадратным поперечным сечением; в – трубка с участком с треугольным поперечным сечением

Fig. 2. General appearance and main dimensions of tubes for air supply to vertical diffuser: a - round cross-section tube; b - square cross-section tube; c - triangular section tube

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Геометрические размеры поперечных сечений подающих трубок определялись исходя из равенства эквивалентных гидравлических диаметров. Соответственно, круглые трубки имели диаметр $d = 5$ мм, сторона квадратных трубок равнялась также 5 мм, а сторона трубок с треугольным поперечным сечением – 8.6 мм.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 3 показаны первичные данные в виде функции $w_x = f(\tau)$ для датчика в первом сечении ($H_1 = 100$ мм) в центре цилиндрической части диффузора ($l_5 = 50$ мм) при подаче воздуха через разные конфигурации трубок. Следует отметить, что данные подобраны так, что средняя скорость в первом сечении является примерно одинаковой для всех представленных данных и составляет около 4.5 м/с.

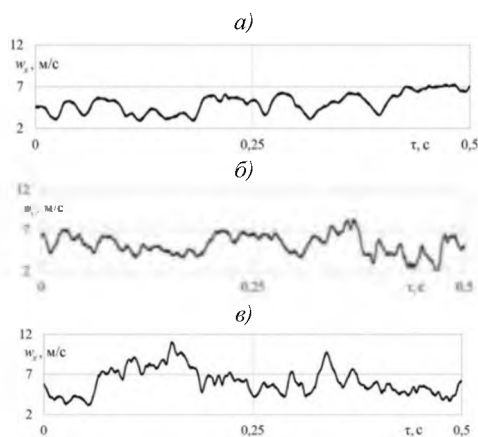


Рис. 3. Зависимости местных значений скорости потока воздуха w_x от времени τ в первом контрольном сечении ($H_1 = 100$ мм) для датчика в центре установки ($l_5 = 50$ мм) для разных конфигураций подающих трубок: а – круглая трубка (параметры в сечении: $w_1 = 4,2$ м/с, $Tu = 0,231$); б – квадратная трубка ($w_1 = 4,45$ м/с, $Tu = 0,18$); в – треугольная трубка ($w_1 = 4,48$ м/с, $Tu = 0,285$)

Fig. 3. Dependence of local air flow rates w_x on the time τ in the first reference section ($H_1 = 100$ mm) for the sensor in the centre of the installation ($l_5 = 50$ mm) for different feed tube configurations: а - round tube (parameters in the cross section: $w_1 = 4.2$ m/s, $Tu = 0.231$); б - square tube ($w_1 = 4.45$ m/s, $tu = 0.18$); в - triangular tube ($w_1 = 4.48$ m/s, $tu = 0.285$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 3 видно, что функция $w_x = f(\tau)$ является белым шумом для всех конфигураций подающих трубок. При этом, визуальные наблюдения показывают, что использование профилированных трубок приводит к формированию небольших флуктуаций в функцию $w_x = f(\tau)$. Это также подтверждается расчетными данными: Tu для круглых трубок составляет 0.231, а Tu равняется 0.285 для треугольных трубок (отличия почти 20 %). Это объясняется тем, что в углах профилированных трубок создаются устойчивые, вихревые структуры, которые турбулизируют течение в диффузоре. Аналогичные газодинамические эффекты были обнаружены в работах [28, 29]. Также следует отметить, что представленные зависимости нецелесообразно описывать математически, поскольку эти данные являются частными случаями.

На рисунке 4 показаны также первичные данные в виде функции $w_x = f(\tau)$, но уже для датчика в третьем сечении ($H_3 = 300$ мм) в центре цилиндрической части диффузора ($l_5 = 50$ мм) при подаче воздуха через разные конфигурации трубок.

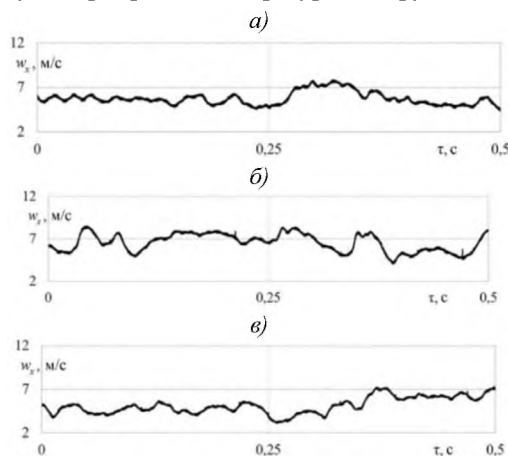


Рис. 4. Зависимости местных значений скорости потока воздуха w_x от времени τ в третьем контрольном сечении ($H_3 = 500$ мм) для датчика в центре установки ($l_5 = 50$ мм) для разных конфигураций подающих трубок: а – круглая трубка (параметры в сечении: $w_3 = 4,81$ м/с, $Tu = 0,124$); б – квадратная трубка ($w_3 = 4,85$ м/с, $Tu = 0,313$); в – треугольная трубка ($w_3 = 4,79$ м/с, $Tu = 0,199$)

Fig 4. Dependence of local air flow rate w_x on the time τ in the third reference section ($H_3 = 500$ mm) for the sensor in the centre of the installation ($l_5 = 50$ mm) for different feed tube configurations: а - round tube (parameters in the cross section: $w_3 = 4.81$ m/s, $Tu = 0.124$); б - square tube ($w_3 = 4.85$ m/s, $tu = 0.313$); в - triangular tube ($w_3 = 4.79$ m/s, $tu = 0.199$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На основе сравнения функций $w_x = f(\tau)$ на рис. 3 и 4 установлено, что наблюдается существенное снижение небольших флуктуаций скорости вверх по потоку. Это свидетельствует о постепенной релаксации потока по высоте цилиндрической части диффузора.

Далее осуществлялось осреднение данных в каждом контрольном сечении по высоте и по диаметру диффузора. В результате были получены поля скоростей в цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями (рис. 5-7).

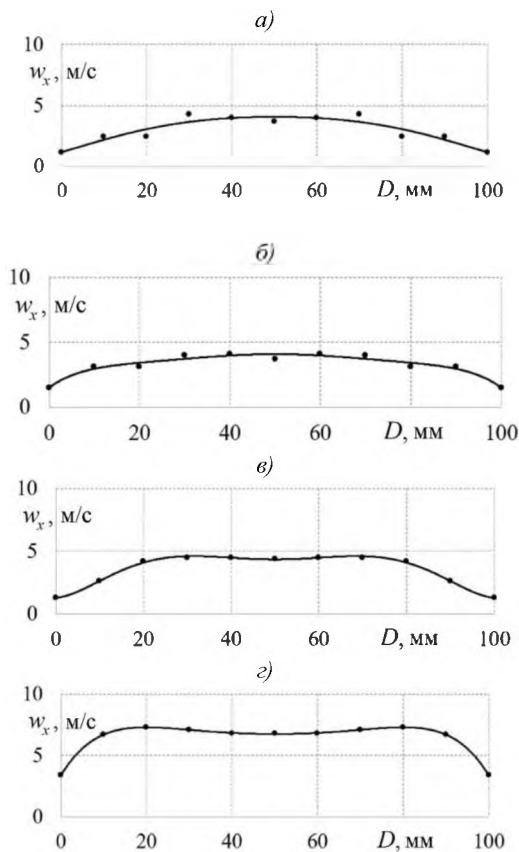


Рис. 5. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через круглые трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,31$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 5. Change of local flow rates w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through round tubes for initial mean flow rate in the first section $w_1 \approx 6.31$ m/s in mounting height: а - $H_4 = 800$ mm; б - $H_3 = 500$ mm; в - $H_2 = 300$ mm; г - $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 5 видно, что имеет место снижение средней скорости потока по высоте цилиндрической части диффузора (подача воздуха через круглые трубки). Также наблюдается изменение формы поля скоростей вверх по потоку. Аналогичные результаты были получены в случае подачи воздуха через профилированные трубки (рис. 6 и 7). Также существует падение скорости по высоте диффузора. Следует отметить, что поля скоростей при подаче воздуха через треугольные трубки несколько отличается от других конфигураций. Это может быть следствием влияния вихревых структур, которые образуются в углах треугольных трубок.

Следует отметить, что обнаруженные газодинамические эффекты сохраняются для всех исследуемых начальных скоростей подачи воздуха и для всех конфигураций подающих трубок. Соответственно, можно предположить, что существует необходимость в математическом описании интегральных аэродинамических характеристик потоков для исследуемых конфигураций вертикального конического диффузора. Эти данные позволят уточнить математические модели и алгоритмы инженерных расчетов диффузоров для различных технических устройств.

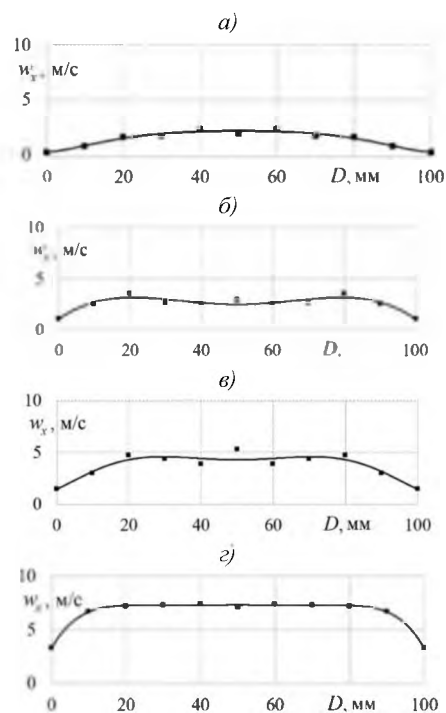


Рис. 6. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через квадратные трубки для начальной скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,45$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 6. Change of local flow rate w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through square tubes for initial flow rate in the first section $w_1 \approx 6.45$ m/s in mounting height: а – $H_4 = 800$ mm; б – $H_3 = 500$ mm; в – $H_2 = 300$ mm; г – $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

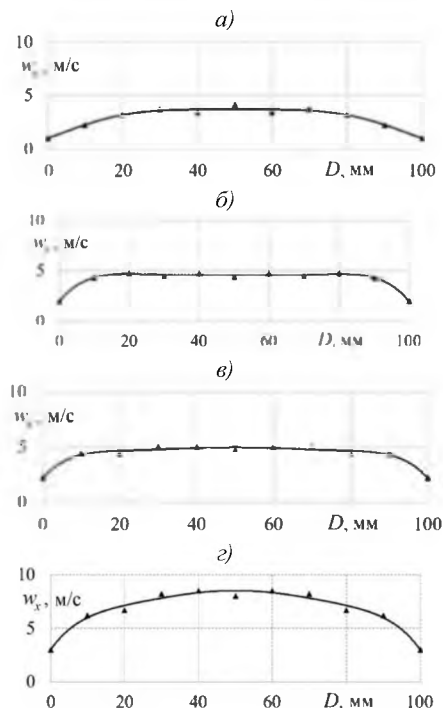


Рис. 7. Изменение местных значений скорости потока w_x вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через треугольные трубки для начальной скорости потока в первом сечении $w_1 \approx 6,65$ м/с по высоте установки: а – $H_4 = 800$ мм; б – $H_3 = 500$ мм; в – $H_2 = 300$ мм; г – $H_1 = 100$ мм

Fig. 7. Change of local flow rates w_x along cylinder diameter D when air is fed into the diffuser through triangular tubes for initial flow rate in the first section $w_1 \approx 6.65$ m/s in mounting height: а – $H_4 = 800$ mm; б – $H_3 = 500$ mm; в – $H_2 = 300$ mm; г – $H_1 = 100$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На рисунке 8 показаны примеры изменения интенсивности турбулентности Tu вдоль диаметра цилиндрической части диффузора в первом сечении при подаче воздуха через трубки разных конфигураций.

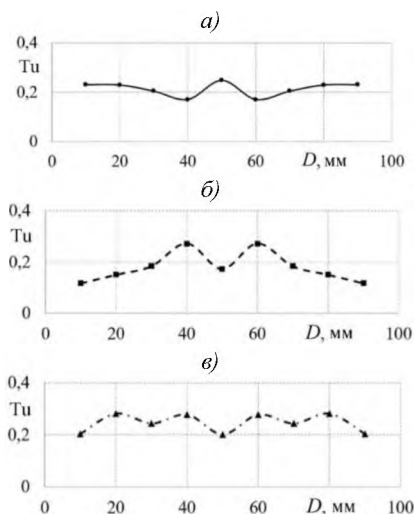


Рис. 8. Изменение интенсивности турбулентности Tu (в первом сечении $H1 = 100$ мм) вдоль диаметра цилиндра D при подаче воздуха в диффузор через трубки разных конфигураций: а – круглая трубка ($w1 \approx 6,65$ м/с, $Tu1 = 0,213$); б – квадратная трубка ($w1 \approx 6,45$ м/с, $Tu1 = 0,180$); в – треугольная трубка ($w1 \approx 6,65$ м/с, $Tu1 = 0,245$)

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Из рисунка 8 и всего массива полученных данных можно сделать следующие выводы:

- не обнаружено четких закономерностей в изменении Tu вдоль диаметра цилиндрической части диффузора;
- влияние формы поперечного сечения трубок на вид функции $Tu = f(D)$ также не установлено (по мнению автора, изменения носят случайный характер);
- амплитуда колебаний значений интенсивности турбулентности относительно среднего значения составляет $\pm 35\%$;
- математическое описание функций $Tu = f(D)$ для исследуемых случаев является нецелесообразным до установления физических закономерностей.

На рисунке 9 показаны закономерности падения средней скорости в контрольном сечении по высоте цилиндрической части диффузора при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями для разных начальных скоростей потока.

Установлено, что закономерности снижения скорости вверх по потоку с достаточной точностью описываются экспоненциальной зависимостью $w = a \cdot e^{-b \cdot H}$. При этом, форма поперечного сечения трубок фактически не оказывает влияние на интенсивность падения скорости потока воздуха по высоте установки.

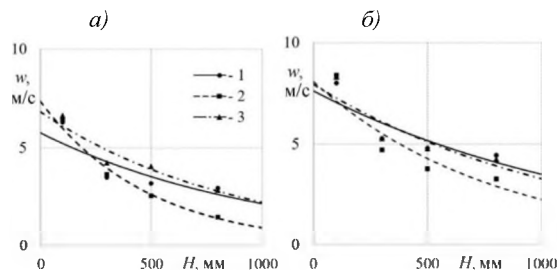


Рис. 9. Зависимости средней скорости потока воздуха w по высоте установки H при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении: а – $w1 \approx 6,5$ м/с; б – $w1 \approx 8,25$ м/с

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На рисунке 10 представлены зависимости изменения интенсивности турбулентности Tu от величины средней скорости потока воздуха w в контрольных сечениях на расстоянии 100 мм и 800 мм.

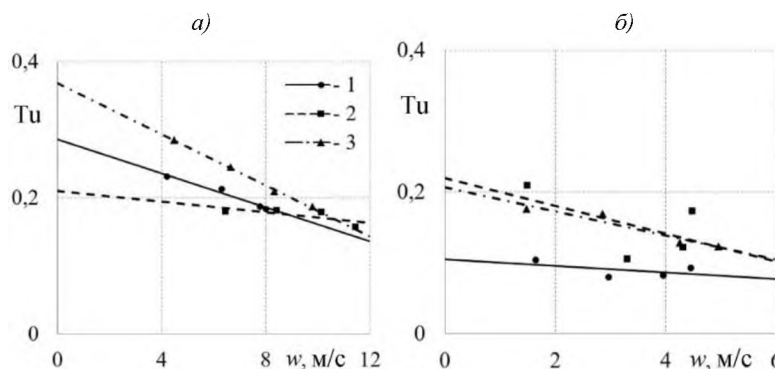


Рис. 10. Зависимости интенсивности турбулентности Tu от средней скорости потока воздуха w при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для разных контрольных сечений: а – контрольное сечение на высоте $H1 = 100$ мм; б – $H4 = 800$ мм

Fig. 10. Dependence of turbulence intensity Tu on mean air flow rate w for round (1), square (2) and triangular (3) tubes for different test sections: а – test section at height $H1 = 100$ mm; б – $H4 = 800$ mm

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

Установлено, что имеет место снижение Tu с ростом начальной скорости потока воздуха и это падение Tu хорошо описывается линейными уравнениями. При этом, интенсивность турбулентности имеет более высокие значения при подаче воздуха через профилированные трубки по сравнению с круглыми подающими трубками. Это также объясняется турбулизацией течения из-за вихревых структур, характерных для профилированных каналов.

Полученные экспериментальные данные и предложенные уравнения описание можно использовать для верификации математических моделей для моделирования аэродинамических процессов в вертикальном коническом диффузоре.

На рис. 11 показаны экспериментальные зависимости интенсивности турбулентности от высоты цилиндрической части диффузора для разных начальных скоростей потока при подаче воздуха через трубки с разными поперечными сечениями.

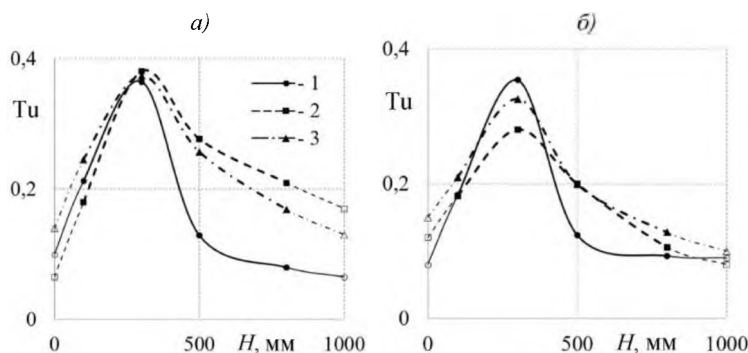


Рис. 11. Зависимости интенсивности турбулентности Tu по высоте диффузора H при подаче воздуха через круглые (1), квадратные (2) и треугольные (3) трубки для начальной средней скорости потока в первом сечении: а – $w_1 \approx 6,5$ м/с; б – $w_1 \approx 8,25$ м/с

Fig. 11. Turbulence intensity dependencies Tu for diffuser height H for round (1), square (2) and triangular (3) tubes for initial average flow rate in the first section: а – $w_1 6.5$ m/s; б – $w_1 8.25$ m/s

*Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author

На основе анализа функций $Tu = f(H)$ можно сделать следующие выводы:

– форма поперечного сечения трубок оказывает существенное влияние на величину интенсивности турбулентности по высоте цилиндрической части вертикального диффузора;

– зависимость $Tu = f(H)$ имеет ярко выраженный максимум в районе $H = 300$ мм, что характерно для всех начальных средних скоростей потока и всех конфигураций подающих трубок;

– интенсивность турбулентности имеет существенно более высокие значения (вплоть до 50 %) при подаче воздуха через профилированные трубки по сравнению с круглыми трубками, что особенно характерно для низких начальных w .

Таким образом, можно констатировать, что аэродинамические характеристики потоков в вертикальном коническом диффузоре могут быть аппроксимированы относительно простыми математическими выражениями, которые удобно использовать в инженерных расчетах.

Выводы

На основе проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Получены экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости стационарного потока по высоте и вдоль диаметра цилиндрической части диффузора для разных начальных условий и при подаче воздуха через трубки разных конфигураций. Данные получены для диапазона начальных скоростей от 1 м/с до 12 м/с.

2. Определены поля скоростей по высоте цилиндрической части диффузора для разных начальных условий при подаче воздуха через трубки с поперечными сечениями в форме круга, квадрата и треугольника. Показана эволюция полей скоростей вверх по потоку:

– имеет место падение средней скорости вверх по течению, что характерно для всех конфигураций подающих трубок;

– показано, что подача воздуха через профилированные трубки оказывает влияние на форму поля скоростей, что особенно характерно при подаче воздуха через треугольные трубки.

3. Рассчитана интенсивность турбулентности Tu потока по высоте и вдоль диаметра диффузора для разных начальных условий и при подаче воздуха через трубки с разными конфигурациями:

– установлено, что значения Tu изменяются от 0,05 до 0,39 для исследуемых режимов течения и геометрических размеров установки;

– выявлено, что более высокие значения Tu характерны для подачи воздуха через профилированные трубки (отличия могут достигать 50 %).

4. Установлены закономерности изменения интенсивности турбулентности по высоте диффузора для разных начальных условий и конфигураций подающих трубок:

– показано, что подача воздуха через трубки разных конфигураций оказывает существенное влияние на уровень интенсивности турбулентности (изменения на величину ± 30 %);

– показано, что Tu имеет максимальные значения на высоте 300-350 мм, что характерно для всех исследуемых конфигураций трубок.

5. Полученные данные об аэродинамических характеристиках потоков в коническом диффузоре могут быть полезными для уточнения и верификации математических моделей, а также для совершенствования инженерных расчетов.

Направление дальнейших исследований заключается в математическом представлении и получении безразмерных уравнений для описания аэродинамических характеристик потоков в вертикальном диффузоре разных конструкций, а также в уточнении численных моделей для моделирования аэродинамики.

Литература

1. Japikse D., Baines N.C. Diffuser Design Technology. Norwich, VT: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). Москва: Машиностроение, 1983. 351 с.
3. Emmons H.W. Fundamentals of gas dynamics. New Jersey: Princeton University Press, 2015. 783 p.
4. Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. UK: Charles Hirsch, 2007. 696 p.
5. Yavuz M., Sene N. Approximate solutions of the model describing fluid flow using generalized p-laplace transform method and heat balance integral method // Axioms. 2020. V. 9(4)-123. P. 1-18.
6. Xiao Y., Yue F., Wang X., Zhang X. Reliability-Based Design Optimization of Structures Considering Uncertainties of Earthquakes Based on Efficient Gaussian Process Regression Metamodeling // Axioms. 2022. V. 11(2). Article number 81.

7. Klein A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1981. Vol. 103 (2). P. 250-257.
8. Jeyachandran K., Ganesan V. Numerical modelling of turbulent flow through conical diffusers with uniform and wake velocity profiles at the inlet // *Mathematical and Computer Modelling*. 1988. V. 10(2). P. 87-97.
9. Okwuobi P.A.C., Azad R.S. Turbulence in a conical diffuser with fully developed flow at entry // *Journal of Fluid Mechanics*. 1973. V. 57(3). P. 603-622.
10. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. V. 915. Article number 915A1-1.
11. Lee J., Jang S.J., Sung H.J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser // *Journal of Turbulence*. 2012. V. 13. P. 1-29.
12. Wu X., Schlüter J., Moin P., Pitsch H., Iaccarino G., Ham F. Computational study on the internal layer in a diffuser // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. V. 550. P. 391-412.
13. De Souza F.J., Silva A.L., Utzig J. Four-way coupled simulations of the gas-particle flow in a diffuser // *Powder Technology*. 2014. V. 253. P. 496-508.
14. Zou A., Chassaing J.-C., Li W., Gu Y., Sauret E. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis // *Applied Thermal Engineering*. 2019. V. 161. Article number 114158.
15. Dong B., Xu G., Li T., Quan Y., Zhai L., Wen J. Numerical prediction of velocity coefficient for a radial-inflow turbine stator using R123 as working fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 130. P. 1256-1265.
16. Kim D.-Y., Kim Y.-T. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for organic Rankine cycles // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 120. P. 549-559.
17. From C.S., Sauret E., Armfield S.W., Saha S.C., Gu Y.T. Turbulent dense gas flow characteristics in swirling conical diffuser // *Computers and Fluids*. 2017. V. 149. P. 100-118.
18. Keep J.A., Head A.J., Jahn I.H. Design of an efficient space constrained diffuser for supercritical CO₂ turbines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 821(1). Article number 012026.
19. Wang W.-B., Zheng L.-X., Lu W., et al. Study on Structural Design Optimization of Ejector Expansion Chamber // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2021. V. 42(2). P. 309-313.
20. Sierra-Pallares J., García del Valle J., Paniagua J.M., García J., Méndez-Bueno C., Castro F. Shape optimization of a long-tapered R134a ejector mixing chamber // *Energy*. 2018. V. 165(A). P. 422-438.
21. Maicke B.A., Bondarev G. Quasi-one-dimensional modeling of pressure effects in supersonic nozzles // *Aerospace Science and Technology*. 2017. V. 70. P. 161-169.
22. Vinod L., Mahendra M.A., Mahantayya K.H. The cfd analysis of subsonic flow around struts of airfoil and cylindrical shape attached to a conical diffuser at exhaust of a gas turbine engine // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019. V. 9(4). P. 943-954.
23. Moszowski B., Wajman T., Sobczak K., Inger M., Wilk M. The analysis of distribution of the reaction mixture in ammonia oxidation reactor // *Polish Journal of Chemical Technology*. 2019. V. 21(1). P. 9-12.
24. Huang Y., Coggon M.M., Zhao R., Lignell H., Bauer M.U., Flagan R.C., Seinfeld J.H. The Caltech Photooxidation Flow Tube reactor: Design, fluid dynamics and characterization // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. V. 10(3). P. 839-867.
25. Keshavarz E., Toghraie D., Haratian M. Modeling industrial scale reaction furnace using computational fluid dynamics: A case study in Ilam gas treating plant // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 123. P. 277-289.
26. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines // *Sensors*. 2022. V. 22 (17). Article number 6395.
27. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // *Thermal Science*. 2022. V. 26(1A). P. 365-376.
28. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., и др. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 5. С.22-28.
29. Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Бродов Ю.М. Влияние поперечного профилирования впускных и выпускных трубопроводов поршневых двигателей на тепломеханические характеристики потоков // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2017. № 1-2. С. 119-126.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: plotnikovlv@mail.ru

Рыжков Александр Филиппович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: af.ryzhkov@mail.ru

Медведев Валерий Андреевич – бакалавр Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: warhammer_valera@mail.ru

Смирных Михаил Дмитриевич – бакалавр Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: mihail300401@gmail.com

Осипов Леонид Евгеньевич – аспирант кафедры «Турбины и двигатели Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: klumbaa@outlook.com.

References

1. Japikse D, Baines NC. *Diffuser Design Technology*. Norwich, VT: Concepts ETI, 1998. 524 p.
2. Idelchik, IE *Aerohydrodynamics of technological apparatuses (Inlet, outlet and distribution of the flow over the cross section of the devices)*. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 351 p.
3. Emmons HW. *Fundamentals of gas dynamics*. New Jersey: Princeton University Press, 2015. 783p.
4. Hirsch C. *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. UK: Charles Hirsch, 2007. 696 p.
5. Yavuz M, Sene N. Approximate solutions of the model describing fluid flow using generalized p-laplace transform method and heat balance integral method. *Axioms*. 2020; 9(4):123:1-18.
6. Xiao Y, Yue F, Wang X, Zhang X. Reliability-Based Design Optimization of Structures Considering Uncertainties of Earthquakes Based on Efficient Gaussian Process Regression Metamodeling. *Axioms*. 2022; 11(2):81.
7. Klein A. Effects of inlet conditions on conical-diffuser performance. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1981;103 (2):250-257.
8. Jeyachandran K., Ganesan V. Numerical modelling of turbulent flow through conical diffusers with uniform and wake velocity profiles at the inlet. *Mathematical and Computer Modelling*. 1988; 10(2):87-97.
9. Okwuobi P.A.C., Azad R.S. Turbulence in a conical diffuser with fully developed flow at entry. *Journal of Fluid Mechanics*. 1973; 57(3):603-622.
10. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;915:915A1-1.
11. Lee J., Jang S.J., Sung H.J. Direct numerical simulations of turbulent flow in a conical diffuser. *Journal of Turbulence*. 2012;13:1-29.
12. Wu X, Schlüter J, Moin P, et al. Computational study on the internal layer in a diffuser. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006; 550:391-412.
13. De Souza F.J., Silva A.L., Utzig J. Four-way coupled simulations of the gas-particle flow in a diffuser. *Powder Technology*. 2014; 253:496-508.
14. Zou A, Chassaing J.-C, Li W, et al. Quantified dense gas conical diffuser performance under uncertainties by flow characteristic analysis. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 161:114158.
15. Dong B, Xu G, Li T, et al. Numerical prediction of velocity coefficient for a radial-inflow turbine stator using R123 as working fluid. *Applied Thermal Engineering*. 2018; 130:1256-1265.
16. Kim D-Y, Kim Y-T. Preliminary design and performance analysis of a radial inflow turbine for organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 120:549-559.
17. From CS, Sauret E, Armfield SW, et al. Turbulent dense gas flow characteristics in swirling conical diffuser. *Computers and Fluids*. 2017; 149:100-118.
18. Keep JA, Head AJ, Jahn IH. Design of an efficient space constrained diffuser for supercritical CO2 turbines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 821(1):012026.

19. Wang W.-B, Zheng L.-X, Lu W, et al. Study on Structural Design Optimization of Ejector Expansion Chamber. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2021; 42(2):309-313.
20. Sierra-Pallares J, García del Valle J, Paniagua JM, et al. Shape optimization of a long-tapered R134a ejector mixing chamber. *Energy*. 2018; 165(A):422-438.
21. Maicke BA, Bondarev G. Quasi-one-dimensional modeling of pressure effects in supersonic nozzles. *Aerospace Science and Technology*. 2017; 70:161-169.
22. Vinod L, Mahendra MA, Mahantayya KH. The cfd analysis of subsonic flow around struts of airfoil and cylindrical shape attached to a conical diffuser at exhaust of a gas turbine engine. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019; 9(4):943-954.
23. Moszowski B, Wajman T, Sobczak K, et al. The analysis of distribution of the reaction mixture in ammonia oxidation reactor. *Polish Journal of Chemical Technology*. 2019; 21(1):9-12.
24. Huang Y, Coggon MM, Zhao R, et al. The Caltech Photooxidation Flow Tube reactor: Design, fluid dynamics and characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017; 10(3):839-867.
25. Keshavarz E, Toghraie D, Haratian M. Modeling industrial scale reaction furnace using computational fluid dynamics: A case study in Ilam gas treating plant. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 123:277-289.
26. Plotnikov L, Plotnikov I, Osipov L, et al. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines. *Sensors*. 2022; 22 (17):6395.
27. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*. 2022; 26(1A):365-376.
28. Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, et al. Physical and numerical simulation of the thermal and mechanical characteristics of stationary flows in the gas-air paths of piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):22-28.
29. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM. Influence of transverse profiling of intake and exhaust pipelines of piston engines on the thermal and mechanical characteristics of flows. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 1(2):119-126.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Alexander F. Ryzhkov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Valery A. Medvedev – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Mikhail D. Smirnykh – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Шифр научной специальности:

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Получено **21.02.2023г.**

Отредактировано **06.03.2023г.**

Принято **20.03.2023г.**