



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КОНИЧЕСКОМ ДИФфуЗОРЕ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ ВОЗДУХА

Плотников Л.В., Рыжков А.Ф., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Шурупов В.А.

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 исследования определяется тем, что вертикальные конические диффузоры используются в качестве вспомогательных аппаратов во многих технических приложениях в различных отраслях (химическая промышленность, энергетическое машиностроение, технологические устройства и т.д.). ЦЕЛЬ. Оценить влияние способа (конструкции) подвода воздуха, формы поперечного сечения подводящих каналов и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре для разных расходных характеристик. МЕТОДЫ. Структура (распределение) потока внутри вертикального диффузора при подаче воздуха с помощью разных конструкций подводящих каналов изучалось на экспериментальном стенде. На основе метода тепловизирующей съемки изучалась структура потока в вертикальном диффузоре. В данном исследовании изучалось два способа подвода воздуха в вертикальный диффузор: подвод воздуха через один прямолинейный канал снизу и сопловая подача воздуха через четыре трубки. Каналы и сопла имели поперечные сечения в форме круга, квадрата и треугольника. Соответственно, было изучено влияние шести конструкций подвода воздуха в вертикальный диффузор и их влияние на газодинамическую структуру течения. РЕЗУЛЬТАТЫ. Опыты проводились при стационарном режиме течения воздуха в диффузоре для расходов воздуха от 0,015 до 0,06 м³/с. Число Рейнольдса для потока воздуха на выходе из подводящего канала находилось в диапазоне от 42500 до 150000. Получены термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при разных способах подачи воздуха для разных расходных характеристик. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при традиционном подводе воздуха снизу через один канал заключаются в формировании ярко выраженного центрального течения воздуха вдоль вертикальной оси диффузора при использовании всех конфигураций канала. При этом форма поперечного сечения подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через четыре трубки заключаются в отсутствии застойных зон и центральном течении воздуха вдоль оси. При этом использование квадратной и треугольной сопловых трубок приводит к более равномерному распределению потока воздуха по всему объему вертикального диффузора.

Ключевые слова: вертикальный диффузор, газодинамическая структура потока, способ подачи воздуха, профилированные каналы, эксперимент, тепловизионная диагностика.

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., Красильников Д.Н., Давыдов Д.А., Шурупов В.А. Экспериментальная оценка структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при разных способах подачи воздуха // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 156-172. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-156-172.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE FLOW STRUCTURE IN A VERTICAL CONICAL DIFFUSER WITH DIFFERENT AIR SUPPLY METHODS

Plotnikov L.V., Ryzhkov A.F., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Shurupov V.A.

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* of the study is determined by the fact that vertical conical diffusers are used as auxiliary devices in many technical applications in various industries (chemical industry, power engineering, technological devices, etc.). *THE PURPOSE.* The influence of the method (design) of air supply, the cross-sectional shape of the supply channels and nozzle tubes on the gas-dynamic structure of the flow in a vertical diffuser for different flow characteristics was assessed. *METHODS.* The structure (distribution) of the flow inside a vertical diffuser for supplying air using different designs of supply channels was studied on an experimental bench. Based on the thermal imaging method, the flow structure in a vertical diffuser was studied. In this study, two methods of supplying air to a vertical diffuser were studied: supplying air through one straight channel from the bottom and nozzle supplying air through four tubes. The channels and nozzles had cross sections in the shape of a circle, square and triangle. Accordingly, the influence of six air supply designs into a vertical diffuser and their influence on the gas-dynamic flow structure were studied. *RESULTS.* The experiments were carried out under stationary air flow conditions in the diffuser for air flow rates from 0.015 to 0.06 m³/s. The Reynolds number for the air flow at the outlet of the supply channel was in the range from 42500 to 150000. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser were obtained for different methods of air supply for different flow characteristics. *CONCLUSION.* Features of the flow structure in a vertical diffuser with traditional air supply from below through one channel consist in the formation of a pronounced central air flow along the vertical axis of the diffuser when using all channel configurations. In this case, the cross-sectional shape of the supply channel has a significant impact on the flow structure in the conical diffuser. Features of the flow structure in a vertical diffuser with nozzle air supply through four tubes are the absence of stagnant zones and a central air flow along the axis. At the same time, the use of square and triangular nozzle tubes leads to a more uniform distribution of air flow throughout the entire volume of the vertical diffuser.

Keywords: vertical diffuser, gas-dynamic flow structure, air supply method, profiled channels, experiment, thermal imaging diagnostics.

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: Plotnikov L.V., Ryzhkov A.F., Krasilnikov D.N., Davydov D.A., Shurupov V.A. Experimental evaluation of the flow structure in a vertical conical diffuser with different air supply methods. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (3): 156-172. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-156-172.

Введение (Introduction)

Известно, что конические диффузоры (КД) той или иной конструкции широко применяются в различных технических, технологических, химических, научных и других процессах [1]. Газодинамическое совершенство течения воздуха или жидкости в КД во многом определяет эффективность процессов в машине, аппарате или каком-либо устройстве [1]. Поэтому изучение газодинамики потоков в коническом диффузоре и разработка методов управления структурой потоков в КД являются актуальными задачами для развития науки, техники и технологий.

Ниже представлены современные результаты других авторов об исследованиях физических процессов в диффузорах и данные о прикладных аспектах применения КД в различных отраслях промышленности.

Существует большое количество работ по созданию моделей и алгоритмов для прогнозирования газодинамических характеристик в конических диффузорах при различных начальных условиях [2-5]. Так, Ferrari A. получил оригинальные аналитические уравнения для одномерного стационарного течения в коническом диффузоре [2]. Предложенные решения дополняют и расширяют теоретические знания о газовой динамике в КД. Novković D.M. с коллегами в специализированном программном обеспечении разработали математическую модель для прогнозирования параметров потоков газа в коническом диффузоре с углом раскрытия 8° [3]. Предложенная модель отличается высокой точностью и способна проводить оценку параметров для двухмерного и трехмерного течений. Teshnizi E.S. and Momeni F. провели узконаправленное исследование по созданию методики расчета турбулентного пограничного слоя в коническом диффузоре [4]. Подобные методики позволяют с высокой точностью определять специфические характеристики КД для конкретных приложений. Végas P. с соавторами создали автоматизированный алгоритм для прогнозирования газодинамики закрученного потока в коническом диффузоре на основе технологии машинного обучения [5]. Важно, что разработанный алгоритм способен определять параметры потока в КД для стационарных и нестационарных граничных условиях на входе.

Существуют исследования по разработке способов управления газодинамикой потоков в конических диффузорах [6, 7]. Так, Tanasa C. и другие предложили способ сглаживания газодинамической нестационарности, связанной с закрученностью потока, в коническом диффузоре посредством дросселирования течения на выходе из КД [6]. Преимущество данного способа заключается в том, что гидравлическое сопротивление возрастает незначительно по сравнению с другими подобными методами. Yang J. с коллегами разработали способ управления потоком в КД посредством кольцевого генератора вихрей [7]. Применение этого метода позволило подавить массивный отрыв потока в расширительной секции диффузора и в зоне ниже по потоку, а также повысить эффективность восстановления давления в КД. Также существуют исследования по разработке различных конструктивных элементов в диффузоре для обеспечения более равномерного течения вдоль всей длины КД [8, 9]. Например, Shukri E.S. устанавливал винтовую ленточную или спирально-винтовую вставки на внутренней поверхности конического диффузора для выравнивания поля скоростей [8, 9]. Численное исследование показало значительный эффект в улучшении равномерности распределения скорости по всему объему диффузора по сравнению с КД без таких вставок.

Однако, известно, что любые способы газодинамического совершенствования процессов в конических диффузорах вызывают тот или иной рост гидравлических потерь [1]. Поэтому ученые и специалисты продолжают разрабатывать новые способы оценки изменений основных параметров потока в КД [10, 11]. Так, Mfon S.A. с коллегами предложил оригинальную методику оценки коэффициента падения давления в коническом диффузоре [10]. Gosteev Yu.A. и другие создали новую методику расчета коэффициента потерь в КД различных конструкций [11].

Существуют разносторонние исследования газодинамических особенностей сложных течений (закрученные потоки, спиральные вихри, вихревые жгуты и т.д.) в конических диффузорах и их возможное применение в различных отраслях науки и техники [12-15]. Так, Tsoy M. с коллегами подробно исследовали формирование и разрушение спиральных вихрей в конических диффузорах с разными углами раскрытия конуса [12]. Подобные исследования проводили Zhou X. с коллегами по отношению к вихревым жгутам и их влиянием на характеристики потока в КД [13]. Следует отметить, что большое количество исследователей уделяет внимание изучению закрученных потоков в конических диффузорах разных конфигураций [14-15]. Это объясняется тем, что закрученные потоки способствуют интенсификации теплообмена, улучшению перемешивания различных сред и распределению потока по всему объему диффузора. Поэтому закрученные потоки в КД повышают эффективность различных устройств, машин и аппаратов, использующих конические диффузоры в своих технологических процессах. Так, Liu Z. с соавторами исследовали частную задачу о влиянии угла раскрытия КД на ядро вихря закрученного потока с помощью измерительной PIV-системы [14]. Pić D.B. с коллегами изучали распределение средних газодинамических характеристик закрученного потока вдоль диффузора с разными углами раскрытия [15]. Исследования подтвердили, что введение умеренной закрутки потока на входе снижает вероятность отрыва в широкоугольных конических диффузорах.

Конические диффузоры применяются в различных технических и технологических устройствах. Примеры некоторых возможных сфер применения КД представлены далее. Вертикальные конические диффузоры являются неотъемлемой частью устройств для получения синтез-газа из различных углеродистых материалов [16, 17]. Конические участки часто встречаются в элементах камер сгорания газовых турбин или горелок [18]. КД служат для повышения скорости ветра и КПД (посредством рекуперации энергии) ветряных турбин [19]. Конические диффузоры также используются на выходе турбины, работающей по принципу органического цикла Ренкина [20]. Конические диффузоры активно применяются в гидротурбинах для повышения производительности и эффективности [21]. Также существуют другие приложения для использования диффузоров, а именно, тяговый диффузор для турбин [22], водяной насос [23], гидрокинетическая турбина [24] и другие.

Таким образом, проведенный обзор литературы показал, что:

- изучение газодинамических характеристик в коническом диффузоре для разных граничных условий остается актуальной задачей в развитии науки;
- разработка способов прогнозирования и управления структурой потока в КД также является важной задачей для совершенствования технических устройств;
- конические диффузоры широко распространены практически во всех отраслях науки и техники.

Цели данного исследования можно сформулировать следующим образом:

- создать экспериментальный стенд и наладить методику проведения опытов для исследования структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при разных способах подачи воздуха;
- оценить влияние традиционного подвода воздуха через один канал и сопловой подачи через четыре трубки в вертикальный диффузор на структуру потока при разных расходных характеристиках;

- выявить влияние формы поперечного сечения подводящего канала и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре.

Научная значимость исследования состоит в том, что впервые получены термограммы структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при различных конструкторских способах подачи воздуха и для различных расходных характеристик, а также уточнении физических особенностей газодинамики стационарных потоков в диффузоре.

Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций для управления газодинамическими характеристиками потока в вертикальном коническом диффузоре, а также расширении базы знаний о подходах к проектированию диффузоров с оптимальной структурой потока.

Материалы и методы (Materials and methods)

Распределение потока внутри вертикального диффузора при подаче воздуха с помощью разных конструкций подводящих каналов изучалось на экспериментальном стенде, показанном на рисунке 1. Экспериментальный стенд состоял из нагнетающего компрессора (с возможностью изменения расхода воздуха q через систему в диапазоне от 0,015 до 0,06 м³/с), канального нагревателя воздуха (с возможностью управлением температурой нагрева воздуха до 50-60 °С), подводящих систем разных конфигураций (конструкции представлены ниже), а также прозрачного вертикального диффузора (геометрические размеры также даны ниже) с сеткой внутри (размер ячейки сетки составлял 1х1 мм). Эта сетка служила для фиксации структуры потока с помощью метода тепловизуализирующей съемки. Между компрессором и канальным нагревателем был установлен резервуар с хонейкомбом для стабилизации течения (на рис. 1 не показан).

Опыты проводились при стационарном режиме течения воздуха в рассматриваемой системе для разных расходов воздуха через систему. Число Рейнольдса Re для потока воздуха на выходе из подводящего канала находилось в диапазоне от 42500 до 150000.

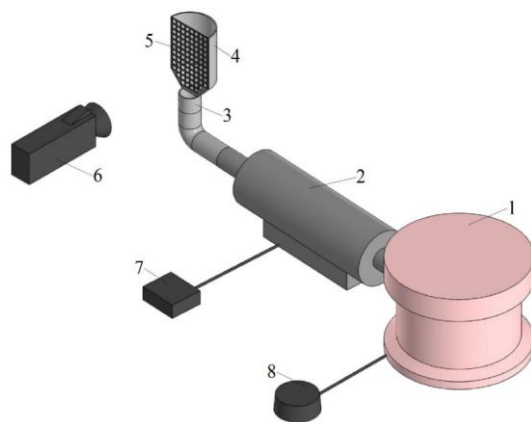


Рис. 1. Трехмерная модель экспериментального стенда для исследования структуры потока в вертикальном диффузоре: 1 – компрессор; 2 – канальный нагреватель; 3 – подводящий канал; 4 – вертикальный диффузор; 5 – сетка; 6 – тепловизор; 7 – блок управления уровнем нагрева; 8 – блок управления расходом воздуха

Fig. 1. Three-dimensional model of the experimental stand for studying the flow structure in a vertical diffuser: 1 - compressor; 2 - channel heater; 3 - supply channel; 4 - vertical diffuser; 5 - grid; 6 - thermal imager; 7 - heating level control unit; 8 - air flow control unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Метод тепловизуализирующей съемки, который использовался в данном исследовании, более подробно описан в статье [25]. При проведении экспериментов измерительной базой служило следующие оборудование:

- тепловизор (модель Testo 890-2, Германия), с помощью которого были получены термограммы распределения потока внутри вертикального диффузора (погрешность измерения $\pm 0,2$ °C);
- термоанемометр постоянной температуры (модель Ирвис ТА-5.1, Россия), посредством которого определялся расход воздуха через систему (относительная стандартная неопределенность измерения q составляла 5,1 %);
- термопары для текущего контроля температуры на разных участках системы (относительная стандартная неопределенность измерения составляла 1,5 %).

В данном исследовании изучалось два конструкторских способа подвода воздуха в вертикальный диффузор (рис. 2):

- 1) традиционный способ подвода воздуха через прямолинейный канал снизу (рис 2а);
- 2) сопловая подача воздуха через четыре трубки, расположенные под углом 45° (рис. 2б).

Основные геометрические размеры исследуемого диффузора представлены на рисунке 2. Также на рисунке показаны принципиальные схемы обоих конструкторских способов подвода воздуха.

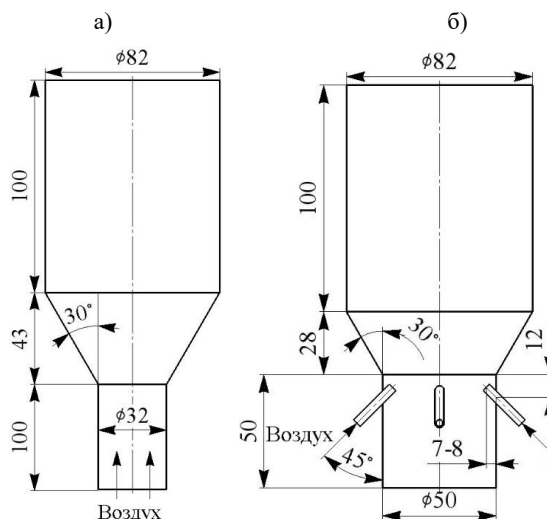


Рис. 2. Геометрические размеры исследуемого вертикального диффузора и способы подачи воздуха: а – традиционный подвод воздуха снизу через канал; б – сопловая подача воздуха под углом

Fig. 2. Geometric dimensions of the studied vertical diffuser and methods of air supply: a - traditional air supply from below through the channel; b - nozzle air supply at an angle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В данном исследовании дополнительно изучалось влияние формы поперечного сечения канала и сопловых трубок на газодинамическую структуру потока в вертикальном диффузоре. Известно, что в квадратных и треугольных каналах возникают устойчивые, продольные, вихревые структуры, оказывающие существенное влияние на газодинамические характеристики потока воздуха [26].

Соответственно для традиционного способа подвода воздуха использовались три формы поперечного сечения: круг, квадрат и равносторонний треугольник, геометрические размеры которых показаны на рисунке 3.

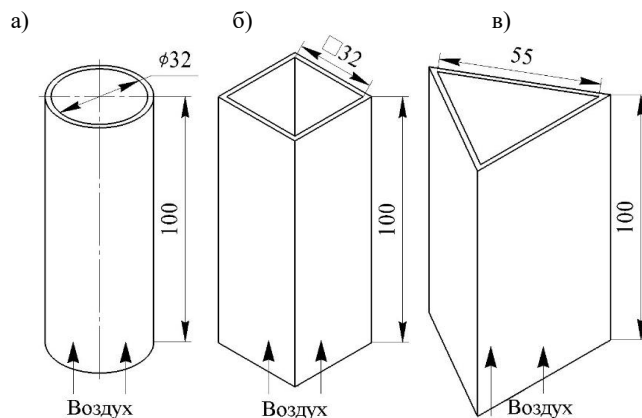


Рис. 3. Эскизы конструкций подводящих каналов с разными формами поперечных сечений: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 3. Sketches of supply duct designs with different shapes of cross-sections: a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Геометрические размеры подводящих каналов определялись исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра для всех конфигураций (диаметр круга – 32 мм, сторона квадрата – 32 мм, сторона треугольника – 55 мм). Длина подводящего канала во всех случаях составляла около 100 мм. Все подводящие каналы имели технически гладкую поверхность (средняя шероховатость равнялась 6,3 мкм).

Общий вид другого способа подвода воздуха в вертикальный диффузор с помощью сопловых трубок показан на рисунке 4а. На рисунке 4б даны геометрические размеры сопловых трубок с поперечными сечениями разной формы.

Геометрические размеры поперечных сечений сопловых трубок также определялись исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра для всех конфигураций (диаметр круга – 5 мм, сторона квадрата – 5 мм, сторона треугольника – 8,6 мм). Общая длина сопловых трубок во всех случаях составляла около 100 мм. Длина участков трубок с квадратной и треугольной формами поперечного сечения составляли 60 мм. Все сопловые трубки имели технически гладкую поверхность (средняя шероховатость равнялась 6,3 мкм). Сопловые трубки (4 штуки) устанавливались симметрично в цилиндрическое основание под углом 45° относительно вертикальной оси.

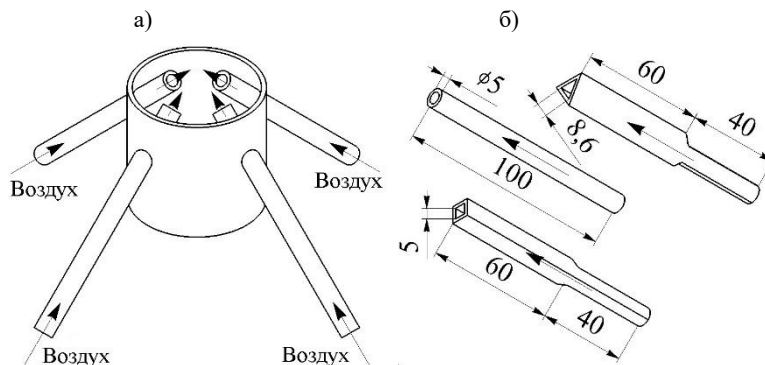


Рис. 4. Общий вид конструкции для сопловой подачи воздуха в вертикальный диффузор (а) и геометрические размеры подающих трубок с разными формами поперечного сечения (б)

Fig. 4. General view of the design for nozzle air supply to a vertical diffuser (a) and geometric dimensions of supply tubes with different cross-sectional shapes (b)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таким образом, в данном исследовании изучалось влияние шести конструкций подвода воздуха в вертикальный диффузор и их влияние на газодинамическую структуру с помощью метода тепловизуализирующей съемки.

Результаты (Results) Обсуждение (Discussions)

Установлено, что поперечное профилирование подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре. На рис. 5 показана структура потока в вертикальном диффузоре при расходе воздуха $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ для каналов с разными конфигурациями. Использование канала с круглой формой поперечного сечения приводит к формированию ярко выраженного центрального течения (насыщенный цвет на термограмме) в вертикальном диффузоре (рис. 5а). При этом в углах диффузора течение воздуха фактически отсутствует (белые области на термограмме), то есть образуются застойные зоны. Следует отметить, что в верхней части диффузора движение воздуха осуществляется по всему объему. Применение канала с квадратной формой поперечного сечения вызывает существенное изменение структуры потока по сравнению с традиционным круглым каналом (рис. 5б). При использовании квадратного канала отсутствуют застойные зоны в углах диффузора. Однако, также можно заметить наличие ярко выраженного центрального течения вдоль оси диффузора (темно-оранжевая область на термограмме). Использование треугольного канала для подачи воздуха в диффузор также приводит формированию застойных зон в углах (рис. 5в). При этом, течение по высоте диффузора является более равномерным (фактически равномерный цвет термограммы) по сравнению с круглым и квадратным каналами.

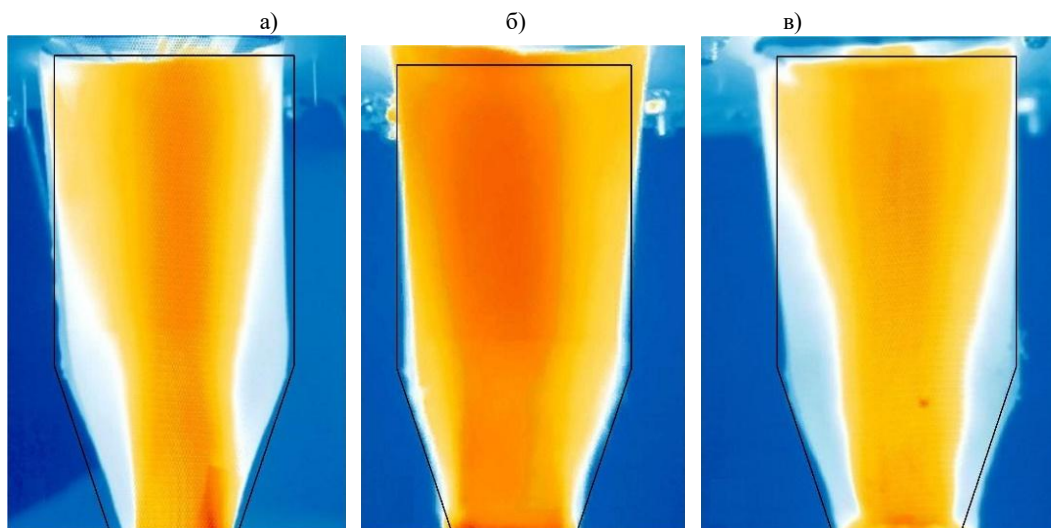


Рис. 5. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 5. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Такие существенные изменения в структуре потока в вертикальном диффузоре при использовании профилированных подводящих каналов можно объяснить влиянием продольных вихревых структур в углах квадратного и треугольного профилей. В данном случае эти структуры способствуют более равномерному распределению потока по всему объему диффузора и препятствуют образованию застойных зон. Следует отметить, что

применение квадратных и треугольных трубопроводов имеет существенное влияние в других областях науки и техники, а именно, в системах газообмена поршневых двигателей [27, 28].

На рисунке 6 показана структура потока в вертикальном диффузоре для каналов с разными конфигурациями при расходе воздуха через систему $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$.

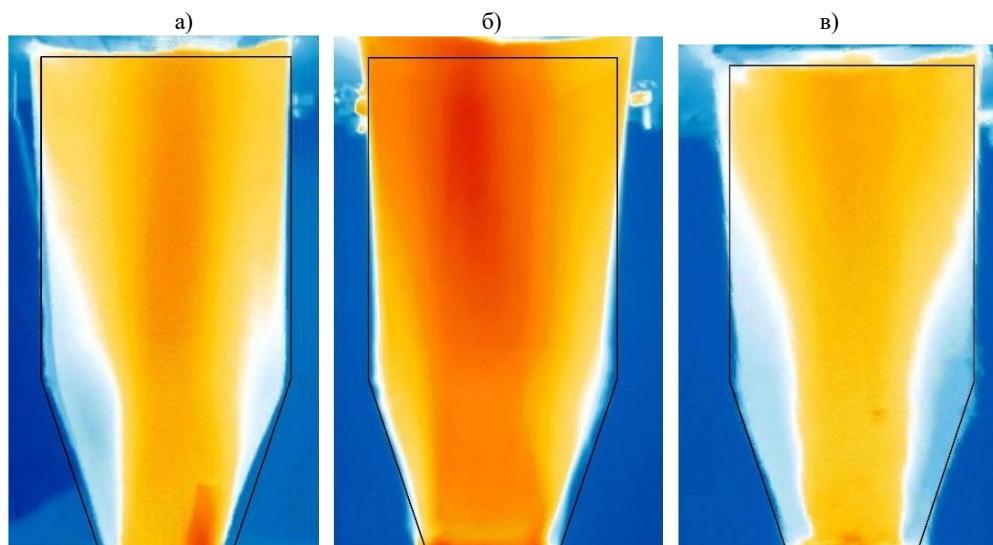


Рис. 6. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 6. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.047 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение расхода (а соответственно и скорости потока) через систему вызывает значительное уменьшение застойных зон в углах вертикального диффузора в случае подачи воздуха через традиционный круглый канал (рис. 6а). При этом сохраняется ярко выраженное центральное течение вдоль оси диффузора. Рост расхода через систему фактически не оказывает влияния на структуру потока в диффузоре при подаче воздуха через квадратный канал: в диффузоре отсутствуют застойные зоны и наблюдается центральное течение (рис. 6б). Увеличение расходных характеристик через систему также практически не оказало влияния на газодинамическую структуру потока в вертикальном коническом диффузоре при подаче воздуха через треугольный канал: наблюдаются значимые застойные зоны в углах диффузора и имеет место равномерное центральное течение с полным заполнением объема в верхней части (рис. 6в).

Полученные данные свидетельствуют об устойчивом влиянии продольных вихревых структур в профилированных каналах, которые сохраняют свое воздействие на распределение воздуха в вертикальном диффузоре при разных расходах (скоростях) воздуха.

На рисунке 7 показана структура потока в вертикальном диффузоре для каналов с разными конфигурациями при расходе воздуха через систему $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$.

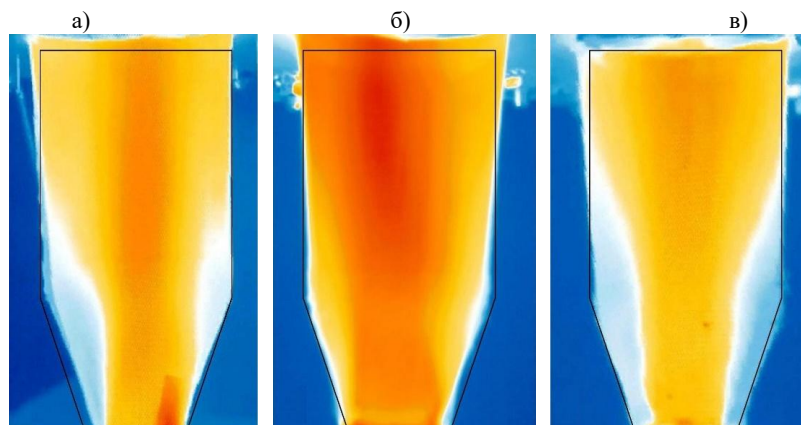


Рис. 7. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при подаче воздуха через каналы с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 7. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at air supply through channels with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.057 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Дополнительное увеличение расхода (скорости) воздуха через систему привело к уменьшению застойных зон в углах диффузора (рис. 7а). Соответственно, можно заключить, что застойные зоны уменьшаются с ростом расхода (скорости) через рассматриваемую систему (канал-диффузор). При этом, что дополнительный рост расхода через квадратный канал не вызвал каких-либо изменений в распределении воздуха внутри вертикального диффузора (рис. 7б). В свою очередь, что дополнительное увеличение расходных характеристик через систему также не вызвало изменений в структуре потока в диффузоре при подаче воздуха через треугольный канал (рис. 7в).

Следует отметить, что при исследовании структуры потока с подводом воздуха через треугольный канал сетка была натянута не через центр треугольника, а с существенным смещением к одному из углов. Это связано с ограничениями в геометрических размерах диффузора и подводящего канала. Соответственно, существуют планы по уточнению данных о структуре потока в центральной плоскости для данной конструкции с помощью других оптических методов (в частности, посредством измерительной PIV-системы).

Далее представлены данные об изучении структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха. Так, на рисунке 8 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки с разными поперечными сечениями при расходе через систему $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$.

Из рисунка 8а видно, что при сопловой подаче воздуха через круглые трубки наблюдается интенсивное движение воздуха в основании диффузора. При этом, в углах диффузора отсутствуют застойные зоны. Дальнейшее распределение потока воздуха по высоте диффузора является почти равномерным с некоторым отклонением к правой стороне. Из рисунка 8 б видно, что при сопловой подаче воздуха через квадратные трубки также имеет место интенсивное движение потока в основании диффузора с дальнейшим равномерным распределением воздуха по всему объему диффузора. Соответственно, можно заключить, что применение квадратной сопловой трубки не оказало существенного влияния на структуру потока в вертикальном коническом диффузоре. Из рисунка 8 в видно, что применение треугольных сопловых трубок вызывает наиболее равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора по сравнению с другими конфигурациями сопловых

трубок. При этом наблюдается интенсивное движение воздуха по вертикальной оси почти по всей высоте диффузора (форма этого движения напоминает «морковку»).

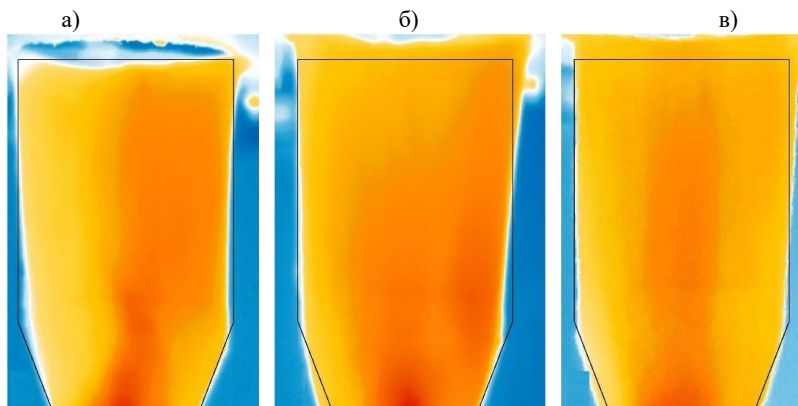


Рис. 8. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 8. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at nozzle air supply through tubes with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует отметить, что ярко выраженное центральное течение в диффузоре не формируется в случае использования сопловой подачи воздуха. Наблюдается развал струи либо в самом начале диффузора (квадратные трубки), либо в средней части (круглые трубки), либо в верхней части (треугольные трубки).

На рисунке 9 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки разных конфигураций при расходе $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$.

Из рисунка 9 а видно, что увеличение расхода через систему при сопловой подаче воздуха через круглые трубки не приводит к изменению структуры потока в вертикальном диффузоре. Также имеет место интенсивное движение воздуха в основании диффузора, которое постепенно распределяется на весь объем цилиндрической части с некоторым смещением к правой стороне. Из рисунка 9 б видно, что рост расходных характеристик через систему при сопловой подаче воздуха через квадратные трубки также не вызывает изменений в структуре потока по сравнению с $q = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$. В данном случае имеет место небольшая область интенсивного движения воздуха в нижней части диффузора и фактически равномерное распределение воздуха в остальном объеме диффузора. Из рисунка 9 в видно, что увеличение расхода воздуха через треугольные сопловые трубки привело фактически к центральному течению потока воздуха в вертикальном диффузоре. В данном случае структура потока является самой равномерной по сравнению с сопловыми трубками круглого и квадратного поперечных сечений.

На основе представленных данных можно констатировать, что при сопловой подаче воздуха в диффузор влияние поперечного профилирования трубок на структуру потока не столь существенно. Однако, ранее было установлено, что применение квадратных и треугольных трубок повышают интенсивность турбулентности вплоть до 30 % по сравнению с подачей воздуха через круглые трубки [29]. Это может оказать положительное влияние на теплообменные процессы в реальных технологических установках, поскольку известно, что существует закономерность: чем выше интенсивность турбулентности, тем выше уровень теплоотдачи [30].

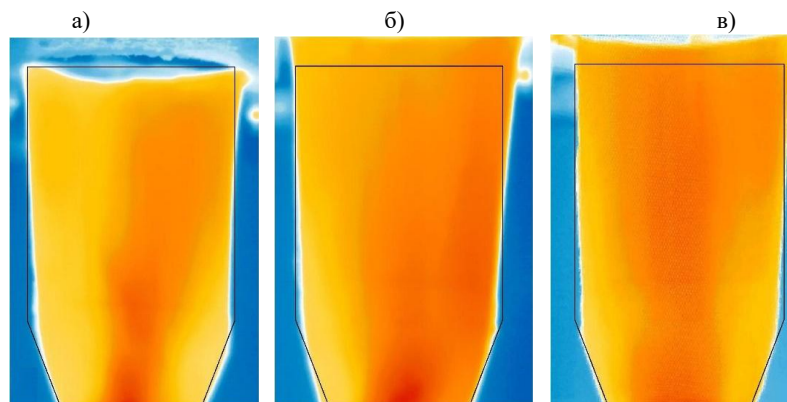


Рис. 9. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 9. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at nozzle air supply through tubes with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.047 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 10 показана структура потока в вертикальном диффузоре для сопловой подачи воздуха через трубки разных конфигураций при расходе $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$. Из рисунка 10 видно, что дополнительное увеличение расхода воздуха через систему подтверждает общие закономерности формирования структуры потока в вертикальном коническом диффузоре при подаче воздуха через сопловые трубки круглого, квадратного и треугольного поперечных сечений.

Таким образом, показаны эволюция изменения структуры потока в диффузоре при сопловой подаче воздуха, а также влияние формы поперечного сечения на распределение потока воздуха в диффузоре. Можно заключить, что посредством выбора начальных условий и геометрических размеров сопловых трубок можно управлять структурой потока в вертикальном диффузоре. В практическом плане это позволит настраивать химический или технологический процессы в соответствии с потребностями производства.

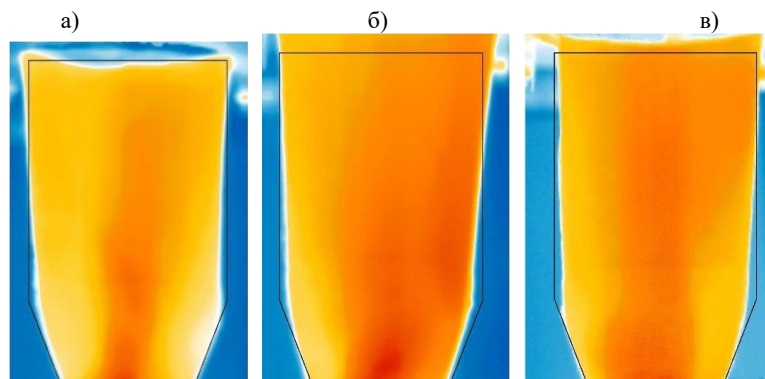


Рис. 10. Термограммы структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через трубки с разными формами поперечного сечения (расход через систему $q = 0,057 \text{ м}^3/\text{с}$): а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 10. Thermograms of the flow structure in a vertical diffuser at nozzle air supply through tubes with different cross-sectional shapes (flow rate through the system $q = 0.057 \text{ m}^3/\text{s}$): a - circle; b - square; c - triangle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Заключение (Conclusions)

На основе проведенных экспериментальных исследований структуры потока в вертикальном коническом диффузоре можно сформулировать следующие выводы:

1. создана экспериментальная установка для изучения различных конструкторских способов подвода воздуха в вертикальный диффузор при разных начальных условиях (расходных характеристиках);

2. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при традиционном подводе воздуха снизу через один канал:

- в диффузоре образуется ярко выраженное центральное течение воздуха вдоль вертикальной оси диффузора при использовании всех конфигураций канала;

- форма поперечного сечения подводящего канала оказывает существенное влияние на структуру потока в коническом диффузоре (круглый канал – застойные зоны в углах; квадратный канал – отсутствие застойных зон; треугольный канал – застойные зоны с более равномерным потоком);

- основные закономерности изменения структуры потока сохраняются при увеличении расхода воздуха через систему от 0,02 до 0,067 м³/с.

3. Особенности структуры потока в вертикальном диффузоре при сопловой подаче воздуха через четыре трубки, расположенные под углом 45 градусов:

- в диффузоре отсутствуют застойные зоны и центральное течение;

- использование квадратной и треугольной сопловых трубок приводит к более равномерному распределению потока воздуха по всему объему вертикального конического диффузора;

- увеличение расходных характеристик через систему способствует более равномерному распределению потока воздуха по всему объему диффузора (при этом основные закономерности в структуре течения сохраняются).

4. В прикладном аспекте можно сформулировать следующие рекомендации:

- использование традиционного подвода воздуха через один канал может приводить к формированию застойных зон в углах диффузора, что характерно для круглого и треугольного поперечных сечений; применение квадратного подводящего канала вызывает более равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора;

- сопловая подача обеспечивает равномерное распределение воздуха по всему объему вертикального диффузора с формированием интенсивного движения в центре, что наиболее характерно для круглых и треугольных сопловых трубок; применение квадратных сопловых трубок вызывает интенсивное движение потока в нижней части диффузора, которое быстро разрушается вверх по течению, равномерно заполняя весь объем цилиндрической части диффузора;

- традиционная подача воздуха через один канал приводит к центральному течению вдоль оси вертикального диффузора с наличием или отсутствием застойных зон в углах диффузора; сопловая подача воздуха вызывает равномерное распределение воздуха по всему объему диффузора с формированием области интенсивного движения вдоль вертикальной оси.

5. Направления дальнейших исследований связаны с получением детальных данных о газодинамике потока в вертикальном диффузоре с помощью термоанемометра и/или PIV-системы, а также с исследованием структуры потока в двухступенчатом коническом диффузоре. Дополнительное направление исследований может заключаться в изучении влияния наклона сопловых трубок на газодинамику и структуру потока в вертикальном коническом диффузоре.

Литература

1. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review // Experimental Thermal and Fluid Science. 1996. Vol. 13(4). P. 318-337.

2. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 915, Article number 915A1-1.
3. Novković D.M., Burazer J.M., Čović A.S. Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. P. 863-874.
4. Teshnizi E.S., Momeni F. Analytical Solutions and Analyses of the Displacement Separating Point in Diffusers // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022. Vol. 8(3). P. 891-903.
5. Vêras P., Balarac G., Métais O., Georges D., Bombenger A., Ségoufin C. Reconstruction of numerical inlet boundary conditions using machine learning: Application to the swirling flow inside a conical diffuser // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33(8). Article number 085132.
6. Tanasa C., Bosioc A., Muntean S., Susan-Resiga R. A novel passive method to control the Swirling Flow with Vortex Rope from the conical diffuser of hydraulic turbines with fixed blades // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019. Vol. 9(22). Article number 4910.
7. Yang J., Zhang Y., Chen H., Fu S. Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator // *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 106. Article number 106076.
8. Shukri E.S. Analytical velocity study in a conical diffuser with screw tape inserts // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 153. Article number 06003.
9. Shukri E.S., Hussein A.A., Khudhier A. Evaluation of velocity distribution utilizing the helically coiled tape in a conical diffuser // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 518(3). Article number 032018.
10. Mfon S.A., Alabi S.B., Udoetok E.S., Offor U., Nsek E., Tomas Z., Miklík T. A semi-empirical model for estimation of pressure drop coefficient of a conical diffuser // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 74. P. 1003-1008.
11. Gosteev Yu.A., Obukhovskiy A.D., Salenko S.D. On head losses in conical diffusers // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2027. Article number 030048.
12. Tsoy M., Skripkin S., Litvinov I. Two spiral vortex breakdowns in confined swirling flow // *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35(6). Article number 061704.
13. Zhou X., Shi C., Miyagawa K., Wu H. Effect of modified draft tube with inclined conical diffuser on flow instabilities in Francis turbine // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 606-617.
14. Liu Z., Favrel A., Miyagawa K. Effect of the conical diffuser angle on the confined swirling flow induced Precessing Vortex Core // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2022. Vol. 95. Article number 108968.
15. Ilić D.B., Benišek M.H., Čantrak D.S. Experimental investigations of the turbulent swirl flow in straight conical diffusers with various angles // *Thermal Science*. 2017. Vol. 21. P. 725-736.
16. Yue Y., Shen Y. CFD-DEM study of spout incoherence phenomena in a conical spouted bed // *Powder Technology*. 2022. Vol. 406. Article number 117529.
17. Sahu N.K., Kumar M., Dewan A. Sophisticated interplay of operating conditions governs flow field transition and optimal conversion inside tangentially fired gasifiers // *Energy*. 2022. Vol. 252. Article number 123975.
18. Nazzal I.T., Ertunç Ö. Influence of turbulent flow characteristics on flame behaviour in diffuser combustors // *Energy*. 2019. Vol. 170. P. 652-667.
19. Mohanan J.N., Sundaramoorthy K., Sankaran A. Performance improvement of a low-power wind turbine using conical sections // *Energies*. 2021. Vol. 14(17). Article number 5233.
20. 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. Vol. 161. Article number 114158.
21. Tanasa C., Bosioc A., Stuparu A., Muntean S., Susan-Resiga R. A Perspective Review of Passive Techniques Applied to Control the Swirling Flow Instabilities from the Conical Diffuser of Hydraulic Turbines // *Applied Mechanics Reviews*. 2023. Vol. 75(6). Article number 060801.
22. Buron J.-D., Houde S., Deschênes C. Statistical and spectral analysis of the bulb-t conical diffuser flow // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2020. Vol. 13(1). P. 79-89.

23. Ning C., Cao P., Gong X., Zhu R. Optimization of Sweep and Blade Lean for Diffuser to Suppress Hub Corner Vortex in Multistage Pump // *Machines*. 2021. Vol. 9(12). Article number 316.

24. Vaz J.R.P., de Lima A.K.F., Lins E.F. Assessment of a Diffuser-Augmented Hydrokinetic Turbine Designed for Harnessing the Flow Energy Downstream of Dams // *Sustainability (Switzerland)*. 2023. Vol. 15(9). Article number 7671.

25. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // *Instruments and experimental techniques*. 2004. Vol. 4. P. 545-546.

26. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 195. Article number 123144.

27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 80-85.

28. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Григорьев Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей с турбонаддувом // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 4. С. 77-84.

29. Plotnikov L. Mathematical Description of the Aerodynamic Characteristics of Stationary Flows in a Vertical Conical Diffuser When Air Is Supplied through Various Tube Configurations // *Axioms*. 2023. Vol 12(3). Article number 244.

30. Зарянкин А.Е., Падашмоганло Т. Разработка и исследование гасителей неравномерности в трубопроводных системах и трактах турбомашин на основе математического моделирования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 93-110.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: leonplot@mail.ru.

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

Красильников Дмитрий Николаевич – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: dima_krasilnikov_2017@mail.ru.

Давыдов Данил Алексеевич – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail dda_2003@bk.ru.

Шурупов Владислав Александрович – студент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: shurupov.vladislav@yandex.ru.

References

1. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1996; 13(4):318-337.

2. Ferrari A. Exact solutions for quasi-one-dimensional compressible viscous flows in conical nozzles. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021; 915:915A1-1.

3. Novković D.M., Burazer J.M., Čoćić A.S. Comparison of different CFD software performances in the case of an incompressible air flow through a straight conical diffuser. *Thermal Science*. 2017; 21:863-874.
4. Teshnizi E.S., Momeni F. Analytical Solutions and Analyses of the Displacement Separating Point in Diffusers. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022; 8(3):891-903.
5. Vêras P., Balarac G., Métais O., Georges D., Bombenger A., Ségoufin C. Reconstruction of numerical inlet boundary conditions using machine learning: Application to the swirling flow inside a conical diffuser. *Physics of Fluids*. 2021; 33(8):085132.
6. Tanasa C., Bosioc A., Muntean S., Susan-Resiga R. A novel passive method to control the Swirling Flow with Vortex Rope from the conical diffuser of hydraulic turbines with fixed blades. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019; 9(22):4910.
7. Yang J., Zhang Y., Chen H., Fu S. Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator. *Aerospace Science and Technology*. 2020; 106:106076.
8. Shukri E.S. Analytical velocity study in a conical diffuser with screw tape inserts. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 153:06003.
9. Shukri E.S., Hussein A.A., Khudhier A. Evaluation of velocity distribution utilizing the helically coiled tape in a conical diffuser. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 518(3):032018.
10. Mfon S.A., Alabi S.B., Udoetok E.S., Offor U., Nsek E., Tomas Z., Miklík T. A semi-empirical model for estimation of pressure drop coefficient of a conical diffuser. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 74:1003-1008.
11. Gosteev Yu.A., Obukhovskiy A.D., Salenko S.D. On head losses in conical diffusers. *AIP Conference Proceedings*. 2018; 2027:030048.
12. Tsoy M., Skripkin S., Litvinov I. Two spiral vortex breakdowns in confined swirling flow. *Physics of Fluids*. 2023; 35(6):061704.
13. Zhou X., Shi C., Miyagawa K., Wu H. Effect of modified draft tube with inclined conical diffuser on flow instabilities in Francis turbine. *Renewable Energy*. 2021; 172:606-617.
14. Liu Z., Favrel A., Miyagawa K. Effect of the conical diffuser angle on the confined swirling flow induced Precessing Vortex Core. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2022; 95:108968.
15. Ilić D.B., Benišek M.H., Čantrak D.S. Experimental investigations of the turbulent swirl flow in straight conical diffusers with various angles. *Thermal Science*. 2017; 21:725-736.
16. Yue Y., Shen Y. CFD-DEM study of spout incoherence phenomena in a conical spouted bed. *Powder Technology*. 2022; 406:117529.
17. Sahu N.K., Kumar M., Dewan A. Sophisticated interplay of operating conditions governs flow field transition and optimal conversion inside tangentially fired gasifiers. *Energy*. 2022; 252:123975.
18. Nazzal I.T., Ertunç Ö. Influence of turbulent flow characteristics on flame behaviour in diffuser combustors. *Energy*. 2019; 170:652-667.
19. Mohanan J.N., Sundaramoorthy K., Sankaran A. Performance improvement of a low-power wind turbine using conical sections. *Energies*. 2021; 14(17):5233.
20. 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; 161:114158.
21. Tanasa C., Bosioc A., Stuparu A., Muntean S., Susan-Resiga R. A Perspective Review of Passive Techniques Applied to Control the Swirling Flow Instabilities from the Conical Diffuser of Hydraulic Turbines. *Applied Mechanics Reviews*. 2023; 75(6):060801.
22. Buron J.-D., Houde S., Deschênes C. Statistical and spectral analysis of the bulb-t conical diffuser flow. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2020; 13(1):79-89.
23. Ning C., Cao P., Gong X., Zhu R. Optimization of Sweep and Blade Lean for Diffuser to Suppress Hub Corner Vortex in Multistage Pump. *Machines*. 2021; 9(12):316.

24. Vaz J.R.P., de Lima A.K.F., Lins E.F. Assessment of a Diffuser-Augmented Hydrokinetic Turbine Designed for Harnessing the Flow Energy Downstream of Dams. *Sustainability (Switzerland)*. 2023; 15(9):7671.

25. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows. *Instruments and experimental techniques*. 2004; 4:545-546.

26. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 195:123144.

27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer. *Procedia Engineering*. 2017; 206:80-85.

28. Plotnikov L.V., Brodov Yu.M., Zhilkin B.P., Grigoriev N.I. Features of the thermomechanical characteristics of pulsating flows in the gas-air ducts of turbocharged piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):77-84.

29. Plotnikov L. Mathematical Description of the Aerodynamic Characteristics of Stationary Flows in a Vertical Conical Diffuser When Air Is Supplied through Various Tube Configurations. *Axioms*. 2023; 12(3):244.

30. Zaryankin A.E., Padashmoganlo T. Development and research of unevenness dampers in pipeline systems and turbomachinery paths based on mathematical modeling. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(1-2):93-110.

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.

Dmitry N. Krasilnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

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

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

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 26.02.2024 г.

Отредактировано 06.03.2024 г.

Принято 01.04.2024 г.