

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.6

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

Оригинальная статья /Original Paper

Применение численного моделирования для модернизации выхлопной системы газотурбинных двигателей

Т.В. Бощенко, С.Ю. Лебедев, А.Н. Королевских

Тюменский индустриальный университет,
625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является модернизация конструкции выхлопной системы газотурбинных двигателей (ГТД) с целью снижения аэродинамических потерь, используя численные методы (CFD-методы) моделирования течения выхлопных газов. **Метод.** Направления модернизации были выбраны путем рассмотрения картины течения выхлопных газов (отрывных зон течения и вихревых течений) в выхлопной системе при численном моделировании (Computational Fluid Dynamics). Модернизация выхлопной системы заключается в профилировании осерадиального диффузора и изменении конструкции газосборника. **Результат.** Профилирование осерадиального диффузора было выполнено, используя численные методы моделирования. Конструкция газосборника была изменена на основе технического решения, предложенного В.Б. Явкиным. Было выполнено численное моделирование течения выхлопных газов в модернизированном выхлопном устройстве. Для оценки результатов модернизации в численных моделях модернизированной конструкции и прототипа были определены значения аэродинамических потерь на выходе из осерадиального диффузора и газосборника. **Вывод.** CFD-моделирование позволило получить данные о структуре потока выхлопных газов в модернизированной выхлопной системе, увидеть картину распределения скоростей и давлений. Результаты численного эксперимента показали снижение потерь давления по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Ключевые слова: выхлопная система, осерадиальный диффузор, выхлопная улитка, CFD-моделирование, численное моделирование

Для цитирования: Т.В. Бощенко, С.Ю. Лебедев, А.Н. Королевских. Применение численного моделирования для модернизации выхлопной системы газотурбинных двигателей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1): 25-32. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

Application of numerical simulation for the modernization of the exhaust system of gas turbine engines

T.V. Boshchenko, S.YU. Lebedev, A.N. Korolevskikh

Tyumen Industrial University,
38 Volodarskogo Str., Tyumen 625000, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to modernize the design of the exhaust system of gas turbine engines (GTE) in order to reduce aerodynamic losses using numerical methods (CFD methods) for simulating the flow of exhaust gases. **Method.** The directions of modernization were chosen by considering the pattern of the flow of exhaust gases (separated flow zones and vortex flows) in the exhaust system during numerical modeling (Computational Fluid Dynamics). The modernization of the exhaust system consists in profiling the axial diffuser and changing the design of the gas collector. **Result.** The profiling of the axial diffuser was performed using numerical simulation methods. The design of the gas collector was changed based on the technical solution proposed by V.B. Yavkin. Numerical simulation of the flow of exhaust gases in the modernized exhaust device was

performed. To evaluate the results of modernization in numerical models of the modernized design and prototype, the values of aerodynamic losses at the outlet of the axial diffuser and gas collector were determined. **Conclusion.** CFD modeling made it possible to obtain data on the structure of the exhaust gas flow in the upgraded exhaust system, to see the pattern of the distribution of velocities and pressures. The results of the numerical experiment showed a decrease in pressure losses in the exhaust system by 11% relative to the prototype.

Keywords: exhaust system, axial diffuser, exhaust volute, CFD modeling, numerical simulation.

For citation: T.V. Boshchenko, S.YU. Lebedev, A.N. Korolevskikh. Application of numerical simulation for the modernization of the exhaust system of gas turbine engines. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49 (1): 25-32. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-25-32

Введение. Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в нефтегазовой отрасли. Использование ГТД в качестве силовой установки компрессора газоперекачивающего агрегата дает возможность использовать объект транспортировки в качестве топлива ГТД. Увеличение энергоэффективности ГТД дает возможность снизить затраты на транспортировку газа по магистральным трубопроводам. Одним из способов повышения энергоэффективности ГТД является снижение аэродинамических потерь в выхлопной системе ГТД. Снижение аэродинамических потерь позволяет повысить КПД ГТД, что делает исследования в этом направлении весьма актуальными.

Постановка задачи. Цель исследования – модернизировать конструкцию выхлопной системы ГТД с целью снижения аэродинамических потерь, используя численные методы (CFD-методы) моделирования течения выхлопных газов.

Методы исследования. Методики расчета элементов выхлопных систем можно разделить на три основные группы: методика расчета, основанная на принципе разделения потерь [1,2]; методика расчета, основанная на теории пограничного слоя [3]; методика численного расчета [4].

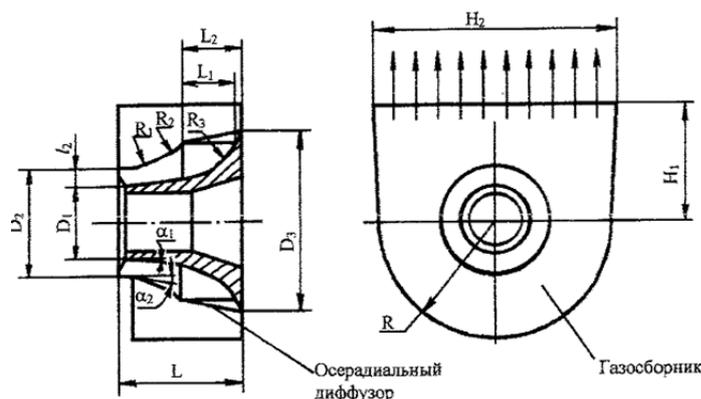
Недостаток первых двух методов – невысокая точность при сложных расчетах, который устраняется при численных методах расчета.

Существует три основополагающих подхода численных методик: прямое численное моделирование; решение систем уравнений, определенных как среднее по Рейнольдсу; подход, применяющий методы крупных вихрей.

Значительный рост вычислительной мощности ЭВМ в последние десятилетия позволил создать программное обеспечение (ПО), использующее численные методы для расчета газодинамических задач. Решение таких задач получило название – решение методами CFD (Computational Fluid Dynamics). CFD-методы могут заменить, в ряде случаев, физический эксперимент, что позволяет снизить время и затраты на проектирование.

Важным этапом при применении CFD-методов является изучение моделей турбулентности в целях определения границ их применения [5-9]. Анализ литературы показал, что наиболее достоверные данные (на 20-30% точнее других методов расчета), соответствующие экспериментальным данным, дают CFD методы при моделях турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и SST . Из всего выше сказанного заключаем, что для совершенствования конструкции выхлопной системы ГТД необходимо использование численных (компьютерных) методов расчета (CFD-методы).

Модернизация выхлопной системы. В качестве прототипа примем выхлопную систему для ГТД НК-38СТ, устанавливаемого на ГПА-16 «Волга». На рис. 1 и в табл. 1 представлены конфигурация и основные геометрические размеры осерадиального диффузора (ОРД) и газосборника, входящие в состав выхлопной системы прототипа.



Axial diffuser

Gas collector

Рис. 1. Конструкция осерадимального диффузора и газосборника
Fig. 1. Design of the axial diffuser and gas collector

Таблица 1. Основные геометрические размеры осерадимального диффузора и газосборника
Table 1. Main geometric dimensions of the axial diffuser and gas collector

Наименование / Name	Значение/ Meaning
Осерадимальный диффузор / Axial diffuser	
Начальный диаметр обтекателя диффузора / Initial diffuser fairing diameter D_1 , мм	985,5
Начальный диаметр обечайки диффузора/ The initial diameter of the diffuser shell D_2 , мм	1690
Выходной диаметр обечайки диффузора/ Diffuser shell outlet diameter D_3 , мм	2580
Ширина выходного сечения диффузора/ Diffuser outlet width L_1 , мм	720
Ширина выходного сечения диффузора (за рамкой)/ Diffuser outlet width (behind the frame) L_2 , мм	772
Площадь входного сечения диффузора/ Diffuser inlet area $F_{вх}$, м ²	1,48
Площадь выходного сечения диффузора / Diffuser outlet area $F_{вых}$, м ²	4,38
Входной угол обтекателя диффузора α_1 , град/ Entrance angle of diffuser fairing	2°
Входной угол обечайки диффузора α_2 , град/ Diffuser shell inlet angle	9°15'
Радиус поворотного участка обечайки (начальный) / Radius of the turning section of the shell (initial) R_1 , мм	830
Радиус поворотного участка обечайки / Radius of the turning section of the shell R_2 , мм	907,5
Радиус поворотного участка обтекателя / Fairing turning radius R_3 , мм	755
Газосборник / Gas collector	
Радиус наружной обечайки газосборника/ The radius of the outer shell of the gas collector R , мм	1400
Длина газосборника/ Gas collector length L , мм	1560
Высота верхней части газосборника/ Height of the upper part of the gas collector H_1 , мм	1400
Ширина выходного сечения газосборника/ Width of the outlet section of the gas collector H_2 , мм	2800

Чтобы изучить структуру потока и определить отрывные зоны в представленном прототипе, исследуем газодинамику течения выхлопных газов в ОРД, газосборнике и переходнике, используя CFD-методы моделирования.

Рассмотрим подробнее основную идею CFD-методов моделирования. Большинство гидродинамических расчетов включают в себя решение систему уравнений Навье-Стокса четвертого порядка. Уравнения описывают законы сохранения массы, импульса и энергии. Информация по уравнениям представлена в [10-13].

Система уравнений Навье-Стокса не имеет аналитического решения, поэтому при решении используют численные методы. Возможность программной реализации численных методов и рост расчетной мощности ЭВМ позволили создать программное обеспечение для решения задач гидродинамики со сложной геометрией течений. В основе большинства программ, получивших название CFD-пакетов или комплексов, лежит метод конечных объемов (МКО).

Компьютерное моделирование на основе CFD-методов обладает рядом положительных качеств: снижение затрат времени на разработку новых технических решений; выполнение неосуществимых натуральных экспериментов; снижение затрат на проведение исследований. Одним из наиболее универсальных CFD-пакетов является программный комплекс ANSYS CFX, который позволяет решать различные задачи газодинамики, а также теплообмена, горения и др. Преимуществом ANSYS CFX является использование расчетных схем разного порядка точности, соответствующих различным способам дискретизации конвективных составляющих из обобщенного уравнения Навье-Стокса.

Этапы исследования численной модели в программном комплексе ANSYS CFX следующие: создание геометрии численной модели (3D-модели); построение сеточной модели, позволяющей выполнить расчет на штатном ПК и получить адекватные результаты; задание расчетной области и граничных условий на основе сеточной модели; исследование численной модели; анализ полученных результатов.

Геометрия была выполнена в программном комплексе SolidWorks и импортирована в геометрический модуль ANSYS DesignModeler через формат Parasolid (.x_t). Полученная модель (раздел 3.1) импортируются внутри программного комплекса ANSYS CFX в сеточный генератор Meshing.

Задаем в сеточном генераторе структурированную, гексаэдральную модель со сгущениями ячеек вблизи стенок, для разрешения течения в пограничном слое. Параметры сеточной модели: число элементов – 4015553; размер элемента – 0,040 м). Далее импортируем сеточную модель в модуль CFX-Pre, где первым этапом создаём домен сеточной модели. В качестве материала задаваемого домена используем «Air Ideal Gas», т.к. в стандартной библиотеке ANSYS CFX нет материала «выхлопные газы», а для оценки потери и поиска отрывных зон теплофизические параметры газа не играют значимой роли.

Следует отметить, что для расчета возможно применение различных моделей турбулентности: модель Буссинеска, модель Спаларта-Альмараса, модель Ментера SST, модель типа k-ε, модель типа k-ω, модели рейнольдсовых напряжений. Они отличаются друг от друга сложностью решения уравнения движения и точностью описания течения.

В текущем исследовании выбраны полуэмпирические модели турбулентности типа модель Ментера SST, модель типа k-ε, модель типа k-ω, т.к. в работе [14] доказано, что применение в численном эксперименте этих моделей турбулентности дают результаты, наиболее соответствующие натурному эксперименту.

Заключительным этапом является задание граничных условий. К ним относим поверхности входа и выхода потока, и поверхности, контактирующие со стенками улитки и переходника. Задаем расход потока на входе 54 кг/с; на выходе давление 101325 Па (атмосферное давление); тип контакта со стенками «Isothermal».

Исследование численной модели в модуле CFX-Solver Manager выполнено на штатном ПК фирмы «HP» модель Laptop 15db-0xxx. Объём оперативной памяти ПК составляет 8 гигабайт; процессор 2-х ядерный с частотой 3,10 ГГц.

Время вычисления одной расчетной сетки в среднем составило 4-5 минут. Сходимость решения наблюдалось примерно после 50-55 математических итераций.

Для наблюдения за ходом численного эксперимента в модуле CFX-Solver Manager используются графики сходимости различных параметров. График отображает максимальное (Max) отклонение в одной из ячеек или среднеквадратичное отклонение (RMS) во всех ячейках какого-либо параметра при каждой итерации.

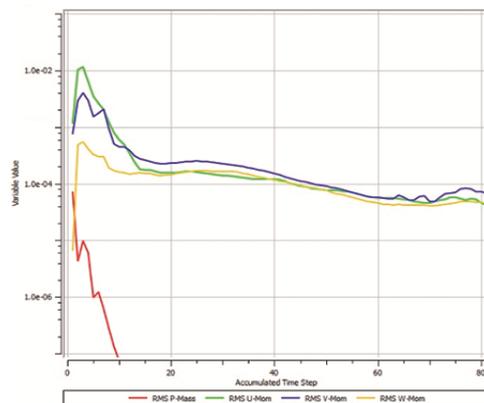


Рис. 2. График сходимости давления и скорости потока
Fig. 2. Convergence plot of pressure and flow rate

Для оценки сходимости нашего исследования необходимо использование графиков сходимости параметров давления, скорости, турбулентности, а также графики расходов на входе и выходе потока (рис. 2). При среднеквадратичном отклонении ниже 0,0001 (1,0e-04) численный эксперимент завершился.

Обсуждение результатов. Выполнив численный эксперимент, рассмотрим картину течения в каждом элементе прототипа. Конструкция ОРД представляет собой две поверхности вращения называемых обводами (рис. 3). Внутренний обвод именуется обечайкой, а внешний – обтекателем. В виду большей длины образующей внешнего обвода и резкому увеличению площади поперечного сечения потока выхлопных газов в ОРД возникает отрывная зона течения А (рис. 3). Разворот течения выхлопных газов в вертикальное направление создает центробежную силу, в результате которой поток сталкивается с обтекателем, снижая давление на поверхности внутреннего обвода, создавая отрывное течение – зона Б. Выходя из ОРД, поток выхлопных газов попадает в газосборник, где меняет свое направление с горизонтального на вертикальное.

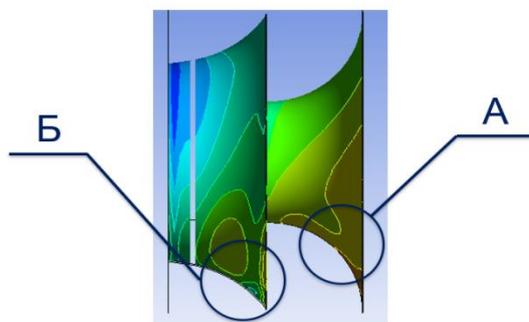


Рис. 3. Контуры полного давления на поверхности осерадиального диффузора
Fig. 3. Total pressure contours on the surface of an axial-radial diffuser

На рис. 4 видно, как в результате изменения направления течения возникает спиральное течение, что снижает эффективность выхлопной системы.

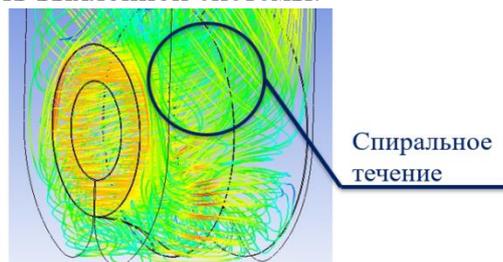


Рис. 4. Линии тока в газосборнике
Fig. 4. Current lines in the gas collector

В результате численного моделирования течения выхлопных газов в выхлопной системе были определены следующие направления модернизации:

1) Снижение области отрывного течения газов в ОРД, корректируя изменение площади поперечного сечения потока, зависящей от угла раскрытия ОРД.

2) Организация потока выхлопных газов в газосборнике: снижение завихрения потока.

В качестве инструмента для совершенствования диффузора также будем использовать CFD-методы моделирования. Для этого выполним моделирование течения потока выхлопных газов в ОРД при различных углах раскрытия (2-7°). Геометрия ОРД позволяет выполнить исследование двумерной модели, что сократит время расчета при каждой итерации. Во всех расчетах ОРД применялась модель турбулентности к-ε при максимальном размере элемента сетки 1 мм. Результаты моделирования представлены на рис. 5

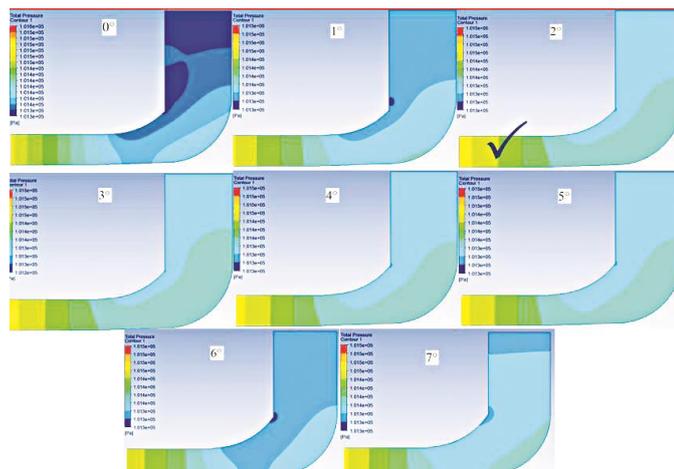


Рис. 5. Моделирование течения потока выхлопных газов в осерадиальном диффузоре при различных углах раскрытия

Fig. 5. Simulation of the flow of exhaust gases in an axial diffuser at various opening angles

При полном отсутствии угла раскрытия в профиле ОРД наблюдаются наиболее низкие значения давлений, что говорит о более высоких скоростях потока, однако, при угле раскрытия в 2 градуса поле давлений во всем профиле диффузора выравнивается, что должно устранить отрывные зоны по всему профилю ОРД.

Для снижения давления в нижней части газосборника и минимизации вихревых потоков было использовано решение, предложенное Явкиным В.Б. [15]. Суть изменения состоит в увеличении ширины газосборника и создании «кармана» (рис. 6), что должно улучшить организацию потока и снизить его завихрение.

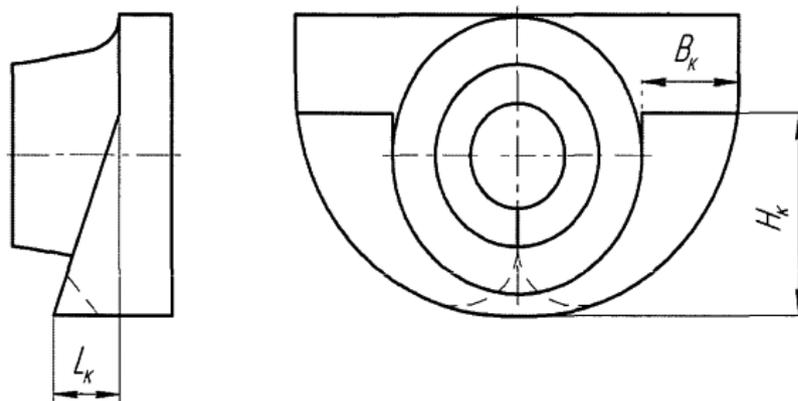


Рис. 6. Конструкция газосборника, предложенная Явкиным В.Б.[15]

Fig. 6. The design of the gas collector proposed by Yavkin V.B.[15]

В табл.2 представлено распределение потерь в элементах выхлопной системы при различных моделях турбулентности для прототипа и усовершенствованной выхлопной системы. Значения в табл.2 получены путем осреднения давлений по площади или массовому расходу в контролируемых сечениях и нахождения разности давления между текущим и предыдущим сечениями.

Таблица 2. Потери давления в элементах выхлопной системы
Table 2. Pressure losses in the elements of the exhaust system

Осреднение давления/ Pressure averaging		Потери давления/ Pressure loss, Па					
		по площади/ by area			по массе/ by weight		
модель турбулентности/Turbulence model		к-ε	к-ω	SST	к-ε	к-ω	SST
Диффузор/ Diffuser	Прототип Prototype	1590	2131	1627	1542	1736	1587
	Модернизация/ Modernization	1401	1985	1446	1370	1403	1399
Газосборник/ Gas collector	Прототип Prototype	2100	1658	2164	1484	1340	1547
	Модернизация/ Modernization	1929	1411	2005	1281	1142	1339
Переходник/ Adapter	Прототип Prototype	348	424	447	422	470	351
	Модернизация/ Modernization	311	395	409	389	444	319
Суммарные потери/ Total losses	Прототип Prototype	4038	4213	4238	3448	3546	3485
	Модернизация/ Modernization	3641	3791	3860	3040	2989	3057
Среднее значение/ Mean	Прототип Prototype	3828					
	Модернизация/ Modernization	3397					

Среднее значение суммарных потерь в таблице 2 показывают снижение потерь по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Вывод. 1. Рассмотрев основные методы расчета диффузоров, было решено использовать численные методы расчета (CFD-моделирование) при выполнении модернизации.

2. Используя CFD-моделирование, была рассмотрена структура течения в элементах выхлопной системы ГТД.

3. На основе исследования течения газов в выхлопной улитке выполнена модернизация выхлопной системы.

4. CFD-моделирование позволило получить данные о структуре потока выхлопных газов в модернизированной выхлопной системе, увидеть картину распределения скоростей и давлений. Результаты численного эксперимента показали снижение потерь давления по выхлопной системе относительно прототипа на 11%.

Библиографический список:

1. К вопросу проектирования выхлопных устройств газотурбинных установок / И.С. Давлетшин [и др.] // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011», КНИГУ им. А.Н. Туполева, Казань, 2011. С. 300-302.
2. Дорфман А.Ш. Назарчук М.М. Аэродинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин: учебник. Издательство академии наук украинской ССР, Киев, 1960. 189 с.
3. Дейч М.Е., Зарякин А.Е. Газодинамика диффузоров выхлопных патрубков турбомашин. Москва: «Энергия», 1970.
4. Дорфман А.Ш. Сайковский М.И. Приближенный метод расчета потерь в криволинейных диффузорах при отрывных течениях // Промышленная аэродинамика, 1966, вып. 28, С.98-121.
5. Schluter J.U. Wu X., Pitsch N. Large-Eddy Simulations of a Separated Plane Diffuser // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 10-13, 2005, Reno, NV.
6. Lai Y.G. Calculation of Planar and Conical Diffuser Flows / Y.G. Lai, R.M. Sot, B.C. Hwangt // AIAA Journal. 1989; 27(5):542-548
7. Зинина С.А., Попов А.И., Брагин Д.М., Еремин А.В. Исследование процесса теплопереноса в тепловыделяющем элементе цилиндрической формы // Инженерный вестник Дона, 2021, №8 URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7154>

8. Долганов В.А., Адамия Д.Д., Томарева И.А. Инновационные технологии строительства нефте- и газопроводов в вечномёрзлых грунтах // Инженерный вестник Дона, 2021, №5 URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_4_dolganov_adamiya_tomareva.pdf_295b4a8739.pdf
9. Давлетшин И.С., Мингазов Б.Г. Поиск направлений оптимизации выхлопного устройства ГПА-Ц-16 // XVIII Туpoleвские чтения. Т.2, Изд-во Казан., гос. техн. ун-та, 2010. -С. 18-19.
10. Sovran G. Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section / G. Sovran, E.D. Klomp // *Fluid Dynamics of Internal Flow*, Elsevier Publishing Co., 1967
11. Vassiliev V. Experimental and numerical investigation of the impact of swirl on the performance of industrial gas turbines exhaust diffusers / V. Vassiliev // *ASME Journal of turbomachinery*. 2003 GT2003- 38424.
12. Vassiliev V. Refitting of exhaust diffuser of industrial gas turbine / V. Vassiliev, M. Rothbrust, S. Irmisch // *ASME Journal of turbomachinery*. 2008. GT2008-50165.
13. Vassiliev V. CFD analysis of industrial gas turbine exhaust diffusers / V. Vassiliev, S. Irmisch, S. Florjancic // *ASME Journal of turbomachinery*. 2002. 2002-GT-30597.
14. Проектирование проточной части выхлопных устройств ГТУ с конвертированными авиационными ГТД: дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 / И.С. Давлетшин; Казань, 2013.
15. Явкин В.Б. Оптимизация проточной части выхлопного диффузора стационарной ГТУ // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011». - С. 398-401.

References:

1. On the issue of designing exhaust devices for gas turbine installations / I.S. Davletshin [et al.] // *Problems and prospects for the development of aviation, land transport and energy "ANTE-2011"*, *KNIGU im. A.N. Tupolev, Kazan*, 2011; 300-302. (In Russ)
2. Dorfman A.Sh. Nazarchuk M.M. Aerodynamics of diffusers and exhaust pipes of turbomachines: a textbook. *Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kiev*.1960; 189.
3. Deitch M.E., Zaryankin A.E. Gas dynamics of diffusers of exhaust pipes of turbomachines. Moscow: [Energija] *Energy*, 1970. (In Russ)
4. Dorfman A.Sh. Saykovsky M.I. Approximate method for calculating losses in curvilinear diffusers with separated flows. [Promyshlennaya aerodinamika] *Industrial Aerodynamics*, 1966; 28: 98-121. (In Russ)
5. Schluter J.U. Wu X., Pitsch H. Large-Eddy Simulations of a Separated Plane Diffuser. *43rd AIAA Aero-space Sciences Meeting and Exhibit*, January 10-13, 2005, Reno, NV.
6. Lai Y.G. Calculation of Planar and Conical Diffuser Flows / Y.G. Lai, R.M. Sot, B.C. Hwangt. *AJAA Journal*. 1989; 27(5):542-548
7. Zinina S.A., Popov A.I., Bragin D.M., Eremin A.V. Study of the heat transfer process in a cylindrical fuel element. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*. 2021; 8 URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n8y2021/7154>(In Russ)
8. Dolganov V.A., Adamiya D.D., Tomareva I.A. Innovative technologies for the construction of oil and gas pipelines in permafrost soils. [Inzhenernyy vestnik Dona] *Engineering Bulletin of the Don*, 2021; 5 URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_67_4_dolganov_adamiya_tomareva.pdf_295b4a8739.pdf (In Russ)
9. Davletshin I.S., Mingazov B.G. Search for optimization directions for the GPA-Ts-16 exhaust device. XVIII Tupolev Readings. T.2, *Kazan Publishing House, state. tech. un-ta*, 2010; 18-19. (In Russ)
10. Sovran G. Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross-Section / G. Sovran, E.D. Klomp. *Fluid Dynamics of Internal Flow*, Elsevier Publishing Co., 1967.
11. Vassiliev V. Experimental and numerical investigation of the impact of swirl on the performance of industrial gas turbines exhaust diffusers. *ASME Journal of turbomachinery*. 2003; GT2003- 38424.
12. Vassiliev V. Refitting of exhaust diffuser of industrial gas turbine / V. Vassiliev, M. Rothbrust, S. Irmisch. *ASME Journal of turbomachinery*. 2008; GT2008-50165.
13. Vassiliev V. CFD analysis of industrial gas turbine exhaust diffusers / V. Vassiliev, S. Irmisch, S. Florjancic. *ASME Journal of turbomachinery*. 2002; 2002-GT-30597.
14. Design of the flow part of the exhaust devices of gas turbines with converted aviation gas turbine engines: dis. ... cand. those. Sciences: 05.07.05 / I.S. Davletshin; Kazan, 2013. (In Russ)
15. Yavkin V.B. Optimization of the flow part of the exhaust diffuser of a stationary gas turbine.[Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki «ANTE-2011»] *Problems and prospects for the development of aviation, land transport and energy "ANTE-2011"*. 2011; 398-401. (In Russ)

Сведения об авторах:

Бощенко Татьяна Викторовна, доцент, кафедра «Прикладная механика», boschenkotv@tyuiu.ru
Лебедев Сергей Юрьевич, ассистент, кафедра «Прикладная механика», lebedevsergey1995@gmail.com
Королевских Анастасия Николаевна, старший преподаватель, кафедра «Прикладная механика», korolevskihan@tyuiu.ru

Information about authors:

Tatyana V. Boshchenko, Assoc. Prof., Department of Applied Mechanics, boschenkotv@tyuiu.ru
Sergey Yu. Lebedev, Assistant, Department of Applied Mechanics, lebedevsergey1995@gmail.com
Anastasia N. Korolevskikh, Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics, korolevskihan@tyuiu.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 21.01.2022г.

Одобрена после рецензирования / Revised 17.02.2022.

Принята в печать /Accepted for publication 18.02.2022.