

Труды МАИ. 2022. № 122  
Trudy MAI, 2022, no. 122

Научная статья  
УДК 621.43.056  
DOI: [10.34759/trd-2022-122-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-08)

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ДИФFUЗОРОВ НА ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ**

**Андрей Владимирович Бакланов**

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»,

Казань, Россия

[andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru)

*Аннотация.* В работе рассмотрено три диффузора различной конструкции: профилированный, с отрывом по наружной стенке и отрывной диффузор. Представлены основные геометрические параметры диффузоров. Рассмотрено стендовое оборудование и отражены особенности проведения эксперимента. Для определения потерь полного давления в камере сгорания и перепада давления на стенках жаровой трубы, камера продувается воздухом последовательно меняя значения приведенной скорости потока на входе. Выполнено испытание камер сгорания с рассмотренными диффузорами и определены потери давления в камере и диффузоре. Результаты испытаний показали, что наименьшие потери давления наблюдаются в отрывном диффузоре при этом в профилированном диффузоре и диффузоре с отрывом по наружной стенке значение потерь находится практически на одном уровне [1].

**Ключевые слова:** камера сгорания, эксперимент, диффузор, потери давления

**Для цитирования:** Бакланов А.В. Влияние конструкции кольцевых диффузоров на потери давления // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-08)

## THE EFFECT OF THE ANNULAR DIFFUSER DESIGN ON PRESSURE LOSS

**Andrey V. Baklanov**

Kazan Motor Production Association,

Kazan, Russia

[andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru)

**Abstract.** Diffusers are being employed in combustion chambers of gas turbine engines for velocity reduction at the flame tube inlet. In many ways, diffuser defines the flow structure in the combustion chamber and ensures uniform air distribution in the flaming tube, and, as a consequence, affects the processes in the combustion chamber as well as on the temperature field unevenness at the combustion chamber outlet. Thus, selecting of the optimal type of diffuser and its structure is an important engineering task, which fulfillment requires conduction of experimental works.

The presented work considered three types of diffusers of various structure, such as profiled, with separation along the outer wall, and a flow-separation diffuser. The main geometric parameters of diffusers are regarded. The article considers bench equipment and reflects specifics of the experiments conducting. For determining the total pressure in the combustion chamber and the pressure drop on the flame tube walls the chamber is being blown-out by air successively changing the flow reduced velocity values at the inlet. The

temperature, consumption and total pressure are being measured at the combustion chamber inlet, while the total pressure rake is being set at the chamber outlet. Three equally spaced total pressure receivers are being fixed in the inner and outer space between the hull and the flaming tube.

Combustion chambers testing was performed with the above said diffusors, and pressure loss were determined in both chamber and diffuser. The results of the test revealed that losses level in the diffuser increases with the superficial velocity increase. The lowest pressure loss is being observed in the flow-separation diffuser. The pressure loss in both profiled diffuser and diffuser with separation along the outer wall are staying herewith practically in the same level.

**Keywords:** combustion chamber, experiment, diffuser, pressure loss

**For citation:** Baklanov A.V. The effect of the annular diffuser design on pressure loss.

*Trudy MAI*, 2022, no. 122. DOI: [10.34759/trd-2022-122-08](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-08)

## **Введение**

В камерах сгорания газотурбинных двигателей для снижения скорости на входе в жаровую трубу используются диффузоры. Во многом диффузор определяет структуру течения в камере сгорания и обеспечивает равномерность распределения воздуха в жаровой трубе и как следствие влияет на внутрикамерные процессы и на неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания [2-4]. Поэтому выбор типа диффузора и его оптимальной конструкции для камеры сгорания является важной инженерной задачей, выполнение которой требует проведения экспериментальных работ [5,6].

При проектировании камеры сгорания следует учитывать, что диффузор должен удовлетворять ряду требований:

1. Снижать скорость воздуха и повышать его давление,
2. Обеспечивать равномерность потока воздуха,
3. Обеспечивать стабильность течения воздуха при изменении параметров на входе.

Один из способов повышения безотрывности и обеспечения стабильности течения в условиях изменения параметров на входе в камеру сгорания является профилирование боковых стенок кольцевого диффузора по закону постоянства градиента нарастания давления по его длине  $\frac{dP}{dx} = \text{const}$  по зависимости [7]:

$$F_i = \frac{F_d}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{F_d}{F_K} \right)^2 - 1 \right] \frac{L_d - L_i}{L_d}}} \quad (1)$$

где  $L_i$  и  $F_i$  текущие длина и площадь диффузора;  $F_d$  - площадь выходного сечения диффузора,  $F_K$  - площадь сечения на входе в камеру сгорания;  $L_d$  - длина диффузора.

Несмотря на достоинства профилированных диффузоров по сравнению с непрофилированными, более широкое распространение в кольцевых камерах сгорания получили плоские диффузоры с небольшой степенью раскрытия и последующим внезапным расширением. Такие диффузоры называют отрывными. Данный диффузор с небольшим углом расширения потока менее чувствителен к изменениям начальных условий, а наличие внезапного расширения потока задает стабильный профиль скорости на входе в жаровую трубу [8,9].

В работе исследовалась камера сгорания с тремя разными кольцевыми диффузорами (рис.1): 1) профилированный, 2) с отрывом по наружной (перфорированной) стенке, 3) отрывной при этом конструкция жаровой трубы не менялась.

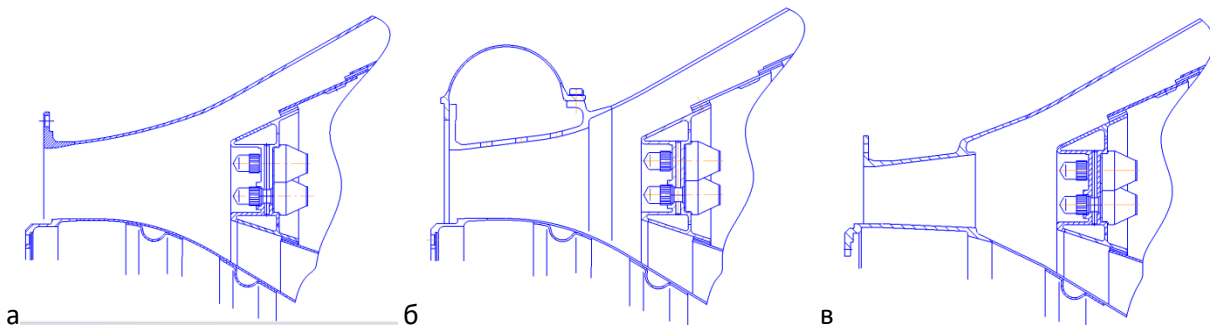


Рис.1 Типы диффузоров

Основные параметры диффузоров занесены в таблицу 1.

К основным параметрам диффузора можно отнести: приведенный угол диффузора, степень диффузорности, длина диффузора.

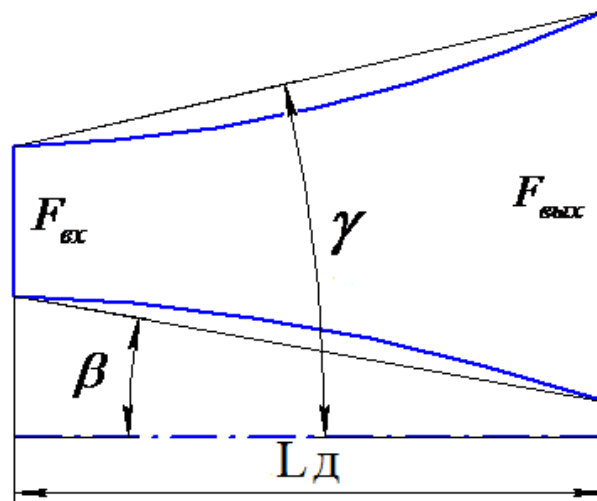


Рис.2 Схема диффузора

Приведенный угол диффузора определяется при помощи зависимости [12,13]:

$$\alpha_{пр} = \gamma - \beta \quad (2)$$

где  $\gamma$  - угол наклона наружной стенки диффузора,  $\beta$  - угол наклона внутренней стенки диффузора (рис.2).

Степень диффузорности определяются при помощи зависимости:

$$n_{\text{д}} = \frac{F_{\text{вых}}}{F_{\text{вх}}} \quad (3)$$

где  $F_{\text{вых}}$  - площадь на выходе из диффузора,  $F_{\text{вх}}$  - площадь на входе в диффузор.

В соответствии с данными таблицы 1 видно, что рассмотренные диффузоры имеют различные параметры [10,11]. К примеру профилированный диффузор имеет самую большую длину и приведенный угол, от того обладает самой высокой степенью диффузорности по сравнению с другими рассмотренными диффузорами.

Таблица 1

Обозначение параметра	Параметр диффузора	Профилированный	С отрывом по наружной стенке	Отрывной
$L_{\text{д}}$	Длина диффузора, мм	165	120	95,5
$\alpha_{\text{пр}}$	Приведенный угол диффузора, град	18	16	7
$F_{\text{вых}}$	Площадь на выходе из диффузора, м <sup>2</sup>	0,343	0,226	0,153
$n_{\text{д}}$	Степень диффузорности	2,39	1,58	1,307

Полноразмерные камеры сгорания исследовались на стенде (рис.3), который оснащен необходимыми системами измерения параметров и их регистрации. В состав стенда входит газотурбинный двигатель, который служит для подвода сжатого воздуха к испытываемой камере сгорания. Воздух отбирается за компрессором высокого давления, затем поступает по трубопроводу в мерный участок. Расход воздуха

измеряется расходомерным устройством (труба Вентури) с регистрацией показаний датчиков давления. Температура воздуха контролируется термопарой группы хромель-алюмель [14,15].

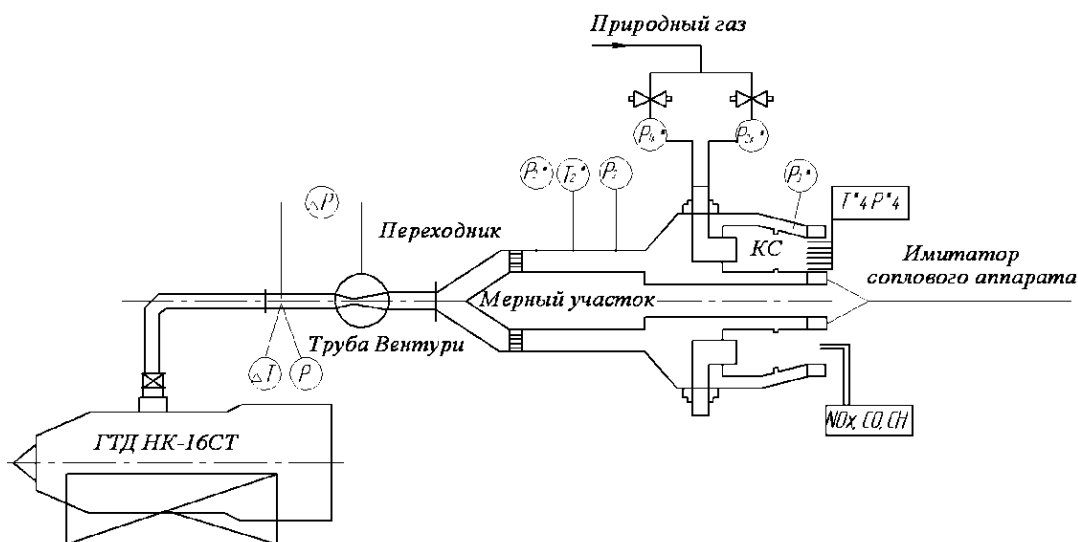


Рис.3 Схема стенда для испытаний камер сгорания

Получение газодинамических характеристик камеры сгорания производится по результатам определения потерь полного давления на жаровой трубе и в камере сгорания. Для этого на выходе из камеры устанавливается гребенка полного давления, а в наружном и внутреннем пространстве между корпусом и жаровой трубой устанавливается три равнорасположенные приемники полного давления.

Приведенная схема измерений позволяет определить потери в диффузоре при внезапном расширении потока на выходе из него и в каналах над и под жаровой трубой, а так же определить потери давления на жаровой трубе в камере сгорания [16,17].

Для определения потерь полного давления в камере сгорания и перепада давления на стенках жаровой трубы камера последовательно продувается воздухом при различных значениях приведенной скорости потока на входе  $\lambda$ .

Во время проведения испытаний так же производятся измерения полного давления воздуха на входе в камеру  $P_2^*$ , в зазоре между кожухами и корпусами камеры в районе «карманов» подачи охлаждающего воздуха  $P_{нар}^*$  и  $P_{вн}^*$  (с наружной и внутренней стороны соответственно) и на выходе из камеры  $P_4^*$  [18-20].

Потери полного давления в камере сгорания определяются по формуле:

$$\Delta P_{КС}^* = (P_2^* - P_4^*) / P_2^*, (\%) \quad (4)$$

Потери полного давления в жаровой трубе:

$$\Delta P_{ЖТ}^* = \left( \frac{P_{нар}^* + P_{вн}^*}{2} - P_4^* \right) / P_2^*, (\%) \quad (5)$$

В соответствии с зависимостями (4), (5) определяются значения суммарных потерь  $\Delta P_{КС}^*$  и перепад на стенке жаровой трубы  $\Delta P_{ЖТ}^*$  исследуемой конструкции камеры сгорания.

По результатам продувки и выполненных измерений строятся зависимости  $\Delta P_{КС}^*$  и  $\Delta P_{ЖТ}^*$  при различных значениях  $\lambda$ . За отчетный режим принимается значение  $\lambda$  равное относительной скорости потока на входе в камеру на режиме номинальной мощности двигателя, в составе которого эксплуатируется исследуемая камера сгорания.

Потери в диффузоре определяются как разность между потерями давления в камере сгорания и потерями давления в жаровой трубе:



$$\Delta P^*_{\text{диф}} = \Delta P^*_{\text{КС}} - \Delta P^*_{\text{ЖТ}} \quad (6)$$

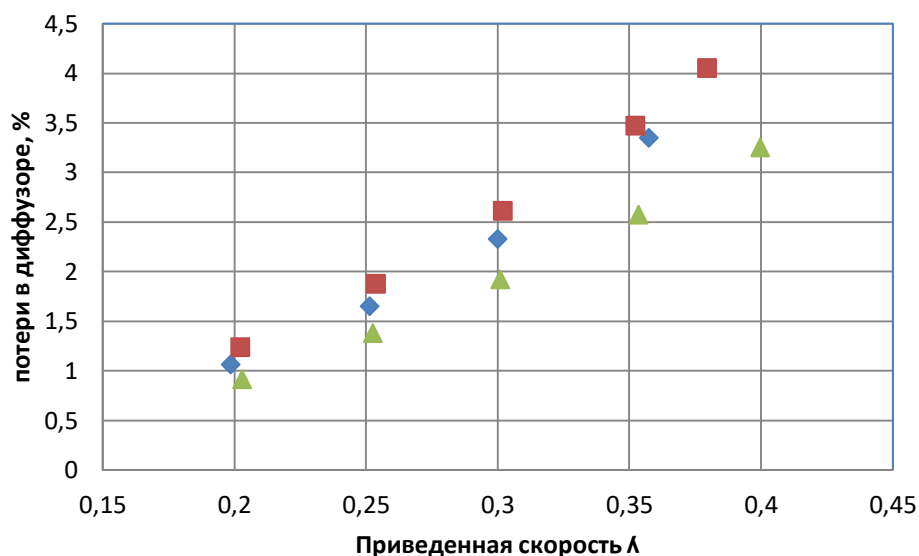


Рис.4 Потери в диффузорах камер сгорания.

◆◆-профилированный, ■-с отрывом по наружной стенке, ▲-отрывной

Результаты испытаний показали, что с увеличением приведенной скорости уровень потерь давления в диффузоре увеличивается (рис.4). Наименьшие потери давления наблюдаются в отрывном диффузоре. Отмечается, что в профилированном диффузоре и диффузоре с отрывом по наружной стенке значение потерь находится практически на одном уровне. Это связано с тем что у диффузора с отрывом по наружной стенке имеются перфорации, которые приводят к возникновению дополнительных потерь давления.

## Список источников

1. Lieuwen T., McDonell V., Petersen E., Santavicca D. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, vol. 130 (1), pp. 011506. DOI: [10.1115/1.2771243](https://doi.org/10.1115/1.2771243)
2. Мингазов Б.Г., Давлетшин И.С. Выбор моделей турбулентности и параметров сетки для расчета течений в диффузорных каналах // Известия вузов. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 24-28.
3. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review // Experimental Thermal and Fluid Science, 1996, vol. 13, no. 4, pp. 318-337. DOI: [10.1016/S0894-1777\(96\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00091-X)
4. Buice C.U., Eaton J.K. Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser. Report No. TSD-107. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA. August, 1997.
5. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе ГТД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 81-89.
6. Moses C., Roets P. Properties, Characteristics and Combustion Performance of Sasol Fully Synthetic Jet Fuel // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, vol. 131, no. 4. DOI: [10.1115/1.3028234](https://doi.org/10.1115/1.3028234)
7. Harrison W., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative—Military Fuels Produced from Coal // DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.

8. Бакланов А.В., Маркушин А.Н., Цыганов Н.Е. Влияние формы насадка вихревой горелки на смешение в закрученной струе // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С. 13-18.
9. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. – Самара: СНЦ РАН, 2004. – 266 с.
10. Мингазов Б.Г., Бакланов А.В. Исследование стабилизации пламени в модельной камере сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 106-110.
11. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. – Самара: СНЦ РАН, 2002. – 527 с.
12. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. - Казань: Изд-во Казанского государственного технического университета, 2004. - 220 с.
13. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 620 с.
14. Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Салимзянова Г.Ф. Гидравлические потери в серийной и модернизированной многофорсуночной камере сгорания ГТД // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1. С. 90-94.
15. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, vol. 107, pp. 24 – 37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)

16. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, CRC Press, 2010, 537 p.

17. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67501>

18. Исаев А.И., Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М., Ходацкий С.А. Исследование процесса образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания и термодинамический расчет импульсного горения // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75583>

19. Болховитин М.С., Боровиков Д.А., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Разработка испытательного стенда для малоразмерных газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75612>

20. Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Методологические аспекты экспериментальных исследований процесса горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90175>

## References

1. Lieuwen T., McDonell V., Petersen E., Santavicca D. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, vol. 130 (1), pp. 011506. DOI: [10.1115/1.2771243](https://doi.org/10.1115/1.2771243)

2. Mingazov B.G., Davletshin I.S. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2011, no. 4, pp. 24-28.

3. Azad R.S. Turbulent flow in a conical diffuser: A review, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, vol. 13, no. 4, pp. 318-337. DOI:[10.1016/S0894-1777\(96\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(96)00091-X)
4. Buice C.U., Eaton J.K. *Experimental investigation of flow through an asymmetric plane diffuser. Report No. TSD-107. Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA. August, 1997.*
5. Markushin A.N., Baklanov A.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, vol. 15, no. 3, pp. 81-89.
6. Moses C., Roets P. Properties, Characteristics and Combustion Performance of Sasol Fully Synthetic Jet Fuel, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2009, vol. 131, no. 4. DOI:[10.1115/1.3028234](https://doi.org/10.1115/1.3028234)
7. Harrison W., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative—Military Fuels Produced from Coal, *DoE Clean Coal Conference*, Clearwater, FL, June 2007.
8. Baklanov A.V., Markushin A.N., Tsyganov N.E. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 3, pp. 13-18.
9. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniya* (Conversion of aviation gas turbine engines to land-based gas turbines), Samara, SNTs RAN, 2004, 266 p.
10. Mingazov B.G., Baklanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2016, no. 3, pp. 106-110.
11. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. et al. *Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Some issues of the design of aircraft gas turbine engines), Samara, SNTs RAN, 2002, 527 p.

12. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigatelei* (The combustion chamber of gas turbine engines), Kazan', Izd-vo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2004, 220 p.
13. Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov Yu.L. et al. *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Design of aircraft gas turbine engines), Samara, Izd-vo SNTs RAN, 2008, 620 p.
14. Markushin A.N., Baklanov A.V., Salimzyanova G.F. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 90-94.
15. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, vol. 107, pp. 24 – 37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
16. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, CRC Press, 2010, 537 p.
17. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
18. Isaev A.I., Mairovich Yu.I., Safarbakov A.M., Khodatskii S.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75583>
19. Bolkhovitin M.S., Borovikov D.A., Ionov A.V., Seliverstov S.D. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75612>
20. Isaev A.I., Skorobogatov S.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90175>

Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 20.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.

The article was submitted on 21.11.2021; approved after reviewing on 20.12.2021; accepted for publication on 21.02.2022.