

Труды МАИ. 2025. № 142
Trudy MAI. 2025. No. 142. (In Russ.)

Научная статья
УДК 622.691.4.052.012
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185104>
EDN: <https://www.elibrary.ru/PUWOGC>

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ И НЕОБХОДИМОГО РАСХОДА ПОПУТНОГО ГАЗА ПРИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

Андрей Владимирович Бакланов

Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева-КАИ,

Казань, Россия

andreybaklanov@bk.ru

Аннотация. В настоящее время вопросу рациональной утилизации попутного нефтяного газа уделено много внимания. Одним из решений данного вопроса является адаптация газотурбинного двигателя к работе на газах различного состава. В данной статье приводится схема двигателя НК-16СТ с генератором для выработки электрической энергии. Для анализа принят условный состав нескольких газов и выполнен расчет мощности двигателя. Произведена оценка того, на сколько требуется увеличить открытие дозатора газа по сравнению с открытием дозатора во время работы двигателя на природном газе. Также произведен расчет необходимого давления газа на входе в двигатель для обеспечения рассчитанной мощности.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, нефтяной газ, мощность, топливная система

Для цитирования: Бакланов А.В. Расчет параметров двигателя и необходимого расхода попутного газа при его использовании в качестве топлива // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185104>

Original article

CALCULATION OF ENGINE PARAMETERS AND REQUIRED CONSUMPTION OF ASSOCIATED GAS WHEN USING IT AS FUEL

Andrey V. Baklanov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI,
Kazan, Russia

andreybaklanov@bk.ru

Abstract. Solving the problem of environmental pollution is one of the most important tasks of mankind. The term "environment" usually refers to the natural environment surrounding humans. The results of studies by environmental scientists indicate that industrial waste has recently polluted such resources as air, water and soil. The main danger is atmospheric pollution. Polluted air has a harmful effect on humans, plants, animals, buildings and equipment. In this regard, the issue of rational utilization of associated petroleum gas has received much attention. One of the solutions to this issue is to adapt a gas turbine engine to run on gases of various compositions different from the composition of natural gas. This article provides a diagram of the NK-16ST engine with a generator for generating electric

current. A description of the features of the fuel system and metering device is provided. To assess the interchangeability of combustible gases (in this case, natural gas and associated petroleum gas) when burning in burner devices of combustion chambers without changing them, the higher or lower volumetric Wobbe number is used. However, this is not enough and in addition to the Wobbe index, it is necessary to evaluate the possibility of the fuel system, gas metering device and evaluate the engine parameters.

This paper presents the calculation of the Wobbe index for the gas composition under consideration. For the analysis, the conditional composition of several gases was adopted and the engine power was calculated.

The need to modify the fuel control equipment is determined by changing the opening of the gas metering device when the engine is running in a constant mode with fuel gas of different compositions. An assessment was made of how much the opening of the gas metering device needs to be increased compared to the opening of the metering device when the engine is running on natural gas. The required gas pressure at the engine inlet was also calculated to ensure the calculated power. The results of calculating the calorific value and consumption of associated gas used as fuel for the NK-16ST engine showed that in order to ensure the declared power of $N=16.4$ MW, it is necessary to increase the consumption of associated gas by 12...14% relative to the consumption of natural gas, which conditionally corresponds to a decrease in efficiency from $\eta^*=29\%$ to $\eta^*=26.5\%$.

Keywords: gas turbine engine, combustion chamber, petroleum gas, power, fuel system

For citation: Baklanov A.V. Calculation of engine parameters and required consumption of associated gas when using it as fuel. *Trudy MAI*. 2025. No. 142. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185104>

Введение

Решение проблемы загрязнения окружающей среды – одна из важнейших задач человечества. Под термином «окружающая среда» обычно понимается природная среда, окружающая человека. Особое место занимает биосфера – область распространения жизни на Земле, а именно верхняя часть земной коры, водоемов и нижняя часть атмосферы. Результаты исследований, ученых-экологов говорят, что отходами промышленности в последнее время загрязняются такие ресурсы как воздух, вода и почва. Главную опасность представляет загрязнение атмосферы. Загрязненный воздух оказывает вредное влияние на человека, растения, животных, здания, оборудование.

Во время осуществления нефтедобычи может образовываться попутный нефтяной газ. Поэтому многие нефтедобывающие фирмы с целью утилизации этого газа применяют его как топливо для газопроводного оборудования, которое приводит в движение электрогенератор и вырабатывает электроэнергию [1,2]. Схема такого газопроводного оборудования, которое реализует этот процесс, показана на рис.1.

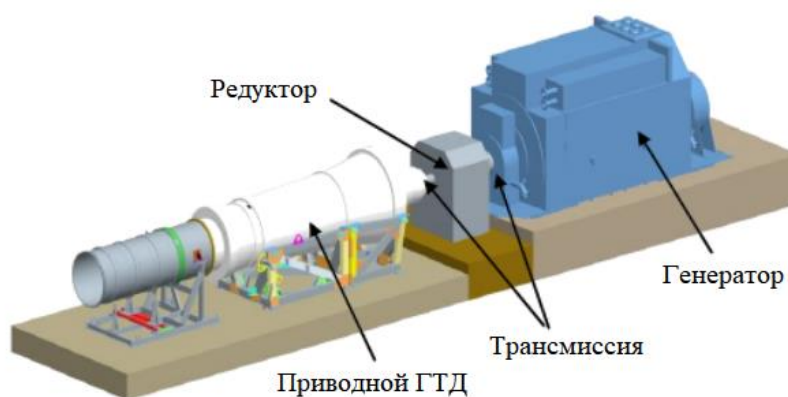


Рис. 1. Схема энергетической установки

Приводные ГТД, используемые в подобных установках, предназначены для работы на природном газе, поэтому при изменении состава газа на попутный нефтяной, необходимо оценить возможность работы камеры сгорания на новом топливе [3,4].

Основная часть

Для оценки возможности замены одних горючих газов на другие (в данном случае природного газа на попутный нефтяной газ) при сжигании в горелочных устройствах камер сгорания ГТД, без изменения их конструкции, используется высшее (W_v) или низшее (W_n) число Воббе [5], которые вычисляют по формуле:

$$W = \frac{Q}{\sqrt{\bar{\rho}}} , \quad (1)$$

где Q – объемная (высшая либо низшая) теплота сгорания, МДж/м³;

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{в}}} , \quad (2)$$

$\rho_{\Gamma}, \rho_{\text{в}}$ – плотность газообразного топлива и воздуха при стандартных атмосферных условиях ($t = 20^{\circ}\text{C}$, $p = 101.3$ кПа), кг/м³.

Однако, кроме определения числа Воббе, необходимо оценивать возможность работы топливной системы, дозатора газа и определить параметры двигателя в котором используется другой газ [6].

В настоящей работе для двигателя НК-16СТ, который служит приводом электрогенератора на электростанции, рассмотрена возможность использования в качестве топливного газа попутного нефтяного газа [7].

В отличие от природного в котором содержание метана составляет более 98%, рассмотренный попутный газ отличается повышенным содержанием азота и высших по отношению к метану углеводородов [8].

Компонентный состав, низшая теплота сгорания и объемный расход газа приведены в таблице 1.

Таблица 1. Состав попутного газа

№ п/п	Отбор этана, %	Компонентный состав (М, $\bar{V}$), г/моль; % объема					Объемный расход Q_{Σ} млн.м ³ /год	Низшая теплотворная способность при 20°C $H_{ув}$, ккал/м ³
		Азот N ₂	Метан CH ₄	Этан C ₂ H ₆	Пропан C ₃ H ₈	Прочие		
		28,02	16,04	30,07	44,09	-		
1	73	9,54	85,41	4,03	0,64	0,38	756,9	7820
2	80	8,19	88,41	2,76	0,50	0,22	901,3	7602
3	90	7,42	89,89	2,09	0,40	0,20	1010,1	7607
4	95	7,31	90,24	1,84	0,41	0,20	1001,8	7600

Согласно термодинамическому расчету двигателя НК-16СТ на режиме, соответствующем мощности на валу силовой турбины $N_{пр}=16,4$ МВт ($N_{пр}=16,4$ МВт на клеммах электрогенератора), расход топливного газа составляет: $G_{т.г.}=4245$ кг/ч.

Характеристики двигателя определяются с использованием параметров топливного газа расчетного состава. Для расчета приняты следующие значения параметров природного газа: объемная низшая теплота сгорания $H_{ув}=8100$ ккал/м³; плотность при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$ и давлении $P=760$ мм.рт.ст., $\rho_{20}=0,68$ кг/м³; массовая низшая теплота сгорания: $H_{у.г.}=H_{ув}/\rho_{20}=11912$ ккал/кг.

Расчет необходимого расхода попутного газа для обеспечения работы двигателя НК-16СТ на режиме $N_{пр}=16,4$ МВт ($t_{вх}=15^{\circ}\text{C}$; $P_{н}=760$ мм.рт.ст.) проводится в предложенном порядке [9].

Находится плотность газа при температуре $t=0^{\circ}\text{C}$.

$$\rho_0 = \frac{\sum M_i \cdot \bar{V}_i}{22,4 \cdot 100\%} = \frac{28,02\bar{V}_{N_2} + 16,04\bar{V}_{CH_4} + 30,07\bar{V}_{C_2H_6} + 44,09\bar{V}_{C_3H_8}}{22,4 \cdot 100} \quad (3)$$

где M_i (г/моль)-молекулярный вес компонентов газа; $\bar{V}_i$ (%) - процентное содержание от общего объема (таблица 1); 22,4 л/моль – объем одного моля газа при температуре $t=0^{\circ}\text{C}$ и давлении $P=760$ мм.рт.ст [10,11];

Плотность газа при температуре $t=20^{\circ}\text{C}$.

$$\rho_{20} = \rho_0 \cdot 273/293 \quad (4)$$

Массовая теплотворная способность попутного газа (таблица 1):

$$Hu_{т.г.} = Hu_v / \rho_{20} \quad (5)$$

где Hu_v — теплотворная способность 1м³ газа при температуре 20^oC.

Расход попутного газа, необходимый для обеспечения мощности двигателя $N_{пр}=16,4$ МВт.

$$G_{п.г.} = G_{т.г.} \cdot Hu_{т.г.} / Hu_{п.г.} = 4245 \text{ кг/ч} \cdot 11912 \text{ ккал/кг} / Hu_{п.г.} \quad (6)$$

Общий объемный и массовый расход попутного газа:

$$Q_{п.г. \Sigma} (\text{м}^3/\text{ч}) = Q_{\Sigma} (\text{млн. м}^3/\text{год}) \cdot 10^6 / 365 \cdot 24; \quad (7)$$

$$Q_{п.г. \Sigma} (\text{кг/ч}) = Q_{п.г. \Sigma} (\text{м}^3/\text{ч}) \cdot \rho_{20} \quad (8)$$

Запас по расходу газа при работе одного двигателя НК-16СТ [12]:

$$n = G_{п.г. \Sigma} / G_{п.г.} \quad (9)$$

Необходимость доработки топливотрегулирующей аппаратуры определяется по изменению открытия дозатора газа (ДУС) при работе двигателя на постоянном режиме с топливным газом различного состава [13,14].

$$\bar{F}_{дус} = F_{дусп.г.} / F_{дуст.г.} = \frac{G_{н.г.} \cdot P_{т.г.20}}{G_{т.г.} \cdot P_{н/г.20}} = \frac{G_{н.г.} \cdot 0,68 \text{ кг/м}^3}{4245 \text{ кг/ч} \cdot P_{н.г.20}} \quad (10)$$

где $F_{дуст.г.}$ - площадь проходного дозирующего отверстия дозатора газа при работе двигателя на топливном газе расчетного состава газе; $F_{дусп.г.}$ - площадь проходного дозирующего отверстия при работе двигателя на попутном газе различного состава [15];

Результаты расчета расхода попутного газа при использовании его в качестве топливного газа для работы двигателя НК-16СТ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры попутного газа

№ п/п	ρ_0 кг/м ³	ρ_{20} кг/м ³	$H_{унг}$	$G_{нг}$	Q_{Σ}	G_{Σ}	n	$\bar{F}_{дус}$
1	0,7976	0,7432	10522	4806	86404	64215	13,4	1,036
2	0,7814	0,7281	10442	4843	102888	74913	15,5	1,066
3	0,7724	0,7197	10570	4784	115308	82987	17,3	1,053
4	0,7704	0,7178	10588	4776	114361	82088	17,2	1,066

Согласно расчета (таблица 2) для работы двигателя НК-16СТ на режиме $N_{пр}=16,4$ МВт в зависимости от состава попутного газа требуется расход $G_r=4776...4843$ кг/ч вместо $G_{т.г}=4245$ кг/ч при работе двигателя на природном газе расчетного состава [16,17]. Увеличение расхода газа состава 1-4 составляет 12...14%.

При работе двигателя на попутном газе рассмотренного состава требуется незначительное увеличение открытия дозатора газа ($\bar{F}_{дус} = 1,036...1,066$) по сравнению с работой двигателя на природном газе. С учетом запаса по пропускной способности дозатора газа, доработки топливорегулирующей аппаратуры не требуется [18,19]. Вопрос необходимости доработки камеры сгорания требует отдельных расчетов [20].

Запас по количеству попутного газа позволяет для предложенных условий обеспечить работу порядка 15...17 двигателей НК-16СТ. [21,22].

Выводы

Результаты расчета теплотворной способности и расхода попутного газа, используемого в качестве топливного для двигателя НК-16СТ показали:

1) Для обеспечения заявленной мощности $N_{пр}=16,4$ МВт необходимо увеличить расход попутного газа на 12...14% относительно расхода природного газа ($G_n=4245$ кг/час), используемого в ГТЭ-16 и ГПА-Ц-16, что условно соответствует уменьшению КПД с $\eta^*_{пр}=29\%$ до $\eta^*_{пр}=26,5\%$.

2) Основные параметры двигателя НК-16СТ при работе на попутном газе не изменяются, за исключением расхода топливного газа.

3) Пропускная способность топливорегулирующей аппаратуры двигателя НК-16СТ обеспечивает работу двигателя с повышенным расходом газа.

Список источников

1. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, Progress in Astronautics and Aeronautics. V. 210, AIAA, Reston, VA, 2005. 657 p.
2. Ashwani K. Gupta, D. G. Lilley, Nick Syred. Swirl Flows: Energy and engineering science series. Abacus Press, 1984, 475 p.
3. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1996. V. 118, No. 2. P. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)

4. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1984. V. 107, P. 24-37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
5. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. - Самара: СНЦ РАН, 2004. – 266 с.
6. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. - Самара: СНЦ РАН, 2002. – 527 с.
7. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения: технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1996.
8. ГОСТ 31369-2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. – Москва: Изд-во стандартов, 2008.
9. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях для энергетических установок // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 82–93. DOI: [10.31772/2712-8970-2021-22-1-82-93](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-1-82-93)
10. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010. 560 p.
11. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 620 с.

12. Бакланов А.В., Неумоин С.П. Возможность использования коксового газа в конвертированных газотурбинных установках электро- и компрессорных станций // Газовая промышленность. 2019. № 3 (781). С. 84–91.
13. Бакланов А.В., Неумоин С.П., Маркушин А.Н. Оценка возможных режимов работы ГТУ НК-16СТ при использовании в качестве топлива попутного нефтяного газа // Газовая промышленность. 2017. № 5 (758). С. 80.
14. Бакланов А.В. Поэтапная доводка камеры сгорания газотурбинного двигателя, работающей в условиях форсирования скорости воздуха на выходе из компрессора // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, № 3. С. 13–22.
15. Бакланов А.В. Влияние изменения конструкции камеры сгорания на уровень концентрации CO₂ в выхлопных газах газотурбинного двигателя НК-16СТ // Газовая промышленность. 2022. № 6 (834). С. 80–88.
16. 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. V. 130. DOI: [10.1115/1.2771243](https://doi.org/10.1115/1.2771243)
17. Harrison W.E., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative— Military Fuels Produced from Coal. Presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
18. 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. V. 131, No. 4. DOI: [10.1115/1.3028234](https://doi.org/10.1115/1.3028234)
19. Schluter J., Schonfeld T., Poinso T., Kreds W., Hoffmann S. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations // ASME Turbo Expo. 2001. DOI: [10.1115/2001-GT-0060](https://doi.org/10.1115/2001-GT-0060)

20. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67495>
21. Силуянова М.В., Челебян О.Г. Применение альтернативных топлив в авиационных газотурбинных двигателях // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69695>
22. Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Статистический анализ влияния размерности на параметры камер сгорания ГТД // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=23770>

References

1. Lieuwen T.C., Yang V. *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, Progress in Astronautics and Aeronautics*. V. 210, AIAA, Reston, VA, 2005. 657 p.
2. Ashwani K. Gupta, D. G. Lilley, Nick Syred. *Swirl Flows: Energy and engineering science series*. Abacus Press, 1984, 475 r.
3. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1996. V. 118, No. 2. P. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
4. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1984. V. 107, P. 24-37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
5. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. et al. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniya* (Conversion of aviation gas

turbine engines into ground-based gas turbine units). Samara: SNTS RAN Publ., 2004. 266 p.

6. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. et al. *Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Some design issues of aviation gas turbine engines). Samara: SNTS RAN Publ., 2002. 527 p.

7. GOST 5542-87. *Gazy goryuchie prirodnye dlya promyshlennogo i kommunal'nobytovogo naznacheniya: tekhnicheskie usloviya* (GOST 5542-87. Natural combustible gases for industrial and municipal purposes: technical specifications). Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1996.

8. GOST 31369-2008. *Gaz prirodnyi. Vychislenie teploty sgoraniya, plotnosti, otnositel'noi plotnosti i chisla Vobbe na osnove komponentnogo sostava* (GOST 31369-2008. Natural gas. Calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe number based on the component composition). Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2008.

9. Baklanov A.V. The possibility of using methane-hydrogen fuel in converted gas turbine engines for power plants. *Sibirskii aerokosmicheskii zhurnal*. 2021. V. 22, No 1. P. 82–93. (In Russ.). DOI: [10.31772/2712-8970-2021-22-1-82-93](https://doi.org/10.31772/2712-8970-2021-22-1-82-93)

10. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010. 560 p.

11. Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov YU.L. et al. *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Design of aviation gas turbine engines). Samara: Izd-vo SNTS RAN Publ., 2008. 620 p.

12. Baklanov A.V., Neumoin S.P. The possibility of using coke oven gas in converted gas turbine installations of electric and compressor stations. *Gazovaya promyshlennost'*. 2019. No. 3 (781). P. 84–91. (In Russ.)
13. Baklanov A.V., Neumoin S.P., Markushin A.N. Assessment of possible modes of operation of GTU NK-16ST when using associated petroleum gas as fuel. *Gazovaya promyshlennost'*. 2017. No. 5 (758). P. 80. (In Russ.)
14. Baklanov A.V. Step-by-step refinement of the combustion chamber of a gas turbine engine operating under conditions of forcing the air velocity at the outlet of the compressor. *Aerospace MAI Journal*. 2017. V. 24, No. 3. P. 13–22. (In Russ.)
15. Baklanov A.V. The influence of a change in the design of the combustion chamber on the concentration of CO₂ in the exhaust gases of the NK-16ST gas turbine engine. *Gazovaya promyshlennost'*. 2022. No. 6 (834). P. 80–88. (In Russ.)
16. Lieuwen T., McDonellV., 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. V. 130. DOI: [10.1115/1.2771243](https://doi.org/10.1115/1.2771243)
17. Harrison W.E., Zabarnick S. *The OSD Assured Fuels Initiative— Military Fuels Produced from Coal*. Presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
18. 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. V. 131, No. 4. DOI: [10.1115/1.3028234](https://doi.org/10.1115/1.3028234)
19. Schluter J., Schonfeld T., Poinso T., Kreds W., Hoffmann S. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations. *ASME Turbo Expo*. 2001. DOI: [10.1115/2001-GT-0060](https://doi.org/10.1115/2001-GT-0060)

20. Metechko L.B., Tikhonov A.I., Sorokin A.E., Novikov S.V. The influence of environmental standards on the development of aviation engine building. *Trudy MAI*. 2016. No. 85. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67495>
21. Siluyanov M.V., Chelebyan O.G. The use of alternative fuels in aviation gas turbine engines. *Trudy MAI*. 2016. No. 87. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69695>
22. Lanskii A.M., Lukachev S.V., Matveev S.G. Statistical analysis of the effect of dimension on the parameters of GTE combustion chambers. *Trudy MAI*. 2010. No. 41. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=23770>

Статья поступила в редакцию 11.02.2025

Одобрена после рецензирования 10.03.2025

Принята к публикации 25.06.2025

The article was submitted on 11.02.2025; approved after reviewing on 10.03.2025; accepted for publication on 25.06.2025