

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья
УДК 621.43.056

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183455>

EDN: <https://www.elibrary.ru/NPMLIR>

ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ ТОПЛИВА С ВОЗДУХОМ В ФОРСУНКАХ СО СТРУЙНОЙ И ЗАКРУЧЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ТОПЛИВА

Андрей Владимирович Бакланов

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»,

Казань, Россия

andreybaklanov@bk.ru

Аннотация. Качество смешения газообразного топлива с воздухом является одними из основных параметров, определяющих эффективность сжигания топливновоздушной смеси в камере сгорания авиапроизводного ГТД. В данной статье рассматривается влияние способа подачи топлива в форсунке на процессы смешения в закрученной струе. Представлена стендовая установка, предназначенная для испытания форсунок по определению смешения топлива с воздухом. Приводятся исходные данные для проведения испытаний. Получены результаты смешения топлива с воздухом двух форсунок. Проведен анализ, по результатам которого сделаны выводы о механизме смешения струйной форсунки и форсунки с подачей закрученной топливной струи [1-4].

Ключевые слова: камера сгорания, газотурбинный двигатель, форсунка, топливо, смешение

Для цитирования: Бакланов А.В. Исследование смешения топлива с воздухом в форсунках со струйной и закрученной подачей топлива // Труды МАИ. 2024. № 139.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183455>

Original article

RESEARCH OF MIXTURE OF FUEL WITH AIR IN NOZZLES WITH THE JET AND TWIRLED FUEL SUPPLY

Andrey V. Baklanov

Joint Stock Company Kazan Motor Production Association,

Kazan, Russia

andreybaklanov@bk.ru

Abstract. Mixture of gaseous fuel with air is key parameter. It defines efficiency of combustion of mix of fuel and air in the combustion chamber of the gas-turbine engine. In this article influence of a way of supply of fuel on processes of mixture in the twirled stream is considered. Two nozzles were investigated. The first nozzle, contains a swirler. Shovels are established at an angle 45 degrees. The nozzle also contains the mixing plug. The nozzle case the containing internal channel in which the jet spray is installed. The second nozzle differs from the first in the fact that the screw is installed in the internal channel of the case of a nozzle. It gives the twirled fuel stream to the mixing plug bench

installation which is intended for test of nozzles Is presented. Tests are carried out by definition of mixture of fuel with air. As imitation of fuel gas CO₂ carbon dioxide is used. Basic data for carrying out tests are given. Measurements of CO₂ in streams of a torch are directed to definition of the field of concentration. It allows to track the rate of change of concentration along a stream axis.

For representation of intensity of process of mixture characteristics of CO₂ = are provided by $f(r)$. They display change of concentration on stream section at the exit from nozzles.

Results of mixture of fuel with air of two nozzles are received. The analysis by results of which conclusions are drawn on the mechanism of mixture of a nozzle with the jet spray and nozzles with the centrifugal spray is carried out.

Keywords: combustion chamber, gas turbine engine, injector, fuel, mixing

For citation: Baklanov A.V. Research of mixture of fuel with air in nozzles with the jet and twirled fuel supply. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183455>

В данной работе исследовалось влияние конструкции форсунок на качество смешения топлива с воздухом. Были испытаны два типа форсунок различного конструктивного исполнения.

Первая из исследуемых форсунок, содержит корпус включающий лопаточный завихритель с лопатками, установленными под углом 45 градусов. В состав так же входит смесительная втулка и корпус форсунки содержащий внутренний канал с установленным в него струйным распылителем (рис.2а).

Вторая форсунка отличается от первой тем, что во внутренний канал корпуса установлен шнек (рис.2б), который подает в смесительную втулку закрученную топливную струю [5-10].

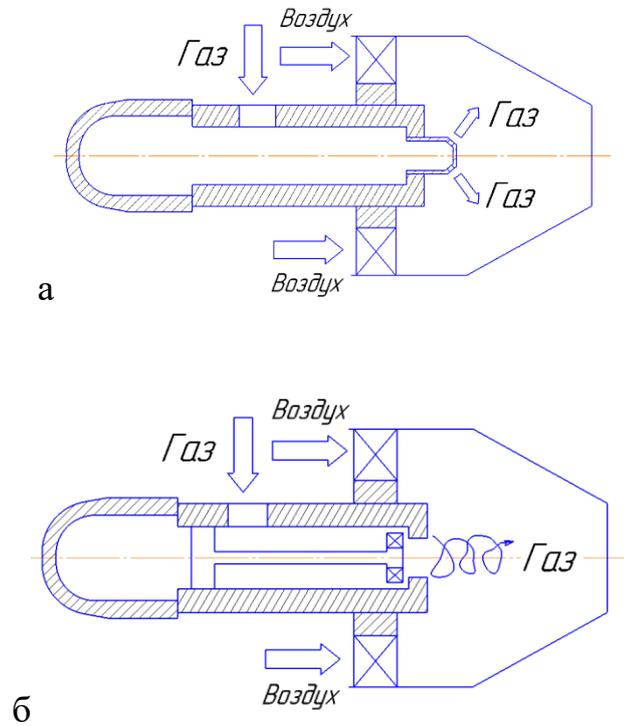


Рис.1. Схема форсунки а) струйная форсунка СГФ б) форсунка с подачей закрученной топливной струи ЦБГФ





Рис. 2 Фото форсунки а) Струйная форсунка СГФ б) форсунка с подачей закрученной топливной струи ЦБГФ

Эксперименты по исследованию смешения проводились на стенде (рис.3), который оборудован тремя системами. Первая система подвода воздуха, вторая подвода газа и третья система измерения. Для определения давления перед форсункой устанавливается трубка Пито, подключаемая к манометру. Газ к форсунке подводится от баллонной рампы. В качестве газа для проведения эксперимента используется углекислый газ CO_2 . Для измерения полей концентрации углекислого газа на выходе из форсунки установлено координатное устройство с приемником газоанализатора ПКУ-4-МК-С. Это устройство позволяет перемещать приемник газоанализатора в осевом и радиальном направлении. Измерения концентрации производятся от центра форсунки, за который принята ось форсунки «0», с дальнейшим перемещением пробоотборника в обе стороны вдоль сопла горелки, поперек струи через каждые 4 мм. По данному принципу измерения повторно производятся в шести сечениях: на срезе сопла и через каждые 30 мм до расстояния 180 мм [11].

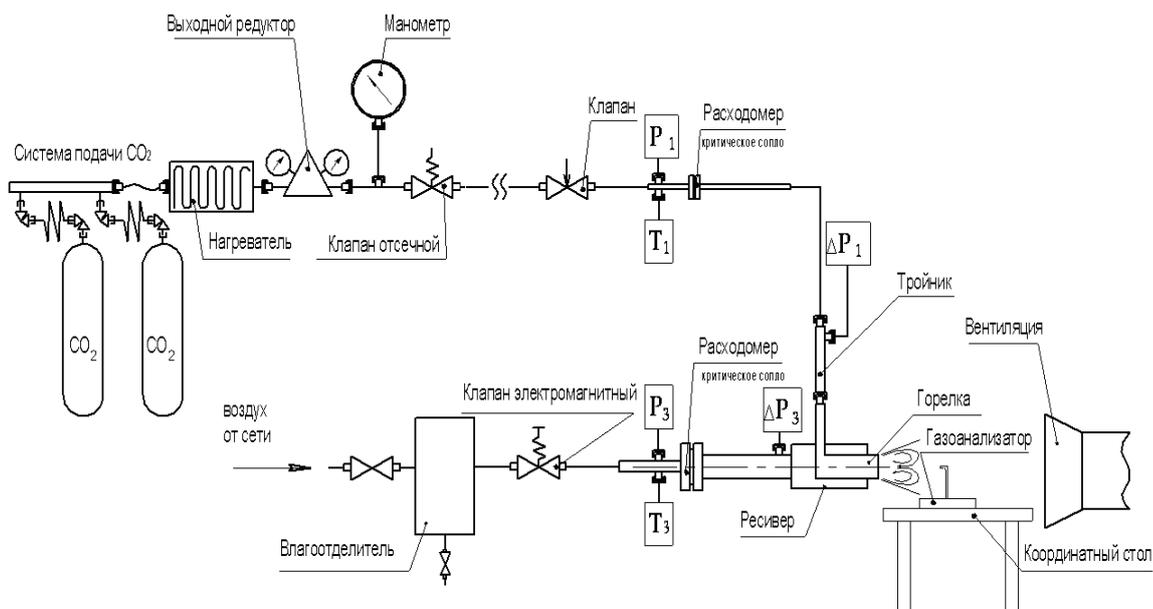


Рис.3. Принципиальная схема стенда.

Измерения концентраций CO_2 в закрученной топливновоздушной струе проводилось для определения расстояния, на котором происходит выравнивание поля концентрации, что позволяет зафиксировать темп изменения уровня концентраций вдоль оси струи.

Для наглядного представления интенсивности процесса смешения на рис. 4 приведены характеристики $\text{CO}_2 = f(r)$, более детально отражающие изменение концентрации по сечению закрученной струи распространяемой за форсункой.

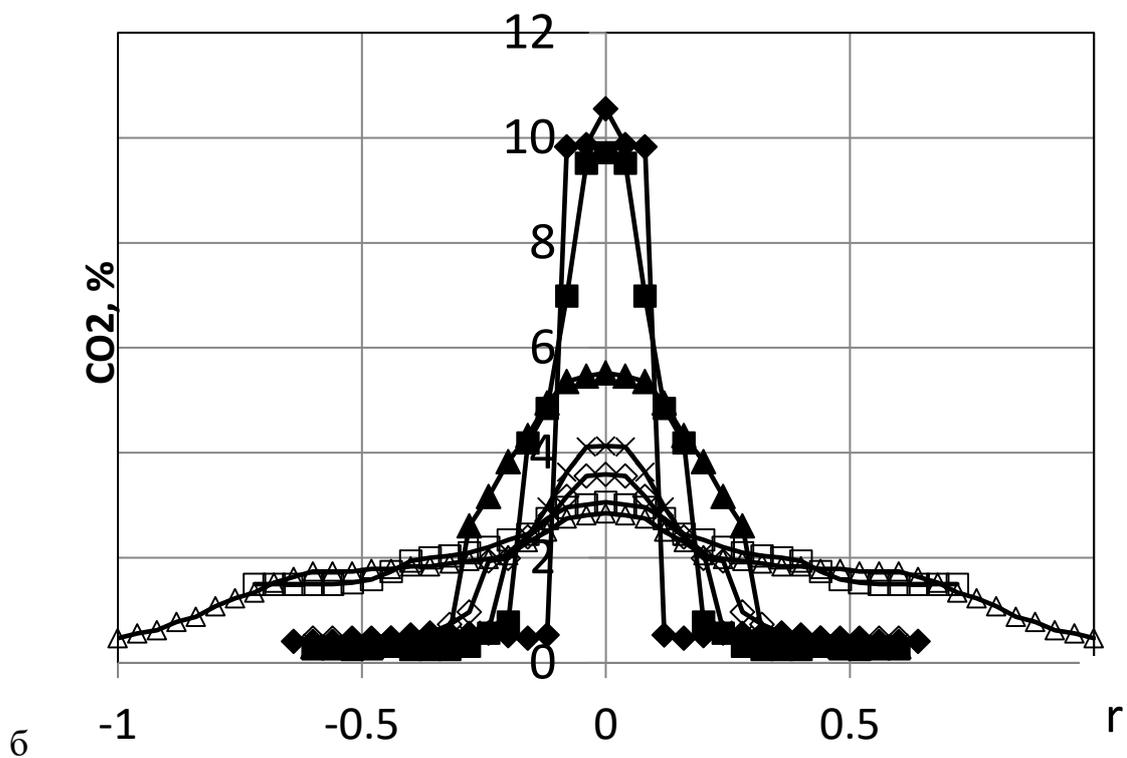
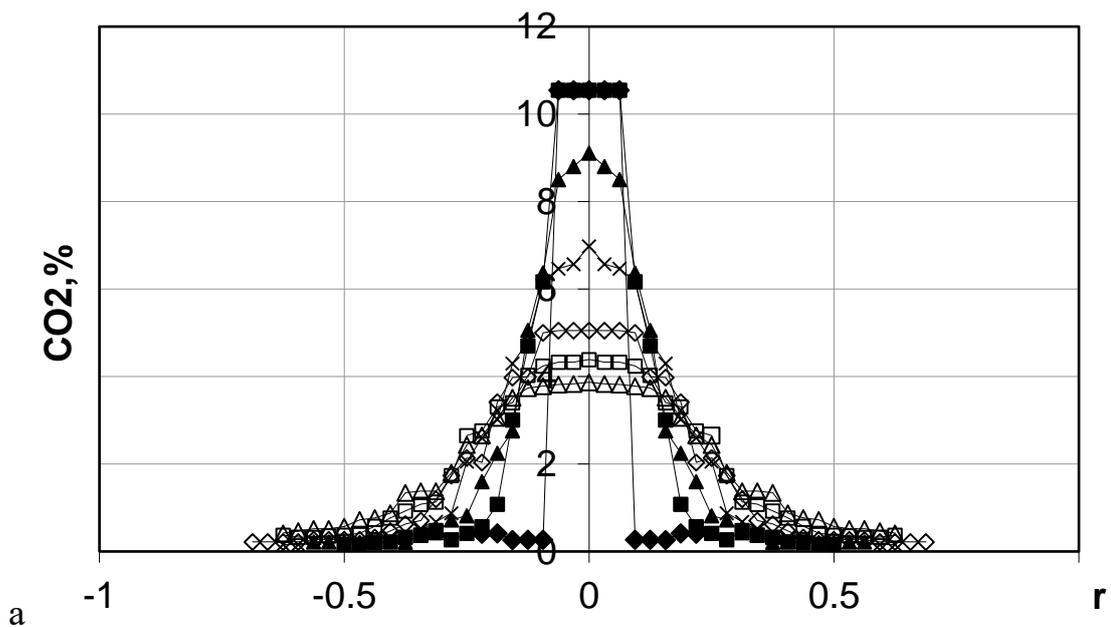


Рис.4 Поле концентраций CO_2 в различных сечениях закрученной струи

◆- срез сопла; ■- 30мм; ▲- 60мм; ×-90мм; ◇-120мм; □-150мм; Δ-180мм

а) ЦБГФ; б)- СГФ

За форсункой с СГФ, не происходит существенного расширения области смешения, что связано со струйной подачей топлива и формированием высокой

скорости истечения топливного газа и, приводящей к высокой эжекционной способности струи, которая формирует узкое ядро потока, в котором происходит интенсивное смешение топлива с воздухом. За пределами относительной координаты $\bar{r} = \frac{r_i}{r_{\max}}$ соответствующей значению 0,5 смешения не происходит, так как в этой области практически не попадает топливный газ [12-14].

Форсунка ЦБГФ имеет более широкое поле концентраций и низкий ее уровень, что объясняется медленным процессом смешения вследствие наличия закрученной подачи топлива.

Качество подготовки оценивалось при помощи зависимости, характеризующей максимальное относительное отклонение концентрации от среднеинтегрального значения поля концентраций [15]:

$$\bar{C} = \frac{C_{\max} - C_{cp}}{C_{cp}} \quad (6)$$

где C_{\max} - максимальное значение в поле измеренной концентрации,

C_{cp} - среднеинтегральное значение концентрации.

В соответствии зависимостью (6), показателем идеально перемешанной концентрации топливовоздушной смеси в сечении, является значение $\bar{C} = 0$.

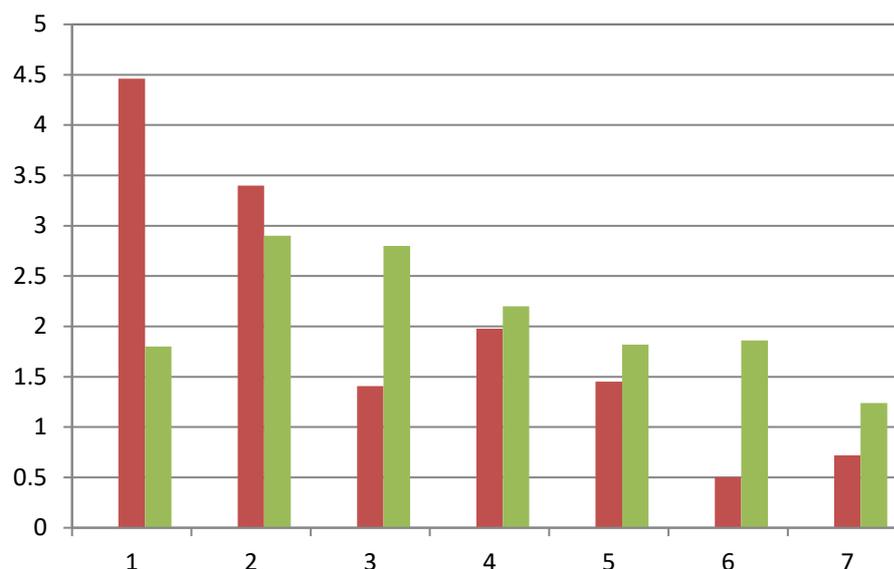


Рис.5. Сравнение качества подготовки топливовоздушной смеси в закрученной струе форсунок

■ - форсунка с ЦБГФ; ■ - форсунка с СГФ

Из рис.5 видно, что наилучшее качество смешения в первых двух сечениях наблюдается у форсунки СГФ, затем с третьего по седьмое сечение качество смешения лучше у форсунки ЦБГФ. Это связано с тем, что закрученная струя газа не сразу начинает взаимодействовать с воздухом и смешиваться с удалением от сопла на расстоянии, соответствующем третьему сечению.

Выводы

Проведенные измерения полей концентрации за форсунками подтвердили, что процесс смешения достигается у форсунки с СГФ за счет струйной подачи топлива в зону рециркуляции, а у форсунки с ЦБГФ вследствие высокой эжекционной

способности закрученной струи топлива внутри закрученной в противоположную сторону струи воздуха [16-20].

Список источников

1. Башарина Т.А., Шматов Д.П., Глебов С.Е., Акользин И.В. Исследование струйно-центробежной форсунки спринклерной системы атомной электростанции методом вычислительного эксперимента на основе математической модели с учетом дисперсности среды // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>
2. 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.
3. Moses C., Roets P. Properties, Characteristics and Combustion Performance of Sasol Fully Synthetic Jet Fuel // 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)
4. Schluter J., Schönfeld T., Poinot 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)
5. Ashwani K., Gupta A.K., Lilley D.G., Syred Nick. Swirl Flows. Energy and engineering science series, Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
6. Bishop C.K., Allan D.W. Effects of Fuel Nozzle Condition on Gas Turbine Combustion Chamber Exit Temperature Distributions // Proceedings of ASME Turbo Expo, 2010, vol. 43970, pp. 1147-1157. DOI: [10.1115/GT2010-23441](https://doi.org/10.1115/GT2010-23441)

7. 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, vol. 118, no. 2, pp. 308-315. DOI: [10.1115/1.2816592](https://doi.org/10.1115/1.2816592)
8. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, vol. 107, no. 1, pp. 24-37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
9. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. 2013. № 3-1. С. 131-138.
10. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Результаты испытаний закоксованных форсунок камер сгорания семейства НК промывкой смесью керосина с техническим моющим средством // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91839>
11. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М. Бакланов А.В. Организация низкоэмиссионного горения в кольцевой камере сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 3. С. 50-53.
12. Kiewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2007, vol. 129, no. 4, pp. 929–936. DOI: [10.1115/1.2747259](https://doi.org/10.1115/1.2747259)
13. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines // Progress in Astronautics and Aeronautics, 2005, vol. 210, pp. 657. DOI: [10.2514/4.866807](https://doi.org/10.2514/4.866807)

14. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, 3rd ed., CRC Press, 2010, 537 pp.
15. Данильченко В.П., Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л. и др. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. – 620 с.
16. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S. et al. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation // *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, no. 8, pp. 2038-2053. DOI: [10.1016/j.combustflame.2014.01.024](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.01.024)
17. Taylor S.C. Burning velocity and the influence of flame stretch. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991. URL: <http://etheses.whiterose.ac.uk/2099/>
18. Yi T., Gutmark E.J. Real-time prediction of incipient lean blowout in gas turbine combustors // *AIAA Journal*, 2007, vol. 45, no. 7, pp. 1734-1739. DOI: [10.2514/1.25847](https://doi.org/10.2514/1.25847)
19. 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>
20. 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.

References

1. Basharina T.A., Shmatov D.P., Glebov S.E., Akol'zin I.V. Investigation of jet-centrifugal nozzle of nuclear power plant sprinkler system by computational experiment with consideration of mathematical model of medium dispersibility. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176844>

2. 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.
3. Moses C., Roets P. Properties, Characteristics and Combustion Performance of Sasol Fully Synthetic Jet Fuel. *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)
4. Schluter J., Schönfeld 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)
5. Ashwani K., Gupta A.K., Lilley D.G., Syred Nick. *Swirl Flows. Energy and engineering science series*. Abacus Press, 1984, 475 p. DOI: [10.1016/0010-2180\(86\)90133-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90133-1)
6. Bishop C.K., Allan D.W. Effects of Fuel Nozzle Condition on Gas Turbine Combustion Chamber Exit Temperature Distributions. *Proceedings of ASME Turbo Expo*. 2010. V. 43970, P. 1147-1157. DOI: [10.1115/GT2010-23441](https://doi.org/10.1115/GT2010-23441)
7. 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)
8. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1985. V. 107, No. 1. P. 24-37. DOI: [10.1115/1.3239693](https://doi.org/10.1115/1.3239693)
9. Markushin A.N., Baklanov A.V. Testing stands for researching the processes and maturation of low emission combustors. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo*

aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva. 2013. No. 3-1. P. 131-138.

(In Russ.)

10. Markushin A.N., Baklanov A.V. The examinations of nozzle carburizing for NK's combustion chamber by kerosene flushing with liquid technical detergent. *Trudy MAI*. 2018. No. 99. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91839>

11. Markushin A.N., Merkushin V.K., Byshin V.M. Baklanov A.V. Improvement of conventional combustion chamber structure in order to enhance GTE ecological indicators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2009. No. 3. P. 50-53. (In Russ.)

12. Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. V. 129, No. 4. P. 929–936. DOI: [10.1115/1.2747259](https://doi.org/10.1115/1.2747259)

13. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. 2005. V. 210, P. 657. DOI: [10.2514/4.866807](https://doi.org/10.2514/4.866807)

14. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, 3rd ed., CRC Press, 2010, 537 p.

15. Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Kovylov Yu.L. et al. *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Design of aircraft gas turbine engines). Samara: SNTs RAN Publ., 2008. 620 p.

16. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S. et al. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation. *Combustion and Flame*. 2014. V. 161, No. 8. P. 2038-2053. DOI: [10.1016/j.combustflame.2014.01.024](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.01.024)

17. Taylor S.C. *Burning velocity and the influence of flame stretch*. Ph.D. Thesis. University of Leeds, 1991. URL: <http://etheses.whiterose.ac.uk/2099/>
18. Yi T., Gutmark E.J. Real-time prediction of incipient lean blowout in gas turbine combustors. *AIAA Journal*. 2007. V. 45. No. 7. P. 1734-1739. DOI: [10.2514/1.25847](https://doi.org/10.2514/1.25847)
19. Metechko L.B., Tikhonov A.I., Sorokin A.E., Novikov S.V. The Influence of Environmental Norms on the Development of Aviation Engine-Building. *Trudy MAI*. 2016. No. 85. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67495>
20. Baklanov A.V. Stepwise gas turbine engine combustion chamber development in conditions of air velocity forcing at compressor outlet. *Aerospace MAI Journal*. 2017. V. 24, No. 3. P. 13-22. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 27.09.2024

Одобрена после рецензирования 01.10.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 27.09.2024; approved after reviewing on 01.10.2024; accepted for publication on 25.12.2024