

Труды МАИ. 2025. № 144
Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.)

МЕХАНИКА

Научная статья
УДК 621.43.056
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186305>
EDN: <https://www.elibrary.ru/PBTYNN>

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА НА ВЫБРОСЫ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОДНОФОРСУНОЧНОГО ОТСЕКА

Андрей Владимирович Бакланов

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

Казань, Россия

andreybaklanov@bk.ru

Аннотация. За последнее десятилетие число публикаций по эмиссии токсичных веществ различных горелочных устройств исчисляется сотнями. В основном эти исследования направлены на установление количественных показателей эмиссии различных горелочных устройств, а также на эмпирическое выявление возможности выбора условий горения, которые обеспечили бы максимальную эффективность при минимальном образовании загрязняющих веществ. При этом результаты осмыслены, руководствуясь общими соображениями и качественным пониманием характера основных процессов. Чтобы встать на более твердую научную основу, необходимы не только фундаментальное понимание многих физических процессов, но и детальные количественные данные об этих процессах. Вследствие сложности

процессов горения такой уровень пока не достигнут. Разумной альтернативой является опора на экспериментальные исследования, которые позволили бы с достаточной для практики точностью определить закономерности реальных процессов в камерах сгорания, пригодные для простого инженерного анализа.[1-4].

Ключевые слова: камера сгорания; газотурбинный двигатель, форсунка, выбросы токсичных веществ, подача топлива.

Для цитирования: Бакланов А.В. Влияние способа подачи газообразного топлива на выбросы токсичных веществ из однофорсуночного отсека // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186305>

MECHANICS

Original article

INFLUENCE OF THE METHOD OF GAS FUEL SUPPLY ON EMISSIONS OF TOXIC SUBSTANCES FROM A SINGLE-NOZZLE COMPARTMENT

Andrey V. Baklanov

andreybaklanov@bk.ru

Abstract. One of the main parameters that characterize the efficiency of the combustion process in the combustion chambers is the concentration level of harmful substances in the combustion products.

This article considers the influence of the fuel delivery method implemented in the nozzle on the change of the parameter presented above.

The paper presents the design features of injectors that work with a separate supply of air and fuel. Natural gas is used as fuel. One of the considered injectors provides jet fuel supply by means of a perforated spray, and the other provides twisted fuel supply by means of a swirler built into the fuel channel. The main geometric parameters of the injectors are also given, such as the size of the swirler, the number of blades, and the diameter of the output nozzle.

The design of a heat pipe simulator, in which the tested nozzle is placed, is considered. The design of a bench installation designed for testing injectors in a heat pipe simulator, as well as the modes under which these tests were carried out, is presented. The results were obtained in a heat pipe simulator with installed jet injectors and injectors with a swirling fuel jet. An analysis was conducted, which resulted in conclusions about the effectiveness of the use of jet injectors. According to the conducted research, the parameters of the nozzle with a swirling fuel jet are characterized by the presence of high values of CO and CH levels in the combustion products, which is explained by the extremely low quality of mixing fuel with air and, consequently, low efficiency of fuel combustion. Jet fuel injection has low CO and CH values, which indicates a good quality of fuel mixing with air and high efficiency of combustion organization. As a result, we have received recommendations on setting the selected type of injectors in a full-size combustion chamber.

Keywords: combustion chamber, gas turbine engine, injector, toxic emissions, fuel supply.

For citation: Baklanov A.V Influence of the method of gas fuel supply on emissions of toxic substances from a single-nozzle compartment // Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.)

<https://trudymai.ru/published.php?ID=186305>

Введение

В данной работе исследовалось влияние конструкции форсунок на образование в продуктах сгорания вредных веществ. Были испытаны два вида форсунок различного конструктивного исполнения.

Рассматриваемая топливовоздушная форсунка, содержит корпус завихрителя включающего лопаточный завихритель с установленными под углом 45 градусов лопатками, смесительную втулку, корпус форсунки содержащий внутренний канал с установленным в него струйным распылителем (рис.2а). Форсунка №2 отличается от первой тем, во внутренний канал корпуса форсунки установлен завихритель, (рис.2б) который подает в смесительную втулку закрученную топливную струю [5].

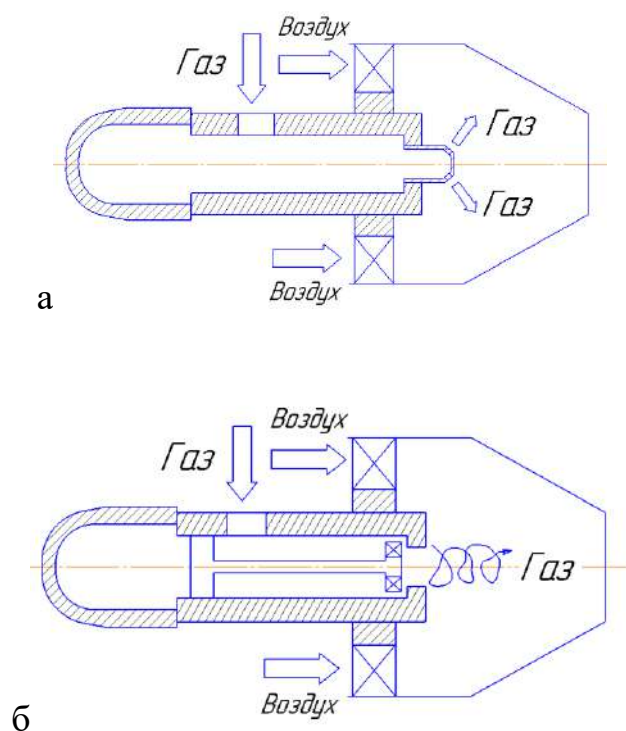


Рис.1. Схема форсунки а) Струйная форсунка б) форсунка с подачей закрученной топливной струи

Форсунки испытывались на стенде (рис. 2) который включает в себя 1 – электромагнитный клапан; 2 – нагреватель; 3 – ресивер; 4 – форсунка; 5 – воспламенитель; 6 – газоанализатор; 7 – координатный стол; 8 – тройник; 9,11 – расходомеры; 10 – клапан; ΔT_3 – датчик перепада температур на входе в стенд и после нагревателя T_1 – датчики абсолютного давления и температуры газа, установленные перед расходомером (критическим соплом); Δp_1 – датчик измерения перепада давления газовой магистрали; p_3 , T_3 – датчики абсолютного давления и температуры воздуха, установленные перед расходомером; Δp_3 – датчик измерения перепада давления воздуха, установленный перед ресивером. Работа стенда осуществляется следующим образом. Воздух от нагнетателя поступает на вход в расходомер, представляющий собой цилиндрический канал с установленным в нем критическим соплом. Далее воздух поступает в нагреватель, представляющий собой электрическую печь, а затем по трубопроводной магистрали транспортируется к форсунке установленной в ресивер. Топливо подается по топливной магистрали в каналы форсунки, так же проходя через расходомер [6,7].

Стенд оборудован необходимыми системами регулирования, измерения параметров и их регистрации [8-11].

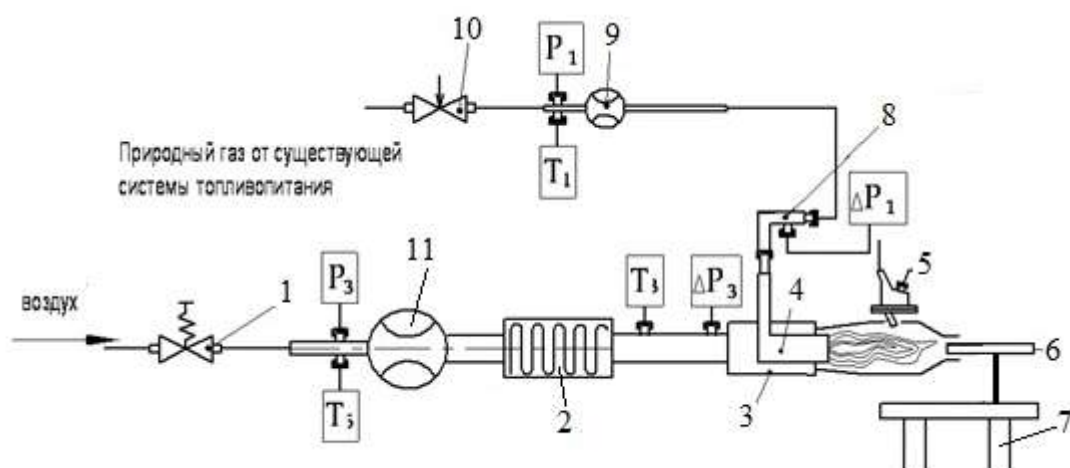


Рис.2. Стенд для проведения газодинамических и огневых испытаний горелок.

Для измерения концентраций CO, NO и CH в продуктах сгорания использовался газоанализатор Testo 350. Для осуществления отбора проб используется пробоотборник который устанавливается на координатном столе и перемещается в заданных координатах вдоль оси форсунки [12-15].

Однофорсуночный отсек (Рис.2) состоит из диффузора (1) с установленным приемником давления (2) и термопреобразователем сопротивления (3). Жаровая труба (4) цилиндрической формы с отверстиями (5) для подвода воздуха в зону горения и смешения. Корпус отсека (6) является силовым элементом, к которому подсоединяется диффузор и фронтальная плита (7). Фронтальное устройство выполнено в виде крышки с нанесенным фигурным окном (8), в которое устанавливается форсунка. Окно необходимо для подвода воздуха к завихрителю форсунки. Также во фронтальном устройстве имеются дугообразные кольцевые прорезы (9) для подвода воздуха в кольцевой промежуток между корпусом отсека и жаровой трубой. Топливо при помощи штуцера (10) подается в топливный канал во фронтальном устройстве

подводящем топливе к форсунке. Розжиг в отсеке производится при помощи воспламенителя (11).

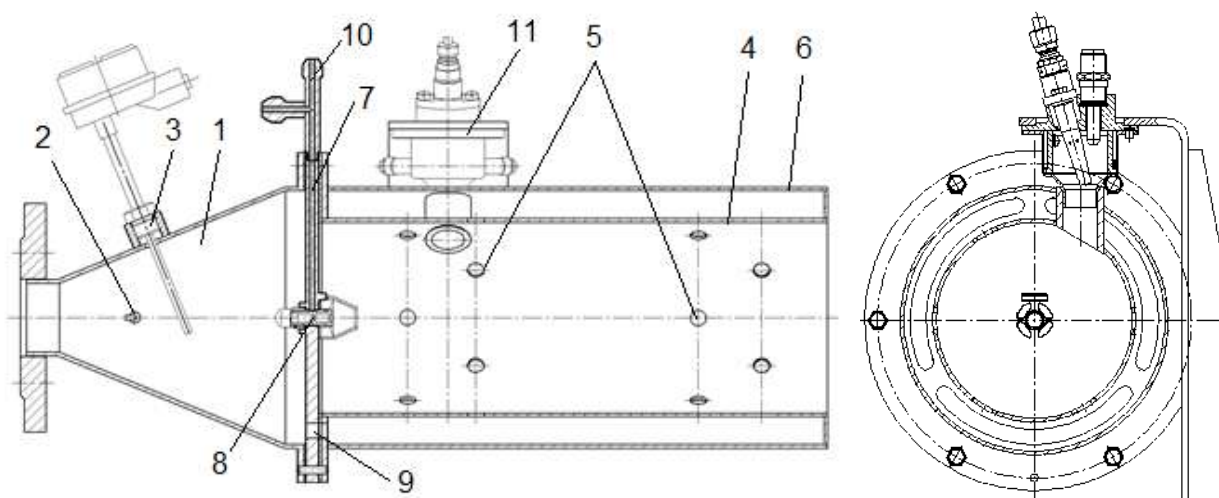


Рис.2 Схема однофорсуночного отсека

Испытания проводились при коэффициентах избытка воздуха α от 3 до 6

$P_{из}$ – избыточное давление воздуха перед горелкой (форсункой): 3,4 КПа, T_z – температура воздуха перед горелкой (форсункой): 130°C, G_t – расход газа менялся в пределах 8 до 3,8 кг/ч для обеспечения соответствующего коэффициента избытка воздуха; G_v – расход воздуха: 0,12 кг/с;

Сравнение результатов измерения концентрации выбросов в продуктах сгорания рассмотренных форсунок представлено на графиках распределения содержания концентраций веществ вдоль оси форсунки [16-18].

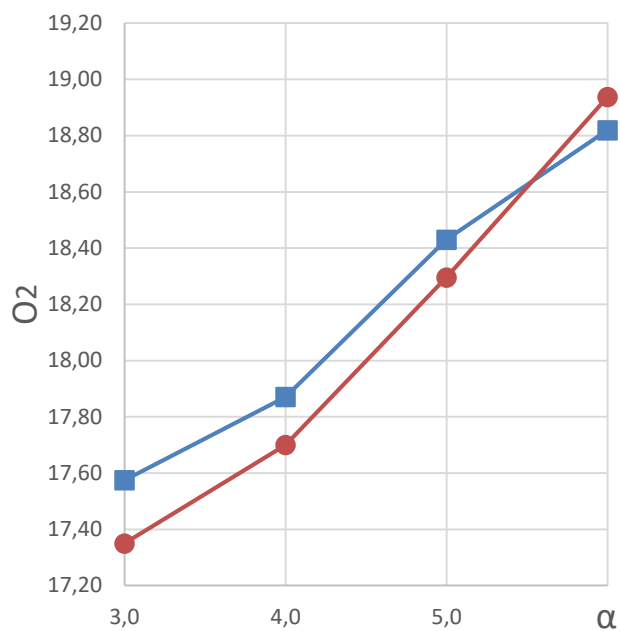


Рис.3 Содержание кислорода в продуктах сгорания

●- струйная форсунка ■- форсунка с подачей закрученной топливной струи

Содержание кислорода в продуктах сгорания на выходе из отсека с двумя типами форсунок близко по своим значениям, при этом с увеличением коэффициента избытка воздуха содержание кислорода в продуктах сгорания растет.

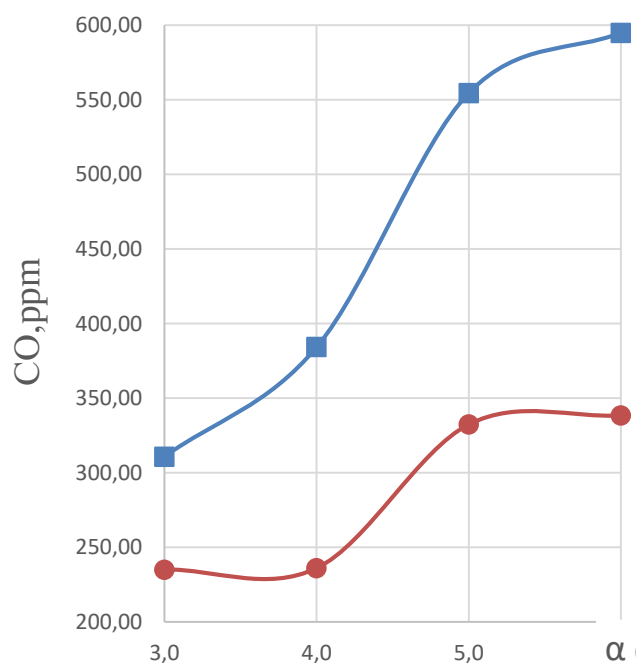


Рис.4 Содержание оксида углерода в продуктах сгорания

●- струйная форсунка ■- форсунка с подачей закрученной топливной струи

Содержание оксида углерода в продуктах сгорания отсека с форсункой имеющей подачу закрученной топливной струи в два раза выше, чем у отсека со струйной форсункой. С увеличением коэффициента избытка воздуха содержание оксида углерода в продуктах сгорания увеличивается.

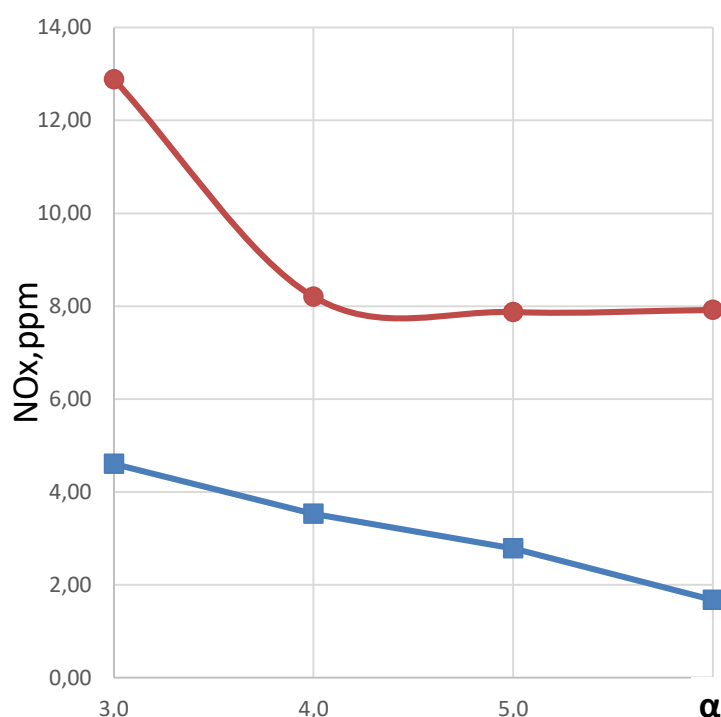


Рис.5 Содержание оксида азота в продуктах сгорания

●- струйная форсунка ■- форсунка с подачей закрученной топливной струи

Содержание оксида азота в продуктах сгорания отсека с форсункой имеющей подачу закрученной топливной струи так же в два раза выше, чем у отсека со струйной форсункой. С увеличением коэффициента избытка воздуха содержание оксида азота в продуктах сгорания снижается.

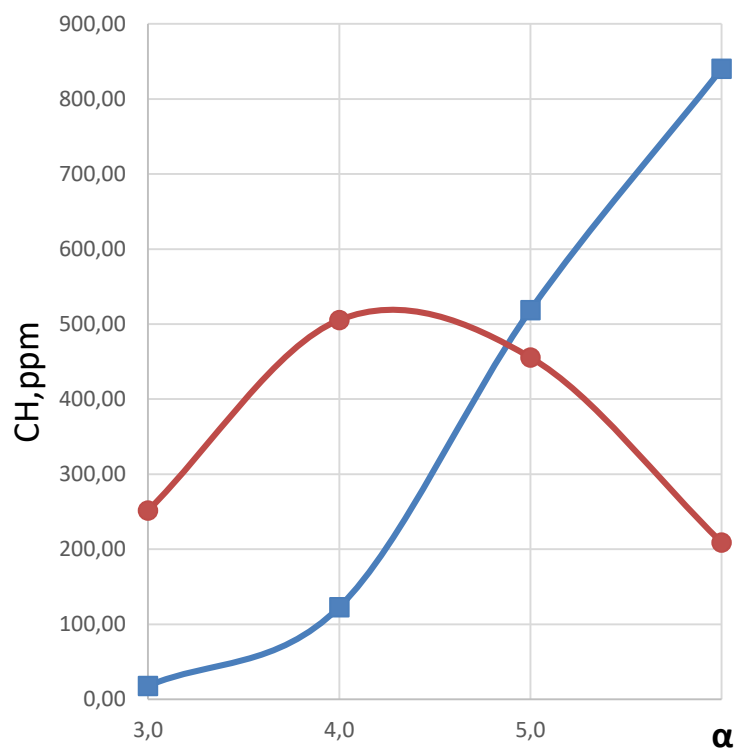


Рис. 6 Содержание углеводородов в продуктах сгорания

●- струйная форсунка ■- форсунка с подачей закрученной топливной струи

Концентрация СН на выходе из отсека при коэффициенте избытка воздуха 3 и 4 имеет низкий уровень. Но при 5 и 6 уровень концентрации резко возрастает.

Выводы

Параметры форсунки с подачей закрученной топливной струи характеризуются наличием высоких значений уровня СО и NO_x в два раза больших по сравнению с со струйной форсункой.

Значение СН в области «богатых смесей» у форсунки с подачей закрученной топливной струи ниже чем у струйной форсунки, а с обеднением смеси эта концентрация резко увеличивается что объясняется крайне низкой эффективностью перемешивания топлива с воздухом и следовательно низкой эффективностью сжигания топлива.

На основании полученных результатов можно рекомендовать форсунку со струйной подачей топлива к постановке в полноразмерную камеру сгорания для проверки в составе двигателя, так как результаты испытания показали низкую концентрацию СО и СН в продуктах сгорания [19,20].

Список источников

1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. Москва, Издательство ФИЗМАТЛИТ, 2003, 352 с.
2. Harrison, W. E., and Zabarnick, S., "The OSD Assured Fuels Initiative— Military Fuels Produced from Coal," presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
3. Magnussen, B.F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow. 19th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Science Meeting. January 12-15, 1981, St. Louis, Missouri, USA, 1981, pp. 1-6.
4. J. Schluter, T.Schonfeld, T.Poinsot, W.Kreds, S.Hoffmann. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations. ASME Turbo Expo 2001, GT2001-0060.
5. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД. Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2013 №3, с 131-138.

6. 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>
7. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М., Бакланов А.В. Усовершенствование конструкции камер сгорания традиционных схем в целях улучшения экологических показателей ГТД. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2010. № 1. с. 41-44.
8. Kieseewetter, F., Konle, M., and Sattelmayer, T. “Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone,” ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 129, pp. 929–36, 2007.
9. Lieuwen, T.C. and Yang, V., Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 210, AIAA, Reston, VA, 2005. 657pp.
10. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, 3rd ed., CRC Press, 2010. 537 pp.
11. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей/ В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.Л. Ковылов [и др.] – Самара: изд-во СНЦ РАН, 2008.-620с.: ил.
12. Ashwani K. Gupta, D. G. Lilley, Nick Syred. Swirl Flows. Energy and engineering science series. Abacus Press, 1984, 475 pp.
13. Ланский А.М., Лукачев С.В., Коломзаров О.В. Тенденции изменения геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания

малоразмерных газотурбинных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 3. С.47-57.

14. M. D. Durbin, M. D.Vangsness, D. R.Ballal, V. R.Katta. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1996. – Vol. 118. – №. 2. – P. 308- 315.

15. Lefebvre, A. H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency //Am. Soc. Mech. Eng.,(Pap.);(United States). – 1984. – Vol. 84. – №. CONF-840611.

16. P.Gokulakrishnan, C. C.Fuller, M. S.Klassen, R. G.Joklik, Y. N.Kochar, S. N.Vaden, J. M. Seitzman. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation // Combustion and Flame. – 2014. – Vol. 161. – №. 8. – P. 2038-2053.

17. Taylor, S.C. Burning Velocity and the Influence of Flame Stretch , University of Leeds, 1991.

18. T.Yi, E. J.Gutmark Yi, T. Real-time prediction of incipient lean blowout in gas turbine combustors // AIAA journal. – 2007. – Vol. 45. – №. 7. – P. 1734-1739.

19. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения // Труды МАИ, 2016, № 85: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67495>

20. Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н., Бакланов А.В. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им.

академика С.П. Королева (национального исследовательского университета), 2011, №5(29), с.208-214..

References

1. Varnatz J., Maas U., Dibble R. Combustion. Physical and chemical aspects, modeling, experiments, formation of pollutants. [Physical and chemical fundamentals, modeling and simulations, experiments, pollutant formation]. MOSCOW, FIZMATLIT, 2003.
2. Harrison, W. E., and Zabarnick, S., “The OSD Assured Fuels Initiative— Military Fuels Produced from Coal,” presented at DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
3. Magnussen, B.F. On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow. 19th American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Science Meeting. January 12-15, 1981, St. Louis, Missouri, USA, 1981, pp. 1-6.
4. J. Schluter, T.Schonfeld, T.Poinsot, W.Kreds, S.Hoffmann. Characterization of confined swirl flows using large eddy simulations. ASME Turbo Expo 2001, GT2001-0060.
5. A.N. Markushin, A.V. Baklanov. Testing stands for researching the processes and maturation of low emission combusters. Vestnik of the Samara State Aerospace University. V1. no 3(41), 2013, p. 131-138.
6. A.N. Markushin, A.V. Baklanov. The examinations of nozzle carburizing for NK's combustion chamber by kerosene flushing with liquid technical detergent// Trudy MAI, 2018. No. 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91839>

7. 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*. № 1, 2010, pp. 41-44.
8. Kieseewetter, F., Konle, M., and Sattelmayer, T. “Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flashback in a Premix Burner with Cylindrical Mixing Zone,” *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 129, pp. 929–36, 2007.
9. Lieuwen, T.C. and Yang, V., *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines*, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 210, AIAA, Reston, VA, 2005. 657pp.
10. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*, 3rd ed., CRC Press, 2010. 537 pp.
11. V. P. Danilchenko, S. V. Lukachev, J. L. Kovylov. *Design of aircraft gas turbine engines*. Samara science center of the Russian Academy of Sciences, 2008. p 620.
12. Ashwani K. Gupta, D. G. Lilley, Nick Syred. *Swirl Flows*. Energy and engineering science series. Abacus Press, 1984, 475 pp.
13. Ланский А.М., Лукачев С.В., Коломзаров О.В. Тенденции изменения геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 3. С.47-57.
14. M. D. Durbin, M. D. Vangsness, D. R. Ballal, V. R. Katta. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1996. – Vol. 118. – №. 2. – P. 308- 315.

15. Lefebvre, A. H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency //Am. Soc. Mech. Eng.,(Pap.);(United States). – 1984. – Vol. 84. – №. CONF-840611.
16. P.Gokulakrishnan, C. C.Fuller, M. S.Klassen, R. G.Joklik, Y. N.Kochar, S. N.Vaden, J. M. Seitzman. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation // Combustion and Flame. – 2014. – Vol. 161. – №. 8. – P. 2038-2053.
17. Taylor, S.C. Burning Velocity and the Influence of Flame Stretch , University of Leeds, 1991.
18. T.Yi, E. J.Gutmark Yi, T. Real-time prediction of incipient lean blowout in gas turbine combustors // AIAA journal. – 2007. – Vol. 45. – №. 7. – P. 1734-1739.
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: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67495>.
20. Mingazov B.G.,Yavkin V.B.,Sabirzyanov A.N.,Baklanov A.V. Analysis of combustion models applicability for designing combustion chamber with a large number of nozzles. Vestnik S.P. Korolev SGAU, 2011, No.5(29), pp.208-214.