

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕЛА ДВУХКОНТУРНОЙ ГОРЕЛКИ НА ВЫБРОСЫ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Бакланов А.В.

Казанское моторостроительное производственное объединение,
ул. Дементьева, 1, Казань, 420036, Россия
e-mail: andreybaklanov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 01.05.2020

Рассмотрена конструкция двухконтурной горелки малоэмиссионной камеры сгорания газотурбинного двигателя, работающего на природном газе. Проведены результаты исследования трех горелок, отличающихся диаметром выходной части развитой втулки завихрителя. Описано стендовое оборудование, перечислены особенности проведения экспериментального исследования. Представлены результаты исследований по измерению концентрации компонентов конечной газовой смеси, в частности оксида углерода CO, оксидов азота NO и несгоревших углеводородов СН, в продуктах сгорания. Выполнен расчет полноты сгорания топлива. Произведен выбор горелки, показавшей минимальное значение концентрации оксидов азота и максимальный уровень полноты сгорания в отбираемых пробах.

Ключевые слова: двухконтурная горелка, малоэмиссионная камера сгорания, эксперимент, полнота сгорания, экология.

Введение

Современные малоэмиссионные камеры сгорания газотурбинных двигателей выполняются в рамках концепции LPP (Lean — premixed and prevaporized), которая основана на низкотемпературном ($T_{пл} \leq 1800...1900$ К) сжигании предварительно перемешанной «обедненной» топливоздушную смеси (ТВС) [1–3]. Данная концепция предусматривает тщательное перемешивание топлива с воздухом внутри горелки перед подачей в зону горения. Известно, что техническое совершенство таких горелок обеспечивает успешное

решение задачи снижения выбросов оксидов азота и оксида углерода с сохранением высокой эффективности и устойчивости процесса горения. Поэтому исследования, направленные на изучение влияния конструкции таких горелок на эмиссионные характеристики пламени, являются необходимыми при создании и доводке камер сгорания газотурбинных двигателей, выполненных в рамках описанной выше концепции [4–6].

На рис. 1 приведена схема горелки и картина течения в области подготовки, стабилизации ТВС, а также на выходе из горелки. Для обеспечения

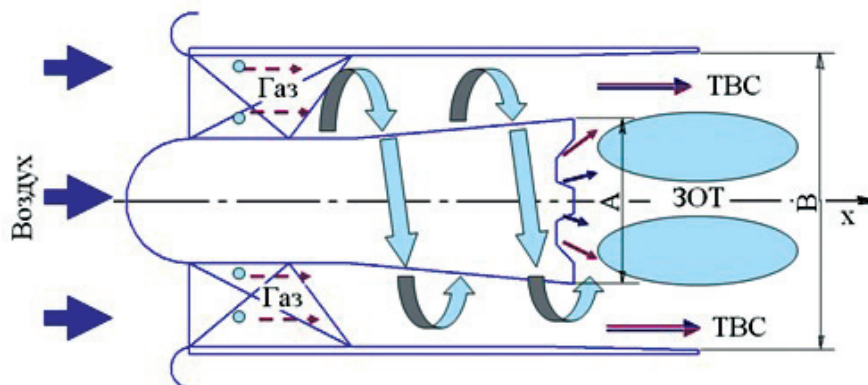


Рис. 1. Схема горелки и картина течения потока

регулирования расхода топлива и управления процессом горения в камере сгорания горелка имеет два канала подвода топлива. Топливный газ через перфорированные лопатки завихрителя (основной контур) поступает в воздушный поток, идущий по межлопаточным каналам, и образует на выходе из горелки перемешанную ТВС. Для обеспечения устойчивой работы камеры на низких режимах, а также для организации надежного розжига в центр горелки подводится второй канал топлива, образуя дежурную зону, работающую по диффузионному принципу [7, 8]. Воздух и топливо в нее подаются отдельно через специальные каналы в задней стенке втулочной части завихрителя.

Схема комбинированной стабилизации пламени основана на использовании трёх механизмов [9, 10]:

1) формирования радиального градиента статического давления при закрутке, способствующего приосевому распаду закрученного потока;

2) действия градиента на срезе центрального тела (развитой втулки завихрителя);

3) газодинамической стабилизации на струях воздуха, вдуваемого из отверстий центральной форсунки.

Исследование процессов проводилось для трёх горелок с различным диаметром выходной части центрального тела в два этапа:

1) определение состава продуктов сгорания;

2) определение полноты сгорания вдоль оси горелки.

Три горелки выполнены с разным соотношением диаметра центрального тела А к диаметру выходного сопла горелки В:

№1 $A/B = 0,5$;

№2 $A/B = 0,62$;

№3 $A/B = 0,71$.

Определение состава продуктов сгорания проводилось на стенде (рис. 2), работающем по следующему принципу: воздух с помощью нагнета-

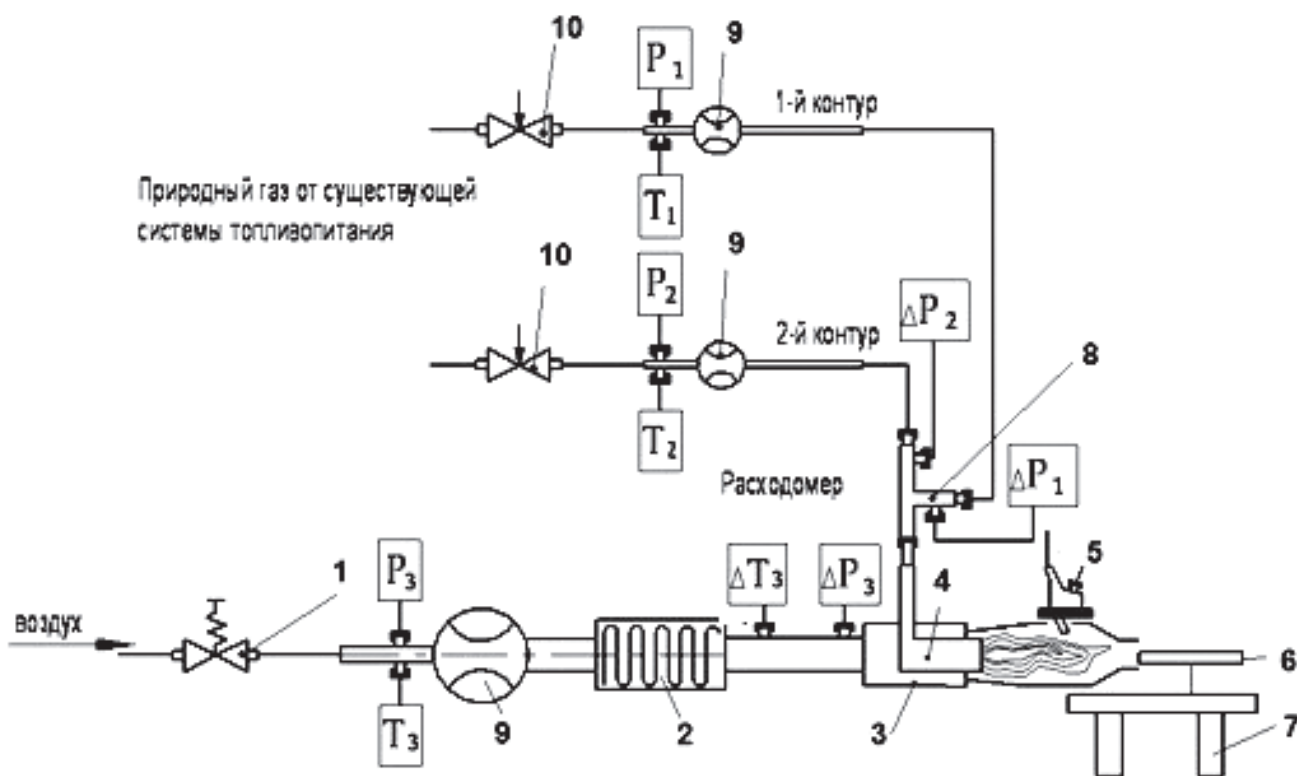


Рис. 2. Стенд для проведения газодинамических и огневых испытаний горелок: 1 — электромагнитный клапан; 2 — нагреватель; 3 — ресивер; 4 — горелка; 5 — воспламенитель; 6 — газоанализатор; 7 — координатный стол; 8 — тройник; 9 — расходомер; 10 — клапан; ΔT_3 — датчик перепада температур на входе в стенд и после нагревателя; P_1, T_1 — датчики абсолютного давления и температуры газа магистрали первого контура подачи топлива; P_2, T_2 — датчики абсолютного давления и температуры газа магистрали второго контура подачи топлива; $\Delta P_1, \Delta P_2$ — датчики 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

теля подается на вход расходомерного участка, представляющего собой цилиндрический канал с установленным в нем критическим соплом. Далее воздух поступает в электрическую печь (подогреватель), а затем транспортируется к горелке, установленной в ресивер, к которому подсоединен имитатор жаровой трубы (рис. 3). Топливо к каналам горелки подается по топливной магистрали, имеющей два контура.



Рис. 3. Размещение горелки в имитаторе жаровой трубы

Стенд оснащен оборудованием, обеспечивающим измерение и регистрацию параметров, регулирование режимов [11].

Для измерения концентрации CO, NO и CH в продуктах сгорания использовался газоанализатор Testo 350. Для выполнения отбора проб используется пробоотборник, который устанавливается на координатном столе и перемещается в заданных координатах вдоль оси пламени [12–14].

Испытания проводились при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 2$, что соответствует рабочему значению во время работы в составе двигателя. При этом в первый контур подавалось 30% газа, идущего в горелку [15–17].

$P_{из}$ — избыточное давление воздуха перед горелкой (форсункой), 3,2 КПа;

T_3 — температура воздуха перед горелкой (форсункой), 278°С;

$G_{тру1к}$ — расход газа 1-го контура, 1,55 кг/ч;

$G_{тру2к}$ — расход газа 2-го контура, 3,45 кг/ч,

G_B — расход воздуха, 0,05 кг/с;

Из рис. 4 следует, что уровень CH в продуктах сгорания уменьшается с увеличением диаметра центрального тела, при этом уровень NO также

возрастает, что объясняется увеличением температуры в зоне диффузионного факела, которая приводит к снижению концентрации CO. Увеличение диаметра центрального тела практически не влияет на уровень концентрации CO вдоль оси факела пламени. Распределение концентраций носит схожий характер.

Увеличение диаметра центрального тела до значения $A/B = 0,62$ приводит к снижению уровня

NO_x в три раза, но при увеличении до значения $A/B = 0,71$ он возрастает.

В соответствии с полученными данными на задаваемых режимах была рассчитана полнота сгорания [18–20].

Для определения полноты сгорания топлива, учитывающей только химический недожог метана, в зависимости от коэффициента избытка воздуха α использовалось выражение [21]:

$$\eta_r = 1 - (0,20175 \cdot EI_{CO} + EI_{CH_4}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где EI_{CO} , EI_{CH_4} — индексы эмиссии окиси углерода и метана; коэффициент 0,20175 учитывает отношение низшей теплоты сгорания окиси углерода $Q_H^{CO} = 10096$ кДж/кг к низшей теплоте сгорания метана $Q_H^{CH_4} = 50042$ кДж/кг при стандартных условиях.

Индексы эмиссии EI_i для окиси углерода, окислов азота и несгоревших углеводородов (метана) рассчитывались по уравнению:

$$EI_i = \frac{\mu_i}{\mu_B} (1 - \alpha_i L_0) \chi_i 10^{-3}, \quad (2)$$

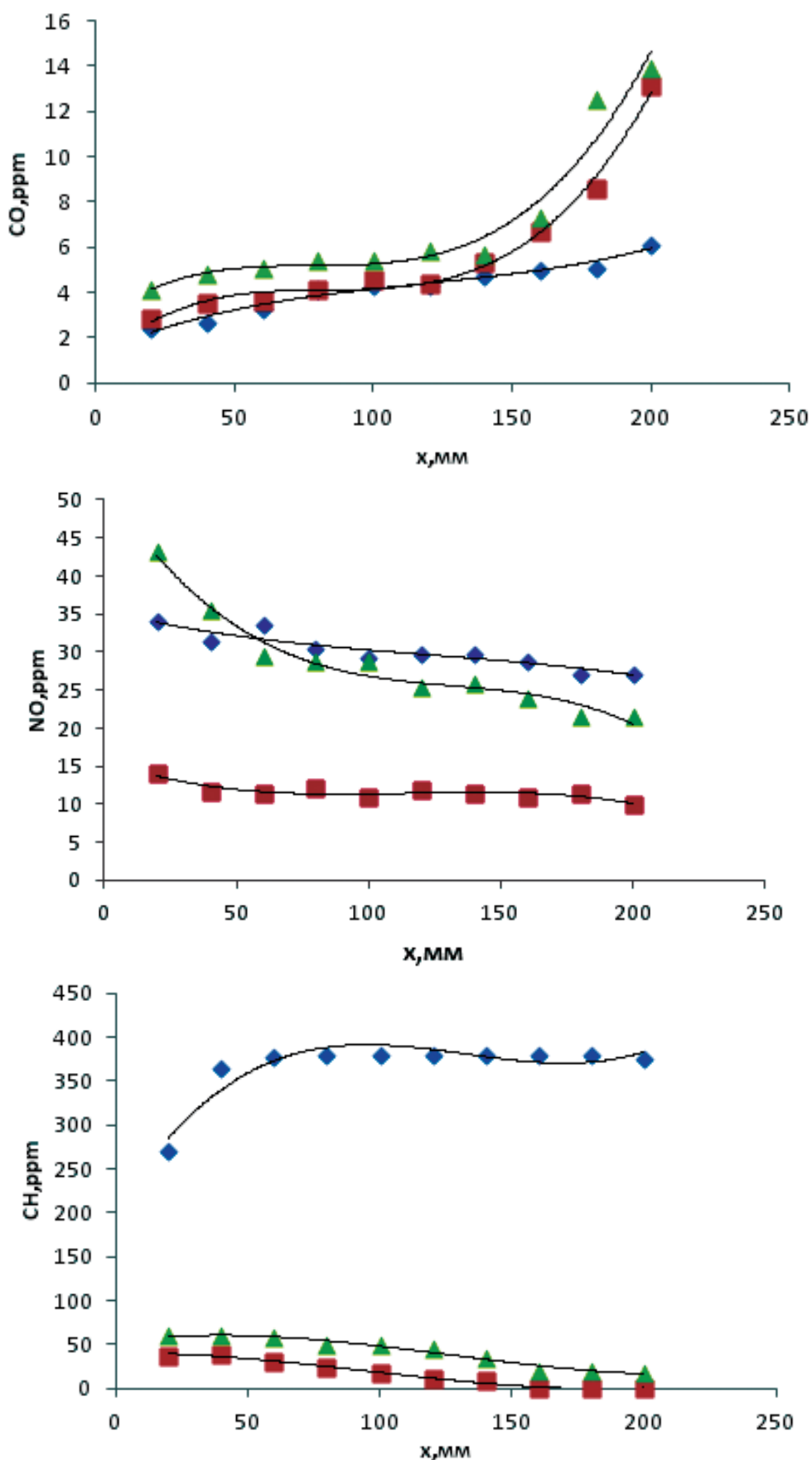


Рис. 4. Сравнение состава продуктов сгорания горелок № 1, 2, 3 при $\alpha = 2$ и $G_{ТК}/G_{Т\Sigma} = 0,3$: ◆ — горелка № 1; ■ — горелка № 2; ▲ — горелка № 3

где $L_0 = 17,1971$ — стехиометрический коэффициент сгорания метана, кг воздуха/кг топлива;

α_i — суммарный или местный коэффициент избытка воздуха;

μ_i — молярная масса определяемого токсичного вещества (CO, NOx и CH₄);

μ_B — молярная масса воздуха;

χ_i — объемная доля токсичного вещества, ppm.

Из графика (рис. 5) видно, что у горелки № 1 полнота сгорания значительно ниже, чем у двух других горелок. В связи с этим горелка № 1, которая имеет соотношение диаметра выходной части развитой втулки завихрителя к диаметру выходного сопла горелки $A/B = 0,5$, не обеспечивает необходимой эффективности сжигания топлива. Наиболее приемлемое соотношение диаметров $A/B = 0,62$, так как в этом случае наблюдаются высокие значения полноты сгорания и минимальные значения CO, NO и CH.

Библиографический список

1. *Lefebvre A.H., Ballal D.R.* Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. — Third Edition. CRC Press, 2010. — 557 p.
2. *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
3. *Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И.* Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. — Самара, СНЦ РАН, 2004. — 266 с.
4. *Moses C.A., Roets P.N.J.* 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
5. *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.

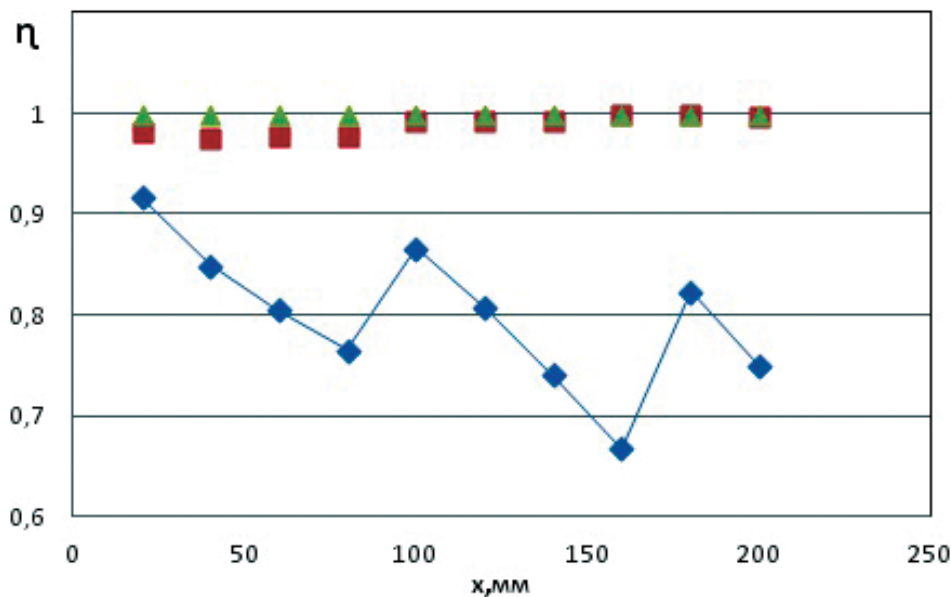


Рис. 5. Полнота сгорания вдоль оси горелок № 1, 2, 3 при $\alpha = 2$ и $G_{Т1к}/G_{ТΣ} = 0,3$: ● — горелка № 1; ■ — горелка № 2; ▲ — горелка № 3

Выводы

1. В двухконтурной горелке соотношение диаметра центрального тела к диаметру сопла является важным параметром, влияющим на организацию процесса горения.

2. Для рассмотренного типа горелок определено оптимальное соотношение $A/B = 0,62$, при котором достигается наиболее эффективное сжигание топлива.

6. *Lee S., Speight J.G., Loyalka S.K.* Handbook of Alternative Fuel Technologies. — 2nd Edition. — CRC Press, Boca Raton, FL, 2014. — 712 p.
7. *Бакланов А.В.* Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 73-85.
8. *Мингазов Б.Г.* Камеры сгорания газотурбинных двигателей. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. — 220 с.

9. *Бакланов А.В., Неумоин С.П.* Методика определения качества смешения газообразного топлива и воздуха за вихревой горелкой камеры сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 87–92.
10. *Бакланов А.В.* Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 57–68.
11. *Бакланов А.В., Маркушин А.Н., Цыганов Н.Е.* Влияние формы насадки вихревой горелки на смешение в закрученной струе // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 3. С.13–18.
12. *Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В.* и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. — Самара: СНЦ РАН, 2002. — 527 с.
13. *Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J.* Numerical and experimental investigations of confined swirling combustions flows // Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal. 2003. Vol. 3. No. 2-4, pp. 78-88. DOI: 10.1504/PCFD.2003.003778
14. *Zheng H., Zhang Z., Li Y., Li Z.* Feature-Parameter-Criterion for Predicting Lean Blowout Limit of Gas Turbine Combustor and Bluff Body Burner // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Vol. 2013. Article ID 939234, 17 p. DOI: 10.1155/2013/939234
15. *Roy G.D., Frolov S.M., Netzer D.W., Borisov A.A.* High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. — ELEX-KM Publishers, 2001. — 357 p.
16. *Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T.* Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame 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
17. *Lieuwen T.C., Yang V.* Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling // Progress in Astronautics and Aeronautics. Vol. 210. AIAA, Reston, VA, 2005. — 657 p.
18. *Acharya V., Lieuwen T.* Role of Azimuthal Flow Fluctuations on Flow Dynamics and Global Flame Response of Axisymmetric Swirling Flames // AIAA SciTech: 52nd Aerospace Sciences Meeting (13-17 January 2014, National Harbor, Maryland). 2014, pp. 13-17. DOI: 10.2514/6.2014-0654
19. *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
20. *Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S., Joklik R.G., Kochar Y.N., Vaden S.N., Seitzman J.M.* 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
21. *Канило П.М., Подгорный А.Н., Христич В.А.* Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. — Киев: Наукова думка, 1987. — 224 с.

THE EFFECT OF THE CENTRAL BODY DIAMETER OF A DUAL-CIRCUIT BURNER ON THE HAZARDOUS SUBSTANCES RELEASE

Baklanov A.V.

*Kazan Motor Production Association,
1, Dementyeva str., Kazan, 420036, Russia
e-mail: andreybaklanov@bk.ru*

Abstract

At present, the LPP (Lean-Premixed and Pre-vaporised) concept is one of the most effective concepts of the low-emission fuel combustion, which is based on the low-temperature ($T_{\text{flame}} = 1800\text{--}1900\text{ K}$) combustion of pre-mixed “poor” fuel-air mixture (FAM). This concept foresees thorough mixing of the fuel with air in the burner prior to feeding to the combustion zone. It is well-known that technical perfection of these burners ensures successful problem solving of nitrogen oxides and carbon monoxide release reduction while

maintaining high efficiency and stability of the combustion process. Thus, the efforts aimed at studying these burners design impact on the emission characteristics of the flame are necessary while development and adjustment of combustion chambers of gas turbine engines, accomplished within the framework of the LPP concept.

The presented article considers the structure of the dual-circuit burner of the low-emission combustion chamber of the gas turbine engine, operating on the natural gas. The results of the studies of the three

burners differing by the size of the outlet part of the developed swirler hub are presented. The article presents also the results of the components concentration measuring of the final gas mixture, in particular carbon monoxide CO, nitrogen oxides NO and unburned hydrocarbons CH in the combustion products. Computation of the fuel combustion efficiency was performed. Selection of a burner, which demonstrated minimum of value of nitrogen concentration and maximum combustion efficiency level and carbon monoxide in the samples being drawn was conducted. The best appeared to be a burner having a structure with the central body diameter to the outlet nozzle diameter ratio of $A/B = 0.62$.

Keywords: dual-circuit burner, low-emission combustion chamber, experiment, combustion efficiency, ecology.

References

1. Lefebvre A.H., Ballal D.R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. 3rd edition. CRC Press, 2010, 557 p.
2. 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
3. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Yu.I. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinye ustanovki nazemnogo primeneniya* (Aviation gas turbine engines conversion into ground application gas turbines), Samara, SNTs RAN, 2004, 266 p.
4. Moses C.A., Roets P.N.J. 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
5. Markushin A.N., Merkushev V.K., Byshin V.M., Baklanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2010, no. 1, pp. 41–44.
6. Lee S., Speight J.G., Loyalka S.K. *Handbook of Alternative Fuel Technologies*, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2014, 712 p.
7. Baklanov A.V. Controlling fuel combustion process by burner design change in gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 73–85.
8. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinykh dvigatelei* (Combustion chambers of gas turbine engines), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, 220 p.
9. Baklanov A.V., Neumoin S.P. A technique of gaseous fuel and air mixture quality identification behind the swirl burner of gas turbine engine combustion chamber. *Russian Aeronautics*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 90–96.
10. Baklanov A.V. Low-emission combustion chamber of diffusion type employing micro flame burning process for converted aircraft gas turbine engine. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 57–68.
11. Baklanov A.V., Markushin A.N., Tsyganov N.E. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 3, pp. 13–18.
12. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. et al. *Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei* (Some issues of aircraft gas turbine engines designing), Samara, SNTs RAN, 2002, 527 p.
13. Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J. Numerical and experimental investigations of confined swirling combustions. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2003, vol. 3, no. 2–4, pp. 78–88. DOI: 10.1504/PCFD.2003.003778
14. Zheng H., Zhang Z., Li Y., Li Z. Feature-Parameter-Criterion for Predicting Lean Blowout Limit of Gas Turbine Combustor and Bluff Body Burner. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013. Article ID 939234, 17 p. DOI: 10.1155/2013/939234
15. Roy G.D., Frolov S.M., Netzer D.W., Borisov A.A. *High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control*. ELEX-KM Publishers, 2001, 357 p.
16. Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame 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
17. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol. 210. AIAA, Reston, VA, 2005, 657 p.
18. Acharya V., Lieuwen T. Role of Azimuthal Flow Fluctuations on Flow Dynamics and Global Flame Response of Axisymmetric Swirling Flames. *AIAA SciTech: 52nd Aerospace Sciences Meeting* (13–17 January 2014, National Harbor, Maryland). 2014, pp. 13–17. DOI: 10.2514/6.2014-0654
19. 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
20. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S., Joklik R.G., Kochar Y.N., Vaden S.N., Seitzman J.M. 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
21. Kanilo P.M., Podgornyi A.N., Khristich V.A. *Energeticheskie i ekologicheskie kharakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodorodnykh topliv i vodoroda* (Energy and environmental characteristics of GTE when utilizing hydrocarbon fuels and hydrogen), Kiev, Naukova dumka, 1987, 224 p.