

Исследование параметров факела за форсункой со струйной и закрученной подачей топлива

Бакланов А.В.^{1*}, Краснов Д.С.^{2}, Гараев А.И.^{2***}**

¹Казанское моторостроительное производственное объединение,

ул. Дементьева, 1, Казань, 420036, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.

Туполева–КАИ, КНИТУ-КАИ,

ул. К. Маркса, 10. Казань, 420111, Россия

**e-mail: andreybaklanov@bk.ru*

***e-mail: dima-krasnov-09@mail.ru*

****e-mail: almazsdf@mail.ru*

Статья поступила 27.04.2020

Аннотация

Одними из основных параметров, определяемых в камере сгорания являются потери давления, полнота сгорания, неравномерность температурного поля на выходе, выбросы вредных загрязняющих веществ. В данной статье рассматривается влияние способа подачи топлива, реализованного в форсунке на изменение перечисленных выше параметров. Представлена конструкция стендовой установки предназначенной для испытания форсунок в имитаторе жаровой трубы, а так же режимы при которых данные испытания проводились. Получены результаты в имитаторе жаровой трубы с установленными струйными форсунками и форсунками с подачей закрученной топливной струи. Проведен анализ, по результатам которого сделаны выводы о эффективности применения струйных форсунок и рекомендации о постановке выбранного типа форсунок в полноразмерную камеру сгорания [1-4].

Ключевые слова: камера сгорания, газотурбинный двигатель, форсунка.

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

Рассматриваемая топливоздушная 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, что во внутренний канал корпуса форсунки установлен завихритель, (рис.2б) который подает в смесительную втулку закрученную топливную струю [12-15].

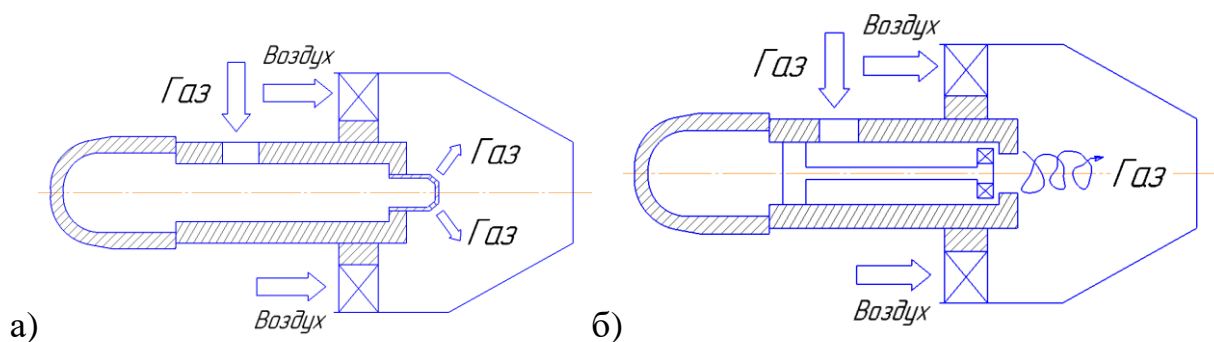


Рис.1. Схема форсунки:

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 [5-7].

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

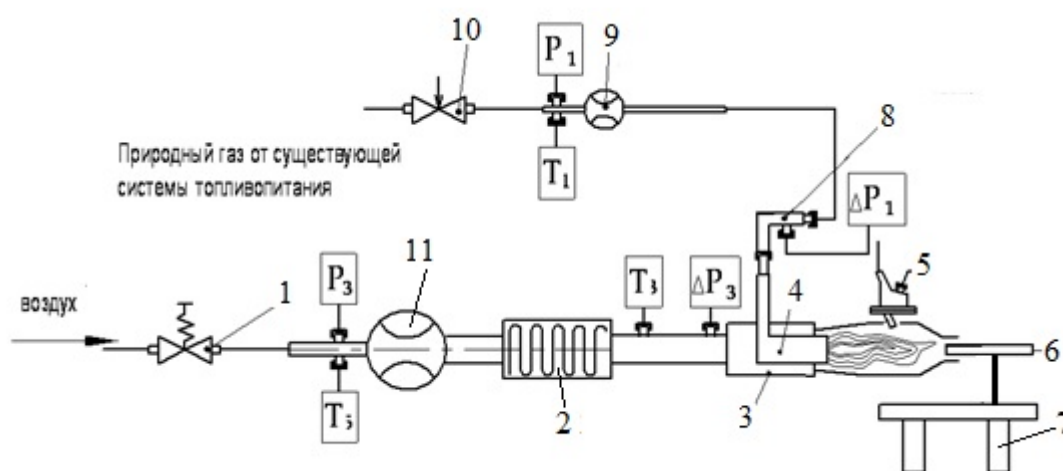


Рис.2. Стенд для проведения газодинамических и огневых испытаний горелок.

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 [16,17].

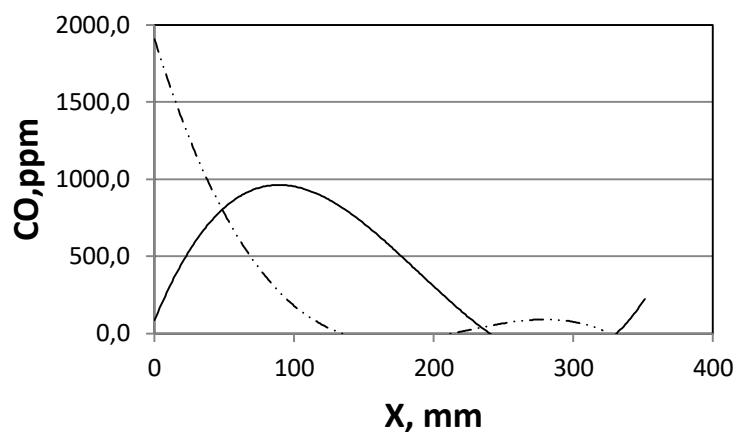


Рис.3 Размещение форсунки в имитаторе жаровой трубы

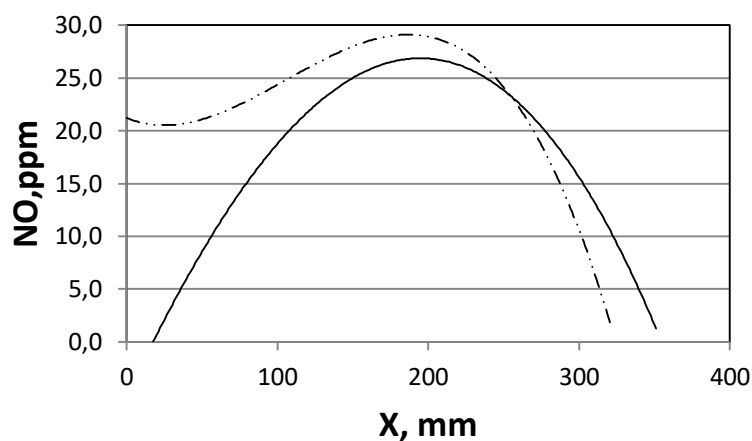
Испытания проводились при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,2$.

$P_{из}$ – избыточное давление воздуха перед горелкой (форсункой): 3,4 КПа, T_3 – температура воздуха перед горелкой (форсункой): 102 °С, G_T – расход газа: 1,75 кг/ч; G_B – расход воздуха: 0,01 кг/с;

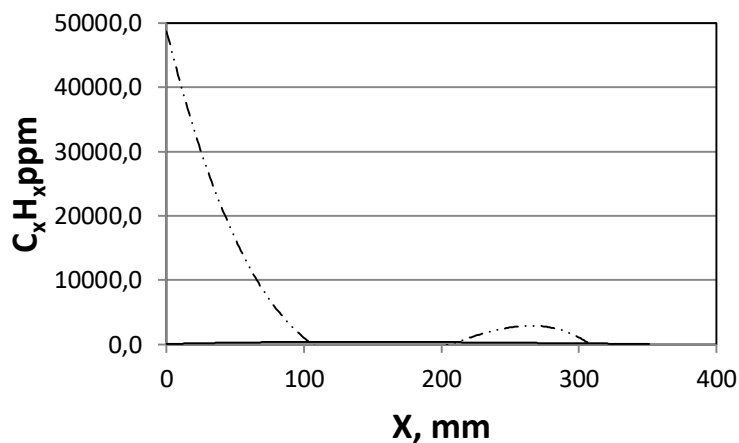
Сравнение результатов измерения концентрации выбросов в продуктах сгорания рассмотренных форсунок представлено на графиках распределения содержания концентраций веществ вдоль оси форсунки [18].



а



б



в

Рис. 4 Распределение концентрации в факеле форсунок на режиме $\alpha=1,2$

— —струйная, - - - - -подача закрученной струи

Параметры форсунки с подачей закрученной топливной струи характеризуются наличием высоких значений уровня СО и СН (рис.4 а, в), что объясняется крайне низкой эффективностью перемешивания топлива с воздухом и следовательно низкой эффективностью сжигания топлива. При этом форсунка со струйной подачей

топлива имеет низкие значения CO и CH, что свидетельствует о хорошем качестве смешения топлива с воздухом и эффективности организации горения. Следует отметить, что уровень NO у форсунки с закрученной подачей топлива тоже несколько выше (рис.4 б).

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 CO и CH в продуктах сгорания [19,20].

Библиографический список

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. Harrison W., Zabarnick S. The OSD Assured Fuels Initiative—Military Fuels Produced from Coal // DoE Clean Coal Conference, Clearwater, FL, June 2007.
3. 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)
4. Борисов А.Д. Исследование влияния способа подачи струй в камеру на эффективность смешения и горения топливо-воздушной смеси // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74721>

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, 2007, vol. 129, pp. 929 – 936. DOI: [10.1115/1.2747259](https://doi.org/10.1115/1.2747259)
9. Lieuwen T.C. and Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Reston, VA, 2005, vol. 210, 657 p.
10. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, CRC Press, 2010, 537 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. Ashwani K. Gupta, D. G. Lilley, Nick Syred. Swirl Flows. Energy and engineering science series. Abacus Press, 1984, 475 p.
13. Мосолов С.В., Сидлеров Д.А., Пономарев А.А. Сравнительный анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-струйными и струйно-центробежными форсунками на основе численного моделирования // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34989>
14. 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)
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. 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](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.01.024)
17. Taylor S.C. Burning Velocity and the Influence of Flame Stretch, University of Leeds, 1991, 332 p.
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: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67495>
20. 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, no. 60, pp. 90 – 96. DOI: [10.3103/S1068799817010135](https://doi.org/10.3103/S1068799817010135)