

УДК 681-5: 62-52

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.03

В.Г. Августинович¹, Т.А. Кузнецова¹, А.И. Фатыков¹, В.О. Фофанов²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Центр профессионального развития «Европейский», Пермь, Россия

ОЦЕНКА ГОМОГЕННОСТИ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕЛЯЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ПИЛОТНОГО ТОПЛИВА

На основании экспериментальных данных установлена коррелятивная связь между относительным расходом топлива через пилотный контур малоэмиссионной камеры сгорания и пульсациями давления в камере. Сформирован количественный критерий принадлежности процесса горения преимущественно к гомогенному или диффузионному типу перемешивания смеси, позволяющий оценивать качество организации горения без измерения эмиссии. На основании полученных данных реализована аппроксимация среднеквадратического отклонения распределения поля концентраций топливовоздушной смеси по сечению камеры сгорания в зависимости от коэффициента корреляции относительного расхода топлива пилотного контура и двойной амплитуды пульсаций давления в жаровых трубах для гомогенного (технически перемешанной топливовоздушной смеси) контура. Полученные результаты позволяют существенно повысить качество прогнозирования эмиссии за счет уточнения полуэмпирической математической модели генерации оксидов азота, построенной на базе термического механизма Зельдовича для малоэмиссионных режимов работы камеры сгорания газотурбинных двигателей. Уточнение ведется через учет неоднородности процесса в жаровых трубах, что позволяет перейти от допущения геометрической и газодинамической идентичности жаровых труб к их фактической неоднородности. Разработанная математическая модель может быть использована в качестве виртуального сенсора эмиссии в перспективных следящих системах управления газотурбинными двигателями.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, малоэмиссионная камера сгорания, жаровая труба, пульсации давления, гомогенный факел, диффузионный факел, относительный расход топлива пилотного контура, эмиссия, коэффициент корреляции, математическая модель.

V.G. Avgustinovich¹, T.A. Kuznetsova¹, A.I. Fatykov¹, V.O. Fofanov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Professional Development Center "European", Perm, Russian Federation

EVALUATION OF FUEL-AIR MIXTURE HOMOGENEITY IN LOW EMISSION GAS TURBINE ENGINE COMBUSTOR BY AID OF PRESSURE PULSATIONS AND PILOT FLOW FUEL CORRELATION

Connection between pilot fuel flow and pressure pulsations in dry low emission combustor is established on base of experimental data. Determining quantitative criteria of homogeneous or diffusion flame is formulated. The criteria give chance to evaluate quality of mixing fuel and air and combustion without emission measuring. The root-mean-square deviation of the dependence of the distribution of the air-fuel mixture concentration field over the combustion chamber cross section on the correlation coefficient between the pilot fuel ratio and the double amplitude of pressure pulsations in the flame tubes for a homogeneous (technically mixed air-fuel mixture) circuit was approximated based on the data obtained. The results obtained make it possible to significantly improve the quality of emission prediction by refining the semi-empirical mathematical model of the nitrogen oxides' generation, built on the basis of the Zeldovich thermal mechanism for low-emission operating modes of dry low emission combustor of the gas turbine engines. The account of heterogeneity of the process in the flame tubes makes it possible to move from the assumption of the geometric and gas-dynamic identity of the flame tubes to their actual heterogeneity. This conclusion allows refining the model. The developed mathematical model can be used as a virtual emission sensor in advanced tracking control systems of gas turbine engines.

Key words: gas turbine engine, dry low emission combustor, flame tube, pressure pulsations, homogeneous flame, diffusion flame, pilot fuel ratio, emission, correlation coefficient, mathematical model.

Одной из задач создания газотурбинных двигателей следующего поколения является внедрение малоэмиссионных камер сгорания и систем управления ими.

Особенностью этих камер сгорания является узкий диапазон режимов работы между срывом горения и высоким уровнем эмиссии. В связи с этим ставится задача разработки штатного сенсора эмиссии, устанавливаемого на двигателе, для следящей системы управления.

В настоящее время такие сенсоры отсутствуют, и поэтому активно ведутся разработки их виртуальных аналогов. Известны подходы как к разработке прогнозных моделей эмиссии на основе аппроксимации экспериментальных данных с помощью полиномов [1], так и виртуальных сенсоров эмиссии на основе нейронных сетей [2–5], а также с использованием аппроксимации экспериментальных данных на основе уравнения Зельдовича для скорости генерации оксидов азота [6].

Можно априори обоснованно предположить, что в последнем случае, в силу нелинейного характера зависимости эмиссии оксидов азота от температуры, математическая модель эмиссии на основе уравнения Зельдовича обладает преимуществами по точности, особенно при широком диапазоне режимов работы газотурбинного двигателя (ГТД), характерного, например, для авиационного ГТД.

Однако в этом случае необходимо знать статистическое распределение концентраций топливовоздушной смеси в камере сгорания с учетом пульсаций. Задача усложняется наличием пространственной неоднородности поля концентраций, обусловленной геометрической и газодинамической неидентичностью горелок камеры сгорания.

В предлагаемом исследовании на основании экспериментальных данных установлена связь между относительным расходом топлива через пилотный контур малоэмиссионной камеры сгорания и пульсациями давления в камере. Это позволило получить количественный критерий принадлежности процесса горения преимущественно к гомогенному или диффузионному типу перемешивания смеси, позволяющий оценивать качество организации горения без измерения эмиссии.

Постановка задачи

При турбулентном горении [7–9] в камерах сгорания ГТД, как известно, возникают пульсации давления, обусловленные наведением турбулентности для перемешивания топливовоздушной смеси и действием первого закона термодинамики. На выходе из камеры сгорания (входе в турбину) стохастические пульсации скорости (интенсивность турбулентности) достигают 35 % [10]. Постоянно действующая турбулентность (пульсации скорости), в свою очередь, в потоке генерирует пульсации состава топливовоздушной смеси и тем самым пульсации теплоподвода при горении.

Согласно уравнению энергии для движущегося потока выделяющееся при горении тепло расходуется на повышение внутренней и механической энергии. При этом газ с повышенной температурой и скоростью после подогрева конвектирует к выходу, а давление, в силу наличия упругих свойств среды, распространяется и вниз и вверх по потоку соответственно со скоростью $(a + W)$ и $(a - W)$, где a – скорость звука, формируя тем самым волны давления и скорости, w – скорость газового потока.

Известен критерий Рэлея [11], позволяющий для известного распределения параметров потока определить мощность акустического излучения (A) камеры сгорания при горении, а именно для сосредоточенного фронта пламени: термоакустические колебания возникают, если скалярное произведение векторов колебательных составляющих теплоподвода и давления равно:

$$A = k \cdot \delta Q \cdot \delta p \cdot \cos \varphi > 0, \text{ т.е. } \varphi < \pi / 2 \quad (1)$$

где A – мощность акустического излучения, k – коэффициент пропорциональности, δQ – амплитуда пульсации теплоподвода, δp – приращение давления, φ – сдвиг фаз (фазовый угол между векторами колебательных составляющих теплоподвода и давления на круговой диаграмме).

В случае когда $A > R$, где R – количество поглощаемой энергии (краевые условия на концах трубы), и выполнения критерия Рэля амплитуда пульсаций давления будет увеличиваться. Поскольку волны давления и скорости распространяются вверх и вниз по потоку, то их воздействие в первом случае на смесеобразование приводит к работе механизма положительной обратной связи, способствующего возникновению автоколебаний (виброгорению) при выполнении критерия Рэля с амплитудой, соответствующей условию $A = R$.

Упрощенно можно рассматривать гомогенный факел как сосредоточенный фронт пламени (область теплоподвода) благодаря хорошему предварительному перемешиванию смеси в премиксере и, соответственно, с пульсациями давления, генерируемыми в основном амплитудой пульсации теплоподвода δQ , т.е. с увеличением режима работы ГТД амплитуда пульсаций также увеличивается.

В отличие от гомогенного, диффузионный факел из-за «плохого» перемешивания (существенной неоднородности состава смеси), обусловленного выполнением функции поддержания горения, генерирует распределенный в пространстве фронт пламени с множеством источников теплоподвода, тем самым обеспечивая пучок фазовых соотношений ϕ при генерации пульсаций, включая условия противофаз взаимодействия акустических волн, что приводит к подавлению пульсаций давления. В этом случае влияние режимных факторов, включая долю топлива в пилотном контуре (PFR – pilot fuel ratio), уменьшается.

Таким образом, становится возможным сформировать количественный критерий принадлежности факела преимущественно к гомогенному или диффузионному типу (с соответствующими уровнями эмиссии оксидов азота), используя коэффициенты корреляции между измеряемыми параметрами двигателя, включая PFR, и пульсациями давления и на его основе оценивать статистическое распределение концентраций топливовоздушной смеси.

Анализ экспериментальных данных

В качестве объекта исследования рассмотрим малоэмиссионную камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ) мощностью 16 МВт [12]. Камера сгорания состоит из двенадцати жаровых труб с предварительным смешением воздуха и топлива (метана). Особенности газодинамической схемы этой малоэмиссионной камеры сгорания являются низкий уровень перепада давления на фронтальном устройстве и организация зоны обратных токов за центральным плохообтекаемым телом, по центру которого расположен пилотный (диффузионный) факел, поддерживающий горение. Соответственно, основной (гомогенный факел) формируется вокруг центрального тела. Топливоздушная смесь гомогенного контура предварительно перемешивается в кольцевом премиксере и, строго говоря, не является гомогенной из-за малого расстояния пути перемешивания. Вид малоэмиссионной камеры сгорания ГТУ-16 в разрезе приведен на рис. 1.

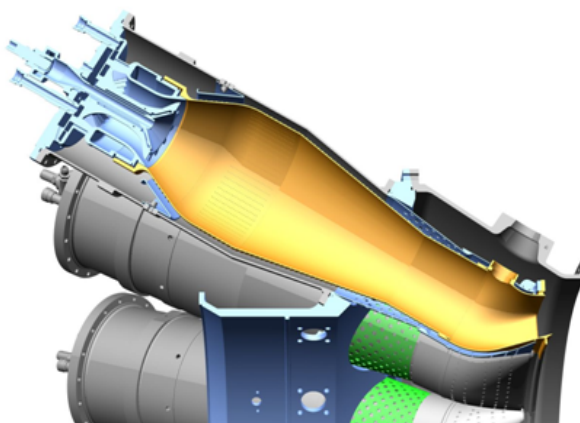


Рис. 1. Вид малоэмиссионной камеры сгорания ГТУ-16 в разрезе

В процессе доводки этой камеры сгорания проводились различные конструктивные изменения. Рассмотрим четыре варианта конструкции камеры сгорания (базовый принцип организации смешения и горения сохранялся) и их отражение в матрице коэффициентов корреляции. Обозначим эти варианты сборок как 1, 2, 3 и 4.

Расчет корреляции входных x_i и выходных y_i данных ведется на основе определения простого коэффициента корреляции Пирсона [13–15]:

$$r = \frac{1}{n\sigma_x\sigma_y} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (4)$$

где n – размерность массива данных; x_i и \bar{x} – текущее значение и математическое ожидание некоторого входного параметра камеры сгорания, y_i и \bar{y} – текущее значение и математическое ожидание некоторого выходного параметра камеры сгорания; σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения входного и выходного сигнала от математического ожидания.

С помощью разработанного программного обеспечения Python (v3.6.9) на основе расчета простого коэффициента Пирсона проведен анализ корреляции между измеренными входными и выходными величинами [16].

На рис. 2 представлены результаты обработки экспериментальных данных всех четырех вариантов камеры сгорания с помощью коэффициентов корреляции. Здесь на оси абсцисс последовательно представлены параметр режима работы камеры сгорания (температура газа T_r) и относительный расход топлива через пилотный контур (PFR). Соответственно, по оси ординат расположены уровни двойных амплитуд пульсаций давления в жаровых трубах с первой по двенадцатую (2A_RAV1...12). Знаки и уровни коэффициентов корреляции между перечисленными параметрами обозначены цветом (синий – отрицательное значение, красный – положительное) с различной интенсивностью цвета (в зависимости от величины модуля).

Коэффициент корреляции расхода топлива через пилотный контур (PFR) с уровнем эмиссии оксидов азота в выбранных вариантах сборок высок и составляет $r = 0,88$.

Как видно из представленных на рис. 2 матриц, каждый вариант (сборка) камеры сгорания имеет индивидуальный портрет в виде матрицы коэффициентов корреляции с некоторыми общими свойствами, а именно ожидаемым сильным влиянием PFR на уровень эмиссии оксидов азота (чем выше уровень PFR, тем выше эмиссия) и пульсации давления (чем выше уровень PFR, тем меньше амплитуда пульсаций давления).

Анализ показал, что исследуемая камера сгорания в первом варианте имела существенную неоднородность процессов горения по жаровым трубам с соответствующими показателями эмиссии выше проектной из-за близкого к диффузионному режиму горения в более чем половине жаровых труб. Последнее объясняется отмеченной неоднородностью перемешивания топлива с воздухом в премиксере из-за малых перепадов давления на фронтных устройствах. Второй вариант камеры сгорания продемонстрировал существенное приближение к гомогенному режиму горения и уменьшению неоднородности по жаровым трубам. Однако из-за возникших проблем с тепловым состоянием конструкции были внесены изменения, которые, как показывает матрица третьего варианта, привели к ухудшению и гомогенности процесса. Наконец, в четвертом варианте удалось обеспечить как проектные показатели по эмиссии, так и приемлемое тепловое состояние конструкции.

2A_RAV1	0.14	-0.09	0.57	-0.42	0.13	-0.38	0.58	-0.55
2A_RAV2	0.073	-0.088	0.49	-0.43	-0.21	-0.1	0.51	-0.49
2A_RAV3	-0.15	-0.057	0.61	-0.57	-0.1	-0.23	0.18	-0.17
2A_RAV4	-0.28	0.18	0.46	-0.39	0.3	-0.42	0.57	-0.54
2A_RAV5	-0.044	0.0035	0.35	-0.29	0.16	-0.28	0.39	-0.43
2A_RAV6	-0.047	0.16	0.5	-0.52	0.69	-0.57	0.39	-0.37
2A_RAV7	0.14	-0.091	0.4	-0.38	-0.18	-0.17	0.19	-0.15
2A_RAV8	0.18	-0.074	0.31	-0.27	-0.35	0.0023	0.57	-0.55
2A_RAV9	-0.00048	-0.077	0.44	-0.49	0.45	-0.48	0.23	-0.19
2A_RAV10	-0.26	0.13	0.15	-0.18	0.059	-0.33	0.58	-0.58
2A_RAV11	0.16	0.005	0.4	-0.38	0.15	-0.42	0.55	-0.51
2A_RAV12	-0.16	0.3	0.39	-0.31	0.41	-0.48	0.44	-0.46
	T_r	PFR	T_r	PFR	T_r	PFR	T_r	PFR
	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4	

Рис. 2. Матрицы коэффициентов корреляции между пульсациями давления в двенадцати жаровых трубах камеры сгорания (2A_RAV1...12) и температурой газа (T_r) и относительным расходом топлива через пилотный контур (PFR)

В количественном виде для рассматриваемых случаев (сборки 1, 2, 3 и 4) ГТУ 16 МВт мы видим для первой сборки практически во всех жаровых трубах диффузионное горение плохо перемешанной смеси (коэффициент корреляции по двенадцати трубам меняется в диапазоне $r \in [-0,09; +0,3]$).

Для второй сборки наблюдаются высокий коэффициент корреляции ($r = -0,57$) для третьей (RAV3) жаровой трубы ($r = -0,57$) и шестой (RAV6) жаровой трубы ($r = -0,52$).

Соответственно, для третьей сборки наиболее близкий к гомогенному процесс наблюдается в шестой (RAV6), девятой (RAV9) и двенадцатой (RAV12) жаровых трубах (коэффициенты корреляции $r = -0,57$ и $r = -0,48$ соответственно).

Наконец, для четвертой сборки процесс гомогенного горения имеет место во всех жаровых трубах (хотя и с пониженным по отношению к максимальным достигнутым значениям – коэффициенты корреляции $r \approx -0,6$ и $r \approx -0,5$ соответственно), за исключением третьей (RAV3), седьмой (RAV7) и девятой (RAV9) труб (коэффициенты корреляции $r \approx -0,2$). Максимальный коэффициент корреляции $r = -0,58$ в десятой (RAV10) жаровой трубе.

Таким образом, матрицы коэффициентов корреляции дают портрет и однородности смеобразования, и степени гомогенности горения в целом. Видно, что наибольшую неоднородность имеет первая сборка, а наименьшую – четвертая.

Это позволяет рассматривать коэффициент корреляции как количественный критерий принадлежности процесса горения преимущественно к гомогенному или диффузионному типу перемешивания смеси, что, в свою очередь, позволяет оценивать качество организации горения без измерения эмиссии.

На рис. 3 представлено сравнение экспериментальных показателей эмиссии оксидов азота в эксплуатационном цикле работы двигателя с данными, полученными на имитаторе – математической модели, построенной на базе уравнения Зельдовича. Количество измерений эмиссии (выборка) $n = 217$, временной период $t = 60$ дней.

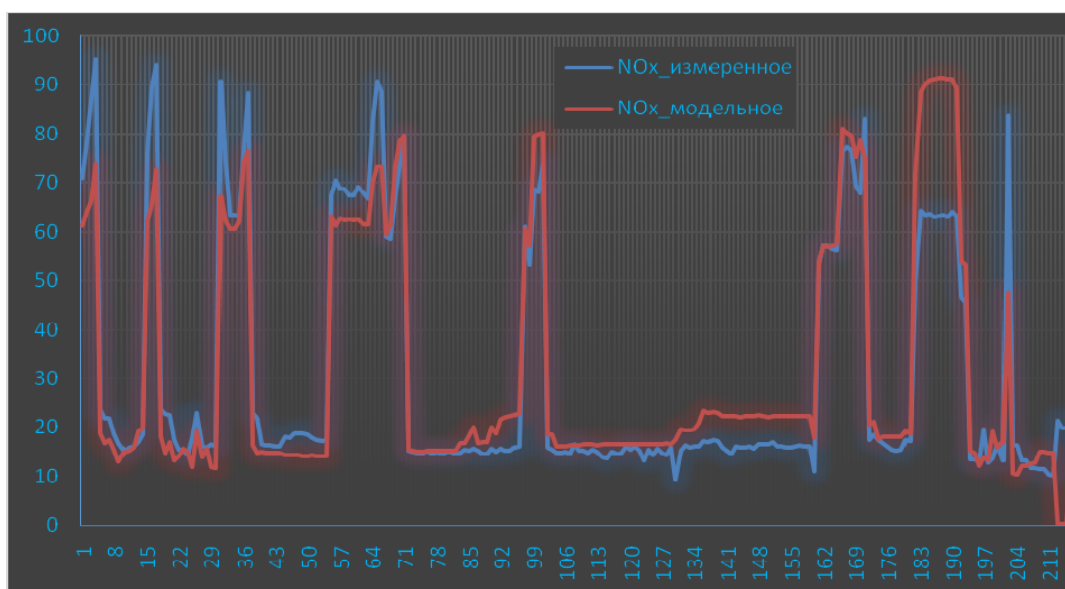


Рис. 3. Сравнение измеренных значений эмиссии оксидов азота, %, во время эксплуатационного цикла двигателя (голубой цвет) с полученными значениями на математической модели, построенной на базе уравнения Зельдовича (оранжевый цвет). Количество измерений эмиссии $n = 217$, временной период $t = 60$ дней

Проведенные исследования показали, что погрешность модели, построенной на базе уравнения Зельдовича, не превышает 15 % на основных (малоэмиссионных) режимах работы, что позволяет использовать данную математическую модель в качестве виртуального сенсора эмиссии оксидов азота для мониторинга эмиссии в режиме реального времени и управления расходом топлива пилотного контура.

Заключение

Полученные данные позволяют оценивать не только качество процесса горения в малоэмиссионной камере сгорания без трудоемкого измерения эмиссии, но и уточнять математические модели, лежащие в основе виртуального сенсора эмиссии, используемого в системе управления.

Уточнение здесь касается в первую очередь учета неоднородности процесса в жаровых трубах, что позволяет перейти от допущения геометрической и газодинамической идентичности жаровых труб к их фактической неоднородности.

В этом случае экспериментально получаемые количественные значения коэффициентов корреляции позволяют назначать среднеквадратические отклонения от математического ожидания состава топливоздушная смеси для индивидуальной жаровой трубы или горелки. Эти значения используются в математической модели генерации оксидов азота на основе уравнения Зельдовича.

В качестве связи среднеквадратического отклонения состава смеси с коэффициентом корреляции между PFR и пульсациями давления можно использовать линейную зависимость:

$$\sigma = 0,3k + 0,3, \quad (5)$$

где 0,3 – максимальное значение среднеквадратического отклонения состава смеси для диффузионного факела ($k = 0$). Соответственно $\sigma = 0$ для идеального гомогенного факела ($k = -1$).

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность применения предложенного количественного критерия оценки принадлежности процесса горения преимущественно к гомогенному или диффузионному типу перемешивания смеси. Предложенный критерий позволяет оценивать качество организации горения без измерения эмиссии в малоэмиссионных камерах сгорания, что упрощает процесс разработки и эксплуатации адаптивных систем управления эмиссией наземных газотурбинных установок и газотурбинных авиационных двигателей.

Библиографический список

1. Model Based Prediction of Off-Design Operation Condition NO_x Emission From DLE Gas Turbine Combustors / M. Lauer, J. Färber, F. Reiß, J.E. Masalme // Proc. of ASME Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2017) Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina), GT2017-63063, V04AT04A003, 11 p.
2. Vanderhaegen E., Deneve M. Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network // Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2010) Vol. 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B (June 14–18, 2010, Glasgow, GB), GT2010-22899, P.769–775.
3. Lamont W.G., Roa M., Lucht R. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine Combustion Rig // Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2014) Vol. 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany), GT2014-25030, V04AT04A002, 10 p.
4. NO_x Emission Modelling for Lean Premixed Industrial Combustors With a Diffusion Pilot Burner / J.M. Reumschüssel, J.G. Von SaldernR, T.L. Kaiser, etc. // Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2021) Vol. 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 7–11, 2021, Virtual, Online), GT2021-59071, V03AT04A035. – 13 p.
5. Августинovich В.Г., Кузнецова Т.А., Нугуманов А.Д. Разработка нейронных сетей мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 8. – С.7–17.
6. Концепция управления малоэмиссионной камерой сгорания авиационного ГТД и её эксперт-модель для обучения нейронной сети смарт-регулятора / В.Г. Августинovich, Т.А. Кузнецова, А.И. Фатыков, А.Д. Нугуманов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 53. – С. 5–19.
7. Peters N. Turbulent Combustion. 1st edition. – Cambridge, GB: Cambridge University Press, 2000. – 324 с.
8. Цирельман Н.М. Техническая термодинамика. – СПб.: Лань, 2021. – 352 p.
9. Цирельман Н.М. Конвективный теплоперенос: моделирование, идентификация, интенсификация. – СПб.: Лань, 2018. – 469 с.
10. Turbulence Levels are High at Combustor-Turbine Interface / C.M. Cha, P.T. Ireland, P.A. Denman, V. Savarianandam // Proc. ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2012) Vol. 8: Turbomachinery, Parts A, B, and C (June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark), GT2012-69130. – P. 1371–1390.
11. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. – М.: Физматгиз, 1961. – 500 с.
12. Нугуманов А.Д. Методика экспериментальной доводки низкоперепадных камер сгорания ГТУ по экологическим нормам: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2022. – 132 с.
13. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
14. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.

15. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика, 12-е изд. – М.: Юрайт, 2020. – 479 с.
16. Бейдер Д. Чистый Python. Тонкости программирования для профи. – СПб.: Питер, 2018. – 214 с.

References

1. Lauer M., Färber J., Reiß F., Masalme J.E. Model Based Prediction of Off-Design Operation Condition NO_x Emission From DLE Gas Turbine Combustors. Proc. of ASME Turbomachinery Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2017) Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina), GT2017-63063, V04AT04A003, 11 p.
2. Vanderhaegen E., Deneve M. Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network. Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2010) Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B (June 14–18, 2010, Glasgow, GB), GT2010-22899, pp. 769-775.
3. Lamont W.G., Roa M., Lucht R. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine Combustion Rig. Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2014) Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany), GT2014-25030, V04AT04A002, 10 p.
4. Reumschüssel J.M., Von Saldern J.G.R., Kaiser T.L., etc. NO_x Emission Modelling for Lean Premixed Industrial Combustors With a Diffusion Pilot Burner. Proc. of the ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2021) Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions (June 7–11, 2021, Virtual, Online), GT2021-59071, V03AT04A035, 13 p.
5. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Nugumanov A.D. Razrabotka neyronnykh setey monitoringa i upravleniya emissiyey vrednykh veshchestv dlya gazoturbinnnykh gazoperekachivayushchikh agregatov i elektrostantsiy [Development of neural systems for monitoring and controlling emission of gas transmission and power gas turbine units]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2019, vol. 330, iss. 8, pp. 7-17.
6. Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Fatikov A.I., Nygymanov A.D. Kontseptsiya upravleniya maloemissionnoi kameroi sgoraniya aviatsionnogo GTD I ee expert-model dlya obucheniya neyronnoi seti smart-regulyatora [The concept of control of a low-emission combustion chamber of an aircraft gas turbine engine and its expert model for training a neural network of a smart controller]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2018, no. 53, pp. 5-19.
7. Peters N. Turbulent Combustion. 1st edition. Cambridge, GB: Cambridge University Press, 2000, 324 p.
8. Tsirelman N.M. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics]. Saint Petersburg: Lan, 2021, 352 p.
9. Tsirelman N.M. Konvektivnyy teplomassopereenos: modelirovaniye, identifikatsiya, intensivatsiya [Convective heat and mass transfer: modeling, identification, intensification]. Saint Petersburg: Lan, 2018, 469 p.
10. Cha C.M., Ireland P.T., Denman P.A., Savarianandam V. Turbulence Levels are High at Combustor-Turbine Interface. Proc. ASME Turbine Technical Conference and Exposition (Turbo Expo 2012) Volume 8: Turbomachinery, Parts A, B, and C (June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark), GT2012-69130, pp. 1371-1390.
11. Raushenbah B.V. Vibratsionnoe gorenje [Vibratory combustion]. Moscow: *Phisimatgis*, 1961, 500 p.
12. Nugumanov A.D. Metodika eksperimentalnoy dovodki nizkoperepadnykh kamer sgoraniya GTU po ekologicheskim normam: Dissertatsiya na soiskaniye stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Methodika eksperimentalnoi dovodki nizkoperepadnykh kamer sgoraniya GTU po ekologicheskim normam]. Ph. D. thesis, Perm National Research Polytechnic University, Perm, 2022, 132 p.
13. Bendat J., Piersol A. Prikladnoi analys sluchainih dannih [Analysis and Measurement Procedures]. Moscow, *Mir*, 1989, 540 p.
14. Bendat J., Piersol A. Primeneniya korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza [Applications of correlation and spectral analysis]. Moscow, *Mir*, 1983, 312 p.
15. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika, 12-ye izd. [Probability Theory and Mathematical Statistics 12th ed.]. Moscow, *Yurayt*, 2020, 479 p.
16. Bader Dan. Chisty Python. Tonkosti programmirovaniya dlya profi [Pure Python. The subtleties of programming for the pros]. Saint Petersburg: *Piter*, 2018, 214 p.

Об авторах

Августинович Валерий Георгиевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: augustinovicv3@gmail.com).

Кузнецова Татьяна Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

Фатыков Альмир Илгизович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: fatykov-ai@avid.ru).

Фофанов Владимир Олегович (Пермь, Россия) – руководитель отдела информационных технологий, Центр профессионального развития «Европейский» (Пермь, 614077, б-р Гагарина, 54а, e-mail: vovafofanov@gmail.com).

About authors

Valery G. Avgustinovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: august.valery@yandex.ru).

Tatyana A. Kuznetsova (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Design and Technologies in Electronics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: tatianaakuznetsova@gmail.com).

Almir I. Fatykov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: fatykov-ai@avid.ru).

Vladimir O. Fofanov (Perm, Russian Federation) – Head, IT Department, Professional Development Center "European" (54a, Gagarin boulevard, 614077, Perm, e-mail: vovafofanov@gmail.com).

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» в рамках договора научно-исследовательской работы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 19.12.2022

Одобрена: 20.01.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Оценка гомогенности топливовоздушной смеси в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью корреляции пульсаций давления и расхода пилотного топлива / В.Г. Августинович, Т.А. Кузнецова, А.И. Фатыков, В.О. Фофанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 33–41. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.03

Please cite this article in English as: Avgustinovich V.G., Kuznetsova T.A., Fatykov A.I., Fofanov V.O. Evaluation of fuel-air mixture homogeneity in low emission gas turbine engine combustor by aid of pressure pulsations and pilot flow fuel correlation. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 33-41. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.03