

УДК 621.43.056

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705

**Для цитирования:** Бакланов А. В. Влияние особенностей конструкции камер сгорания двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ на содержание углекислого газа в продуктах сгорания // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 697–705. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705.

**For citation:** Baklanov A. V. [Concentration of carbon dioxide in products of combustion of GTE NK-16ST and NK-16-18ST]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 697–705. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-697-705.

## **Влияние особенностей конструкции камер сгорания двигателей НК-16СТ, НК-16-18СТ на содержание углекислого газа в продуктах сгорания**

А. В. Бакланов

АО «Казанское моторостроительное производственное объединение»  
Российская Федерация, 420036, г. Казань, ул. Дементьева, 1  
E-mail: andreymbaklanov@bk.ru

*В данной работе рассмотрена конструкция двух камер сгорания газотурбинного двигателя, работающего на природном газе. В одной камере сгорания имеется 32 горелки, в другой – 136 форсунок, расположенных в два яруса во фронтальном устройстве.*

*Основным фактором, влияющим на глобальное потепление, считаются значительные объемы выбросов парниковых газов, в первую очередь углекислого ( $CO_2$ ), выделяющихся в том числе при работе газотурбинных двигателей и энергетических установок. Снижение уровня  $CO_2$  путем формирования набора конструктивных мероприятий в камере сгорания – одна из актуальных задач двигателестроения, которую необходимо решить для удовлетворения современных экологических требований, предъявляемых к газотурбинным двигателям, служащим приводами нагнетателей газоперекачивающих агрегатов. Представленное исследование посвящено анализу влияния изменения конструкции камеры сгорания на снижение уровня  $CO_2$  в выхлопных газах газотурбинного двигателя НК-16СТ. Рассмотрено две модификации. Первый вариант – серийная камера сгорания с организацией диффузионного горения, второй – модернизированная с измененным фронтальным устройством. Каждая из рассмотренных камер была испытана в составе двигателя. Во время исследования непосредственно в шахте выхлопа производился отбор продуктов сгорания и определялись их концентрации, в том числе содержание  $CO_2$ . В результате проведенных работ была подтверждена возможность уменьшения уровня концентрации  $CO_2$  в продуктах сгорания двигателя до 20 % без ухудшения его параметров. Такого эффекта удалось достигнуть за счет снижения полноты сгорания топлива в камере сгорания. Полученные данные по изменению концентрации  $CO_2$  могут быть полезны при выборе наиболее подходящего режима работы двигателя во время его эксплуатации, а представленные подходы к организации процессов горения – использованы разработчиками при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей на природном газе.*

*Ключевые слова:* выброс углекислого газа, камера сгорания, газотурбинный двигатель, продукт сгорания, газоперекачивающий агрегат.

## Concentration of carbon dioxide in products of combustion of GTE NK-16ST and NK-16-18ST

A. V. Baklanov

JSC “Kazan motor production association”  
1, Dementieva St., Kazan, 420036, Russian Federation  
E-mail: andreybaklanov@bk.ru

*This paper considers the design of two combustion chambers of a gas turbine engine running on natural gas. One combustion chamber has 32 burners, and the other has 136 nozzles located in two rows in the flame tube head.*

*A major contributor to global warming is considered to be the significant emissions of greenhouse gases, primarily CO<sub>2</sub>, including those emitted by gas turbine engines and power plants. The reduction of carbon dioxide levels by developing a set of structural measures in the combustion chamber is one of the urgent tasks of engine construction which requires a solution in order to meet modern environmental requirements for gas turbine engines serving as blower drives for gas compressor units. The presented research is dedicated to the analysis of influence of changes in combustion chamber design on reduction of CO<sub>2</sub> level in exhaust gases of gas turbine engine NK-16ST. Two modifications of the combustion chamber are considered. The first one was a serial combustion chamber with diffusion combustion, the second one was a modernized combustion chamber with a modified front device. Each of the chambers considered was tested as part of the engine. During the study, combustion products were sampled directly in the exhaust shaft and their concentrations, including the CO<sub>2</sub> content, were determined. As a result of this work, it was confirmed that there is a possibility to reduce the concentration of CO<sub>2</sub> in the engine combustion products up to 20 % without affecting the engine parameters. This reduction in carbon dioxide content was made possible by reducing the completeness of fuel combustion in the combustion chamber. The obtained data on changes in CO<sub>2</sub> concentration can be useful in selecting the most suitable mode of engine operation, and the presented approaches to combustion processes organization can be used by developers in designing combustion chambers of natural gas-fired gas turbine engines.*

*Keywords: carbon dioxide emission, combustion chamber, gas turbine engine, combustion product, gas compressor unit.*

### Введение

Камера сгорания – один из основных элементов, определяющих надежность и эффективность работы газотурбинных двигателей (ГТД). Рабочий процесс камеры сгорания ГТД очень сложен и определяется множеством факторов: аэродинамикой потоков воздуха и газа, характером подачи топлива и его смешения с воздухом и испарения, воспламенением, стабилизацией пламени, условиями массо- и теплообмена, закономерностями горения по длине камеры сгорания. Несмотря на существенные различия в общей компоновке и большое разнообразие в конструкторском оформлении отдельных элементов камер сгорания различных двигателей, они в своей основе имеют общие принципы организации рабочего процесса [1].

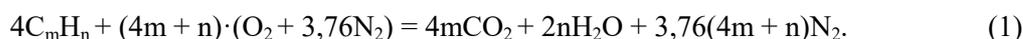
Особенностью процесса сгорания в газотурбинном двигателе является то, что суммарный состав смеси топлива с воздухом лежит за пределами воспламеняемости, а температура цикла ниже температуры мгновенного воспламенения любых углеводородных топлив. Горение в двигателе происходит в потоке воздуха, скорость которого значительно выше скорости распространения пламени углеводородных топлив. Скорость потока в камерах сгорания стационарных двигателей составляет 30–80 м/с, авиационных – до 50–120 м/с. К тому же сгорание должно происходить в весьма ограниченном объеме, а потому с высокой скоростью тепловыделения при очень быстром протекании процессов смешения и горения. Независимо от указанных ограничений, в двигателе необходимо обеспечить устойчивое горение, высокую полноту сгорания, воспламеняемость и низкие выбросы токсичных веществ.

В настоящее время вопросы снижения парниковых газов, в частности выбросов  $\text{CO}_2$ , в выхлопных газах ГТД являются актуальными для энергетики и газотранспортной отрасли. Особый интерес представляет влияние организации горения в камере сгорания на образование  $\text{CO}_2$  в зависимости от режимов работы ГТД [2].

Современные газообразные топлива представляют собой смесь различных углеводородных соединений. Условную химическую формулу такого топлива можно представить в виде  $\text{C}_m\text{H}_n$ . Для метана  $m \sim 1$ ,  $n \sim 4$ .

В технических расчетах атмосферный воздух принимают как смесь азота и кислорода, тогда условную химическую формулу воздуха можно представить соотношением  $(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$ . Коэффициент 3,76 показывает, что в воздухе на 1 молекулу кислорода приходится примерно 3,76 молекул азота.

Химическую реакцию окисления углеводородного топлива в воздухе можно записать символически в виде стехиометрического уравнения



Стехиометрическое уравнение записано в предположении полного превращения топлива в основные продукты сгорания и полной химической инертности атмосферного азота. Стехиометрическое уравнение дает макроскопическое описание процесса окисления топлива и позволяет определить такие важные характеристики, как стехиометрическое соотношение для топлива  $L_0$  и состав продуктов полного сгорания, а именно:

$$L_0 = \frac{(4m + n)(\mu_{\text{O}_2} + 3,76 \cdot \mu_{\text{N}_2})}{4(m \cdot \mu_{\text{C}} + n \cdot \mu_{\text{H}})} = \frac{34,32(4m + n)}{12m + n} \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса соответствующего вещества,

$$C_{\text{CO}_2} = \frac{4m \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%, \quad (3)$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2n \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%, \quad (4)$$

$$C_{\text{N}_2} = \frac{3,76(4m + n) \cdot 100}{4m + 2n + 3,76(4m + n)} \%. \quad (5)$$

Для метана  $m = 1$ ,  $n = 4$ , то

$$L_0 \approx 17,2; C_{\text{CO}_2} \approx 9,5; C_{\text{H}_2\text{O}} \approx 19; C_{\text{N}_2} \approx 71,5 \%$$

В процессе окисления углеродосодержащих топлив окись углерода  $\text{CO}$  образуется как промежуточное вещество. Превращение  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$  в большей степени определяется элементарной реакцией [3]



Так как эта реакция является единственной, определяющей превращение  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ , то можно сделать вывод, что весь углерод, первоначально содержащийся в топливе, превращается в  $\text{CO}_2$ . Отсюда следует, что содержание  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания будет определяться завершённостью или незавершённостью реакции его окисления.

### Объект исследования

Для определения влияния конструкции камеры сгорания на содержание  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания, в данной работе рассматривается два типа камер сгорания. Одна является серийной для двигателя НК-16СТ, другая – для двигателя НК-16-18СТ.

В серийной камере сгорания ГТД НК-16СТ организован диффузионный принцип сжигания топлива. Камера (рис. 1) состоит из наружного 1 и внутреннего 2 корпусов, коллектора 3, трубопроводов 4 для подачи топлива от коллектора к форсункам 5, жаровой трубы 6, включающей в себя кожухи 7 с нанесенными отверстиями 8 и патрубками смесителей 9. В кольцевом фронтальном устройстве 10 размещены 32 вихревые горелки 11. Жаровая труба – кольцевая – состоит из кольцевых секций, между которыми сформирован кольцевой канал для подачи охлаждающего воздуха, что обеспечивает конвективно-пленочное охлаждение стенок [4].

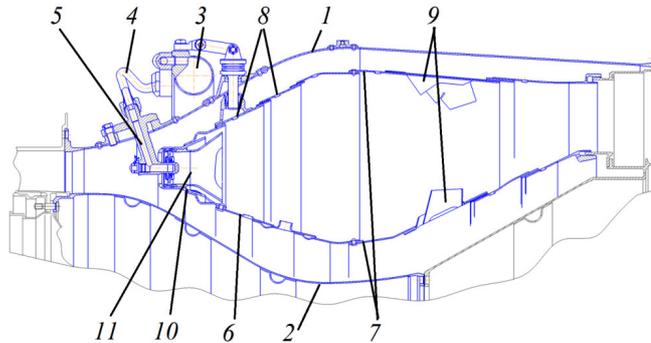


Рис. 1. Камера сгорания двигателя НК-16СТ

Fig. 1. Combustion Chamber of the Gas-turbine Engine NK-16ST

В каждой вихревой горелке организован индивидуальный подвод топливного газа посредством форсунок, обеспечивающих струйную подачу газа [5].

Фронтальное устройство жаровой трубы ГТД НК-16-18СТ (рис. 2) содержит кольцевую головку 1, включающую наружный и внутренний топливный коллектор 2. На стенке наружного топливного коллектора равномерно расположены четыре подвода, необходимые для подачи газа во внутреннюю полость коллекторов. Полости коллекторов соединяются при помощи каналов 3, расположенных во фронтальном устройстве. Так же в нем в шахматном порядке в два ряда нанесены фигурные окна 4 с центральным отверстием и стойки крепления форсунок 5 [6; 7].

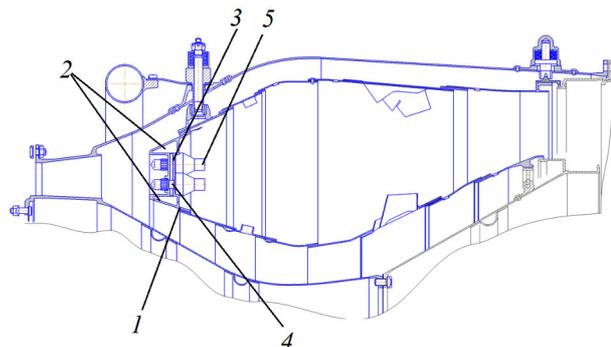


Рис. 2. Камера сгорания двигателя НК-16-18СТ

Fig. 2. Combustion Chamber of the Gas-turbine Engine NK-16-18ST

Каждая камера была испытана в составе газотурбинного двигателя. Стенд (рис. 3), где устанавливался двигатель, состоит из воздухоподводящей выравнивающей трубы, вход в которую предохраняет защитная сетка. Она необходима для предотвращения попадания посторонних частиц в трактовую часть двигателя. Для осуществления транспортировки отработавших газов в шахту выхлопа в выходной части двигателя установлено выходное устройство. В качестве загрузочного устройства свободной турбины применялся воздушный компрессор – пневмомотор [8].

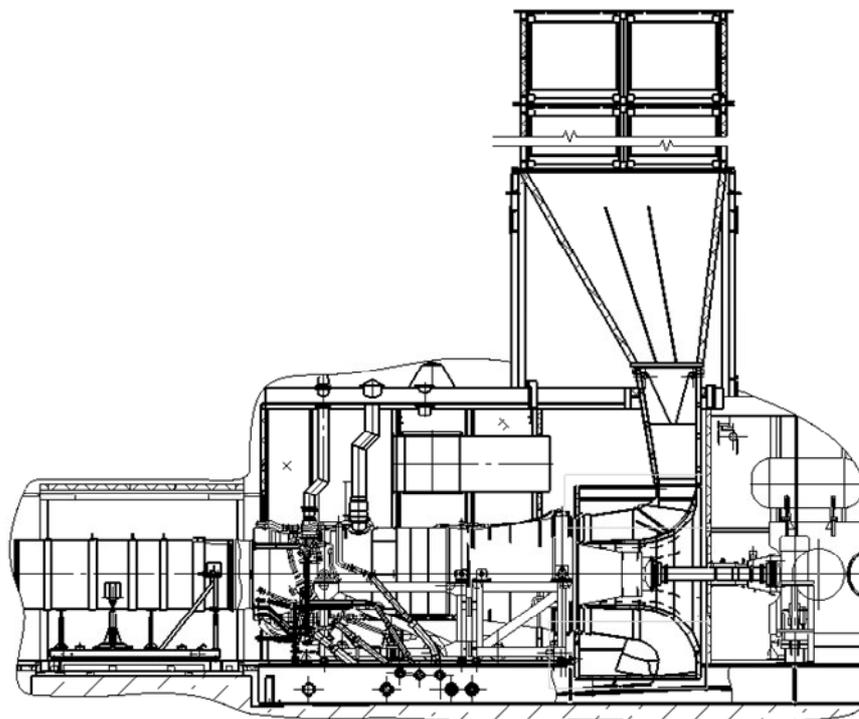


Рис. 3. Схема стенда

Fig. 3. Scheme of the Stand

Стенд оборудован необходимыми измерительными приборами. Оснащен масляной системой для выполнения смазки опор двигателя и агрегатов во время проведения испытаний. Для обеспечения запуска и подачи топливного газа к элементам топливопитания стенд содержит газовую систему. Контроль за параметрами двигателя и регулирование режимов его работы выполняется с пульта управления, оснащенного мониторами, на которые выводятся измеряемые параметры [9].

### Результаты испытаний

Во время испытаний выполнялся запуск двигателей и выход на режимы необходимые для построения дроссельной характеристики. На режимах выше 10 МВт, в соответствии со стандартом [10] в выхлопной шахте производился отбор проб продуктов сгорания и определялись концентрации токсичных веществ в них.

Для отбора проб использовался газоотборный зонд, погружаемый в специальное окно, выполненное в стенке выхлопной шахты, а для определения концентрации токсичных компонентов в продуктах сгорания использовался газоанализатор Testo 350. По измеренной величине концентрации кислорода ( $O_2$ ) в продуктах сгорания рассчитывается содержание  $CO_2$ :

$$c(CO_2) = \frac{c(CO_{2max})(21 - c(O_2))}{21}, \quad (7)$$

где  $c(CO_{2max})$  – максимальное значение концентрации  $CO_2$ , %; 21 – концентрация  $O_2$  в воздухе, %;  $c(O_2)$  – измеренная концентрация  $O_2$  в продуктах сгорания, %.

Согласно быстродействию прибора, время проведения одного измерения составляло 40 с. Обработанные газоанализатором данные выводились на экран, а также фиксировались при помощи печатного устройства, встроенного в газоанализатор [11].

Для перевода массовых концентраций  $CO_2$  из % в  $г/м^3$  принят ряд условий: температура выхлопных газов равна 618,15 К, давление выхлопных газов равно атмосферному при нормальных условиях и соответствует 101 325 Па.

Объем одного моль углекислого газа при температуре 618,15 К рассчитывается по формуле

$$V_{mCO_2T_r} = V_{mCO_2T_H} \left( \frac{T_r}{T_H} \right) \quad (8)$$

и составит 50,69 л, где  $T_r = 618,15$  К,  $T_H = 273,15$  К,  $V_{mCO_2T_H} = 22,40$  л – объем 1 моль  $CO_2$  при 273,15 К.

Так как масса 1 моль  $CO_2$   $M_{mCO_2}$  равна 44 г, то масса 1 л будет рассчитана по соотношению  $M_{mCO_2}/V_{mCO_2T_r}$  и равна 0,868 г/л. Объем 1 % от 1 м<sup>3</sup> составляет 10 л. Отсюда следует, что масса 1 % от 1 м<sup>3</sup> равна 10 л · 0,868 г/л и равна 8,68 г [12].

Данные по содержанию  $CO_2$  в продуктах сгорания в % и г/м<sup>3</sup> в зависимости от режима работы двигателей сведены в таблицу.

Из рис. 4 следует, что с увеличением режима работы двигателя содержание углекислого газа  $CO_2$  в выхлопных газах растет, что связано с увеличением расхода топлива и воздуха с набором мощности, а значит увеличением расхода продуктов сгорания.

В выхлопных газах двигателя НК-16СТ уровень содержания углекислого газа  $CO_2$  ниже на ≈ 20 % по сравнению с двигателем НК-16-18СТ.

Если придерживаться ранее сделанного предположения, что единственным механизмом снижения  $CO_2$  является не полное завершение реакции окисления, то снижение  $CO_2$  должно приводить к увеличению выбросов  $CO$ , что подтверждается данными измерений (рис. 5).

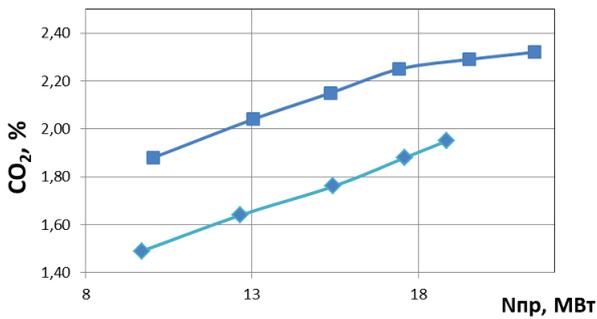


Рис. 4. Содержание углекислого газа  $CO_2$  в продуктах сгорания:  
♦ – двигатель НК-16СТ и ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 4. Content of  $CO_2$  carbon dioxide in combustion products:  
♦ – engine NK-16CT и ■ – engine NK-16-18CT

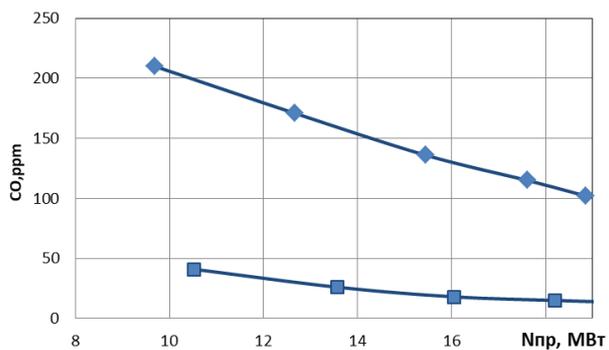


Рис. 5. Содержание оксидов углерода  $CO$  в продуктах сгорания:  
♦ – двигатель НК-16СТ и ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 5. Content of carbon oxides in combustion products:  
♦ – engine NK-16CT и ■ – engine NK-16-18CT

Для дальнейшего анализа представлены массовые концентрации  $CO_2$  для каждого режима работы двигателей НК-16-18СТ и НК-16СТ, а также выполнен их перевод в г/м<sup>3</sup> по ранее выведенному соотношению 1 % = 8,68 г/м<sup>3</sup>.

Содержание  $CO_2$  в зависимости от режима работы двигателей

НК-16-18СТ					
	$n_{НДпр}$	$N_{пр}$	CO, ppm	CO <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup>
1	4900	10,515	41	1,71	14,84
2	5100	13,577	26	1,89	16,41
3	5250	16,064	18	2,00	17,36
4	5350	18,201	15	2,10	18,22
5	5450	20,133	13	2,20	19,09
6	max	22,011	13	2,25	19,53

НК-16СТ					
	$n_{\text{НДпр}}$	$N_{\text{пр}}$	CO, ppm	CO <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , г/м <sup>3</sup>
1	4900	9,69	210	1,49	12,93
2	5100	12,66	171	1,64	14,24
3	5250	15,451	136	1,76	15,28
4	5350	17,61	115	1,88	16,32
5	max	18,864	102	1,95	16,93

Из рис. 4 и таблицы видно, что двигатель НК-16СТ с серийной камерой сгорания имеет уровень концентрации CO<sub>2</sub> ниже, чем двигатель НК-16-18СТ с камерой сгорания, имеющей многофорсуночное фронтное устройство [13].

Для расчета полноты сгорания топлива использована зависимость [14]:

$$\eta_{\Gamma} = 1 - (0,20175 \cdot EI_{\text{CO}} + EI_{\text{CH}_4}) \cdot 10^{-3}, \quad (9)$$

где  $EI_{\text{CO}}$  – индекс эмиссии окиси углерода;  $EI_{\text{CH}_4}$  – индекс эмиссии метана; значение 0,20175 – это коэффициент, учитывающий отношение низшей теплоты сгорания окиси углерода  $Q_{\text{H}}^{\text{CO}}$  к низшей теплоте сгорания метана  $Q_{\text{H}}^{\text{CH}_4}$ , которые составляют  $Q_{\text{H}}^{\text{CO}} = 10096$  кДж/кг,  $Q_{\text{H}}^{\text{CH}_4} = 50042$  кДж/кг.

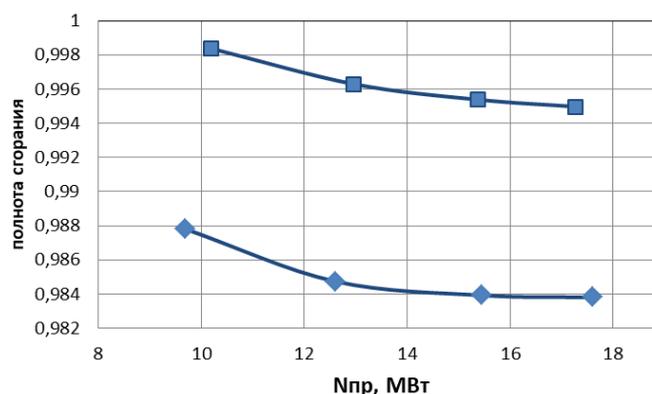


Рис. 6. Полнота сгорания топлива на различных режимах:  
 ◆ – двигатель НК-16СТ, ■ – двигатель НК-16-18СТ

Fig. 6. Completeness of Combustion of Fuel on various power setting:  
 ◆ – engine NK-16СТ и ■ – engine NK-16-18СТ

Индексы эмиссии  $EI_i$  для окиси углерода и метана рассчитываются при помощи уравнения

$$EI_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\text{в}}} (1 - \alpha_i \cdot L_0) \cdot \chi_i \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $L_0 = 17,2$  – ранее рассчитанный стехиометрический коэффициент сгорания метана (кг воздуха / кг топлива);  $\alpha_i$  – суммарный или местный коэффициент избытка воздуха;  $\mu_i$  – молярная масса определяемого токсичного вещества (CO, CH<sub>4</sub>), г/моль;  $\mu_{\text{в}}$  – молярная масса воздуха, г/моль;  $\chi_i$  – объемная доля токсичного вещества, ppm.

Изменение полноты сгорания характеризуется незначительным убыванием в пределах 0,5 % в диапазоне мощностей от 10 до 17 МВт, при этом на режиме 16 МВт средняя полнота для двигателя НК-16СТ составила  $\eta = 0,985$ , для двигателя НК-16-18СТ –  $\eta = 0,996$  (рис. 6).

## Заключение

Подтверждена возможность уменьшения уровня концентрации  $\text{CO}_2$  в продуктах сгорания двигателя до 20 % за счет снижения полноты сгорания топлива в камере сгорания.

Полученные данные по изменению концентрации  $\text{CO}_2$  с изменением режима работы двигателя могут быть полезны при выборе наиболее подходящего режима для минимизации  $\text{CO}_2$  во время его эксплуатации.

Представленные подходы к организации процессов горения могут быть использованы разработчиками при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на природном газе, для минимизации выбросов  $\text{CO}_2$  с обеспечением оптимума по  $\text{CO}$  и полноты сгорания.

## Библиографические ссылки

1. Lefebvre A. H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Am. Soc. Mech. Eng. 1984. Vol. 84, No. CONF-840611.
2. Бакланов А. В. Влияние изменения конструкции камеры сгорания на уровень  $\text{CO}_2$  в выхлопных газах газотурбинного двигателя НК-16СТ // Газовая промышленность. 2022. № 6 (834). С. 80–88.
3. Маркушин А. Н., Бакланов А. В. Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе ГТД // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 81–89.
4. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей / Е. А. Гриценко, В. П. Данильченко, С. В. Лукачев и др. Самара : СНЦ РАН, 2002. 527 с.
5. Бакланов А. В. Влияние геометрии горелки на характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2021. Т. 28, № 2. С. 86–95.
6. Features of commissioning a gas turbine unit with a low-emission combustion chamber / I. E. Vorotyntsev, D. D. Tyulkin, D. G. Fedorchenko, Yu. I. Tsybizov // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. P. 012002.
7. Бакланов А. В. Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2018. Т. 25, № 2. С. 73–85.
8. Бакланов А. В. Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2017. Т. 24, № 2. С. 57–68.
9. ГОСТ 28775–90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2005. 12 с.
10. Energy Efficient Engine Combustor Test Hardware–Detailed Design Report / D. L. Burrus, C. A. Charour, H. L. Foltz et al. NASA CR-168301.
11. Dodds W. J., Ekstedt E. E. Broad Specification Fuel Combustion Technology Program. Phase II, Final Report, 1989.
12. Lefebvre A. H. Influence of Fuel Properties on Gas Turbine Combustion Performance. AFWAL-TR-84-2104, 1985.
13. Анализ применимости моделей горения для расчёта многофорсуночной камеры сгорания ГТД / Б. Г. Мингазов, В. Б. Явкин, А. Н. Сабирзянов, А. В. Бакланов // Вестник Самарского гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. С. П. Королёва (нац. исслед. ун-та). 2011. № 5 (29). С. 208–214.
14. Канило П. М. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев : Наук. думка, 1987. 224 с.

## References

1. Lefebvre A. H. [Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency]. Am. Soc. Mech. Eng. 1984, Vol. 84, No. CONF-840611.

2. Baklanov A. V. [Impact of changing the combustion chamber design on the CO<sub>2</sub> concentration in the exhaust gases of the NK-16ST gas turbine engine]. *Gas industry*. 2022, No. 6 (834), P. 80–88 (In Russ.).
3. Markushin A. N., Baklanov A. V. [Investigation of the gas turbine engine combustion chamber workflow]. *Bulletin of the Samara university. Space equipment, technologies and mechanical engineering*. 2016, Vol. 15, No. 3, P. 81–89 (In Russ.).
4. Gritsenko E. A., Danilchenko V. P., Lukachev S. V. *Nekotoryye voprosy proyektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Some issues of the design of aircraft gas turbine engines]. Samara, 2002, 527 p.
5. Baklanov A. V. [Burner geometry impact of gas turbine engine combustion chamber characteristics]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2021, Vol. 28, No. 1, P. 86–95 (In Russ.).
6. Vorotyntsev I. E., Tyulkin D. D., Fedorchenko D. G., Tsybizov Yu. I. [Features of commissioning a gas turbine unit with a low-emission combustion chamber]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, Vol. 1891, P. 012002.
7. Baklanov A. V. [Controlling fuel combustion process by burner design change in gas turbine engine combustion chamber]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2018, Vol. 25, No. 2, P. 73–85 (In Russ.).
8. Baklanov A. V. [Low-emission combustion chamber of diffusion type employing micro flame burning process for converted aircraft gas turbine engine]. *Vestnik moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2017, Vol. 24, No. 2, P. 57–68 (In Russ.).
9. STO Gazprom 2-3.5-038-2005 Instructions for conducting control measurements of harmful emissions of gas turbine plants at compressor stations. Chelyabinsk, Center for Work Safety, 2005, 13 p.
10. Burrus D. L., Charour C. A., Foltz H. L. et al. Energy Efficient Engine Combustor Test Hardware—Detailed Design Report. NASA CR-168301.
11. Dodds W. J., Ekstedt E. E. Broad Specification Fuel Combustion Technology Program. Phase II, Final Report, 1989.
12. Lefebvre A. H. Influence of Fuel Properties on Gas Turbine Combustion Performance. AFWAL-TR-84-2104, 1985.
13. Mingazov B. G., Yavkin V. B., Sabirzyanov A. N., Baklanov A. V. [The analysis of applicability of models of burning for calculation of the GTD mnogoforsunochny combustion chamber]. *Bulletin of Samara State Aerospace University of the academician S.P. Korolyov (national research university)*. 2011, No. 5 (29), P. 208–214 (In Russ.).
14. Canilo P. M. *Energeticheskiye i ekologicheskiye kharakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodородnykh topliv i vodoroda* [Energy and environmental performance of gas turbine engines when using hydrocarbon fuels and hydrogen]. Kiev, Nauk. Dumka, 1987, 224 p.

© Бакланов А. В., 2023

---

**Бакланов Андрей Владимирович** – заместитель главного конструктора; АО «Казанское моторостроительное производственное объединение». E-mail: andreybaklanov@bk.ru.

**Baklanov Andrey Vladimirovich** – deputy chief designer; Joint-Stock Company “Kazan motor production association”. E-mail: andreybaklanov@bk.ru.

---