

УДК 621.43.056.536.46

Исследование снижения эмиссии в малоразмерных камерах сгорания

В.М. Юсеф, Н.В. Давыдов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,
Казань, 420111, Россия
e-mail: wyasen@mail.ru

Поступила в редакцию 3.12.2018

После доработки 22.01.2019

Принята к публикации 25.01.2019

Приводятся численные моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent и экспериментальное исследование разных схем камер сгорания с целью снижения эмиссии при оптимизации рабочего процесса в камере сгорания. По этим результатам выбран подход для снижения эмиссии (CO, NO_x).

Ключевые слова: численные моделирования, экспериментальное исследование, малоразмерная КС, расчетная сетка, коэффициент избытка воздуха.

Газотурбинные двигатели (ГТД) находят все более широкое применение. Одновременно к ним предъявляются жесткие требования по снижению выбросов в атмосферу (в основном в виде окиси углерода CO и окислов азота NO_x), поэтому проблема снижения выбросов токсичных веществ является актуальной.

В настоящей работе приставлена численная модель и результаты экспериментального исследования эмиссионных характеристик на малоразмерных камерах сгорания (КС).

Для уменьшения выбросов и улучшения характеристик КС необходимо разделить процесс горения на две стадии (рис. 1):

– в предкамере – богато-бедное горение ($\alpha_{\text{бог}} \rightarrow \alpha_{\text{бедн}}$);

– в зоне догорания – бедное горение.

Подавать смесь топлива и воздуха в КС можно различными способами, три самых популярных представлены на рис. 2:

a – топливо подается через фронт, а воздух – через основные пояса отверстий [1], при этом

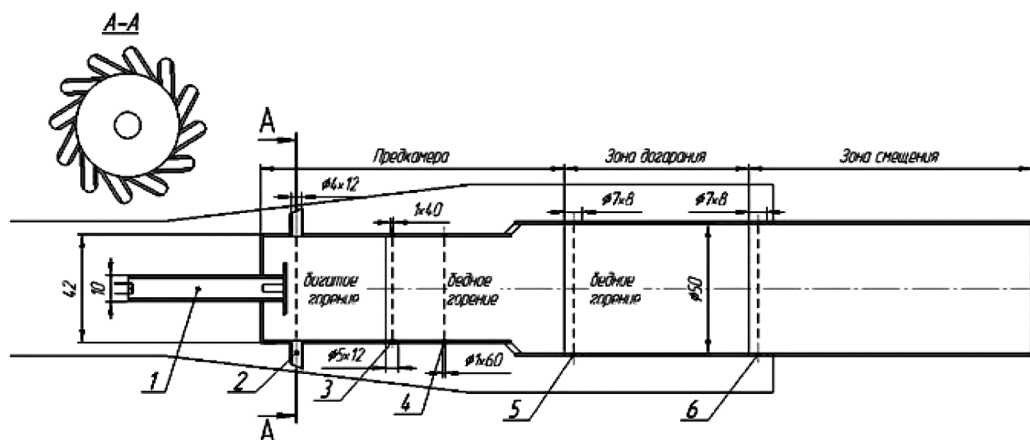


Рис. 1. Схема модуля КС: 1 – смесительный патрубок (топливо и воздух); 2 – подача воздуха через тангенциальные трубки; 3 – первый пояс отверстий; 4 – пленочное охлаждение; 5 – второй пояс отверстий; 6 – третий пояс отверстий

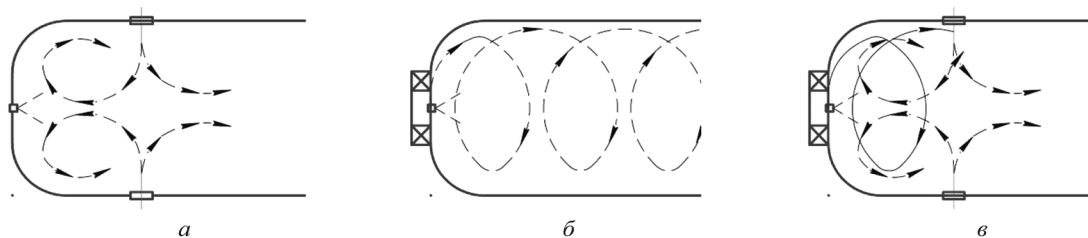


Рис. 2. Схемы КС

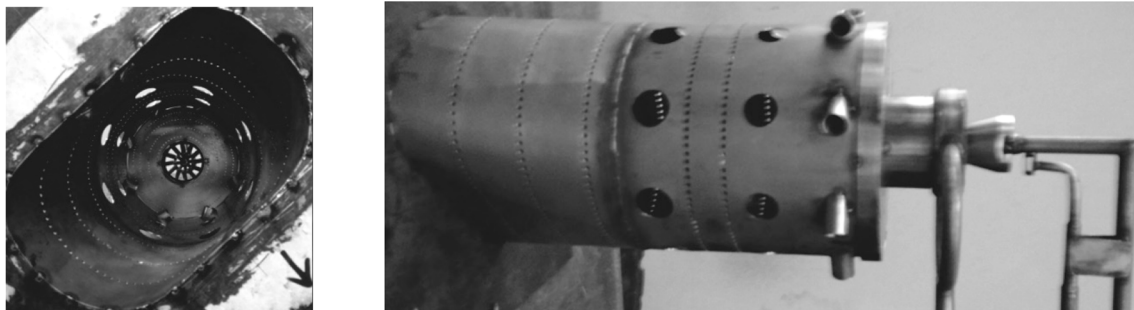


Рис. 3. Схема традиционной КС

часть этого воздуха (n) от ближайшего ряда отверстий отводится в первичную зону (ПЗ), тем самым образуя коэффициент избытка воздуха, равный

$$\alpha_{ПЗ} = \left(\frac{n \cdot G_B^I}{g_T \cdot L_o} \right);$$

б – топливо и значительная часть воздуха подаются через фронт [2], при этом воздух от периферийных отверстий не попадает (или попадает, но в незначительном количестве) в первичную зону. Таким образом, значение $\alpha_{ПЗ}$ формируется только фронтальным устройством:

$$\alpha_{ПЗ} = \left(\frac{G_{Фр}}{g_T \cdot L_o} \right);$$

в – топливо и воздух подаются через фронт, но количество воздуха недостаточно для полного занятия объема ПЗ. Тогда недостающую часть занимает воздух из первых рядов отверстий, часть которого в количестве $n \cdot G_B^I$ поступает в ПЗ:

$$\alpha_{ПЗ} = \left(\frac{G_{Фр} + n \cdot G_B^I}{g_T \cdot L_o} \right).$$

Дальнейшее выгорание топлива определяется условиями (P , T и W), но в основном зависит от значения $\alpha_{зд}$ смеси, поступающей в зону догорания:

$$\alpha_{зд} = \left(\frac{G_B^\Sigma - G_B^{ПЗ}}{(g_T^\Sigma - g_{Т.ПЗ}^{сгор}) \cdot L_o} \right).$$

Для выполнения работы необходимо было в начале исследовать разные схемы КС. Традиционная схема с лопаточными осевыми завихрителями во фронтальной плите представлена на рис. 3, прямоточная камера с плоскими стабилизаторами пламени – на рис. 4.

В традиционной КС (см. рис. 3) во фронтальной области расположены два лопаточных завихрителя и закрученный подвод воздуха в первом поясе отверстия. Для лучшего смешения между лопаток большого завихрителя подавалось основное газообразное топливо, а малый завихритель образовывал стабильную дежурную зону в широком диапазоне работы КС.

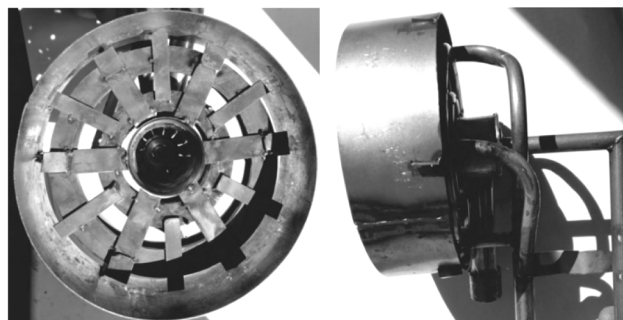


Рис. 4. Схема прямоточной КС

Горение данной КС происходило равномерно по всей площади фронтальной плиты и заканчивалось не доходя до второго пояса основных отверстий, при этом на выходе отмечались значения CO .

По прямоточной схеме (см. рис. 4) вместо фронтальной плиты использовали плоские стабилизаторы шириной от 10 до 15 мм, расположенные в окружном и радиальном направлениях. Перед стабилизаторами был организован подвод основного топлива через трубчатый коллектор, в котором на расстоянии 10 мм располагались отверстия диаметром 1 мм. В центре располагалась дежурная горелка (как и в предыдущей схеме). Данная схема показала лучшее горение на большем диапазоне работы, однако горение было неравномерным по площади, т.е. имеются темные зоны, где возможно происходит «заморозка» горючей смеси.

По этим результатам был выбран подход для снижения эмиссии (CO , NO_x):

- повышение эффективности смешения топлива и воздуха (например, за счет закрутки);

- уменьшение масштаба горения за счет разделения КС на меньшие модули, при этом диаметр предкамер составил $d_{\text{мкс}} \approx 40\text{--}50\text{ мм}$;

- разделение зоны горения на нескольких зон:

- а) богатая зона ($\alpha = 0.6\text{--}0.8$) с увеличенным временем пребывания смеси (за счет закрутки). Здесь в большом количестве образуется CO , но при этом NO_x не образуются из-за недостатка O_2 , так как весь O_2 будет идти на образование CO ;

- б) бедная зона ($\alpha = 1.0\text{--}1.4$, $T_r = 2000\text{ К}$) с быстрым доокислением CO в CO_2 в высокотемпературной зоне и минимальным выходом NO_x с уменьшенным временем пребывания смеси;

- в) последующий подвод воздуха для быстрого смешения его с высокотемпературными продуктами горения (зоны б) разбавлением максимальной температуры до температур $T_r < 1760\text{ К}$, что согласно теории Зельдовича заморозит реакции образования NO_x , но позволит завершить окисление CO до CO_2 .

Для выполнения полученных требований были проведены расчеты по реакторной модели и другим теоретическим методикам расчета КС для определения ее геометрии и распределения коэффициента избытка воздуха α по длине жаровой трубы (ЖТ) (см. рис. 1).

Как известно, КС является очень сложной частью двигателя, и экспериментальное исследование динамики внутрикамерных процессов – это дорогостоящая, сложная и длительная задача. Более простым и дешевым способом является применение упрощенных моделей численных методов расчетов в ПО ANSYS Fluent, который также позволяет оптимизировать и формировать динамику процессов и течений.

Ниже приводятся результаты применения 3D-моделирования процессов для определения характеристик горения и оптимизации КС. Для разработки численной модели в расчетной области препроцессором Gambit была сгенерирована сетка, содержащая ≈ 2 млн ячеек гексаэдральных и тетраэдральных элементов с качеством по скошенности не более 0.85 (рис. 5).

При проведении анализа была принята следующая модель течения: многокомпонентное химически реагирующее турбулентное течение с впрыском факела испаряющихся жидких частиц. Модель турбулентности – стандартная k - ϵ со стандартной функцией стенки.

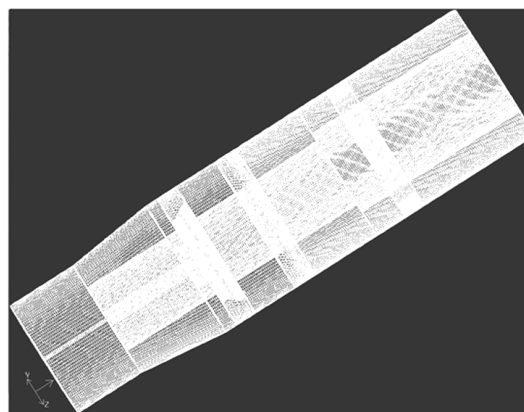
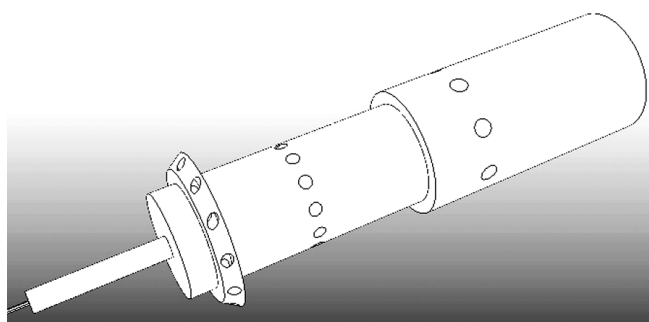


Рис. 5. Геометрическая модель и фрагменты сетки малоразмерной КС

В качестве модели горения была принята простейшая модель объемного реагирования, включавшая одну химическую реакцию «брутто».

На входе в КС задавался массовый расход и температура воздуха с однородным распределением по сечению, а на выходе – постоянное давление.

В результате расчета получено распределение температуры и скорости в сечении, проходящем через ось завихрителя (рис. 6–8). Как видно, основной процесс горения при $\alpha_{\Sigma} = 5$ начинается в первичной зоне и продолжается за первым поясом основных отверстий. В области до первого ряда отверстий наблюдается сильная закрутка, обеспечивающая хорошее перемешивание и стабилизацию пламени за счет возвратных течений.

Последним этапом работы являлось проведение экспериментальных исследований, необходимых для проверки адекватности результатов расчетов.

Результаты эксперимента получены при исследованиях КС, работающей на газовом топливе. Все испытания проведены на горелочных устройствах с диаметром ЖТ 40–50 мм (см. рис. 4).

На рис. 9 представлена схема установки для испытания КС.

Данная установка состоит из следующих систем: подачи и подогрева воздуха, подачи газообразного топлива и системы измерений параметров воздуха, топлива и продуктов сгорания.

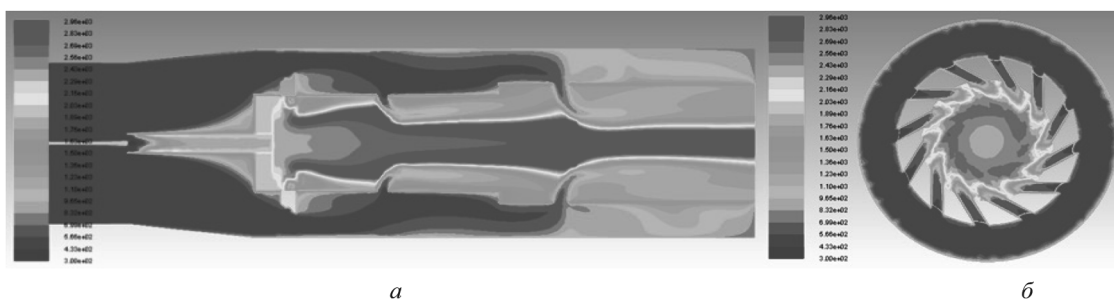


Рис. 6. Поля температур внутри КС в разных сечениях, $\alpha_{\Sigma}=5$: *a* – между отверстиями ЖТ; *б* – по отверстиям ЖТ

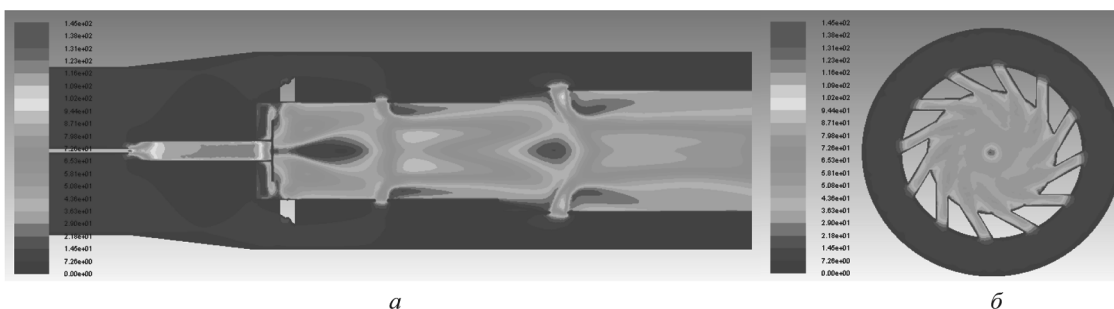


Рис. 7. Поля скоростей в КС в разных сечениях по оси форсунки: *a* – между отверстиям ЖТ; *б* – по отверстиям ЖТ

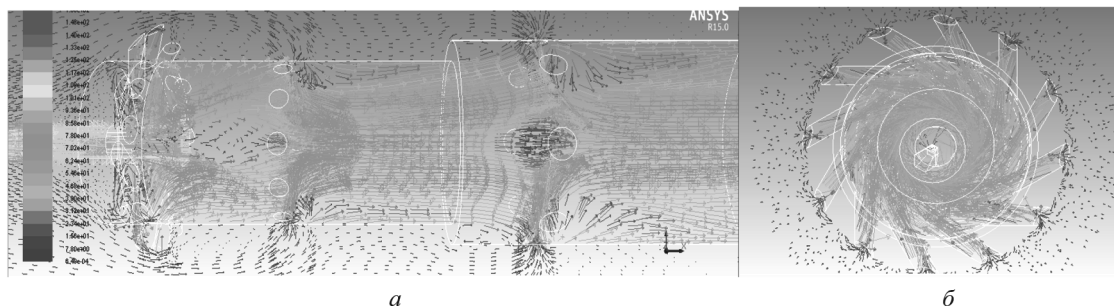


Рис. 8. Векторная картина течения в КС в разных сечениях по оси форсунки: *a* – между отверстиями ЖТ; *б* – по отверстиям ЖТ

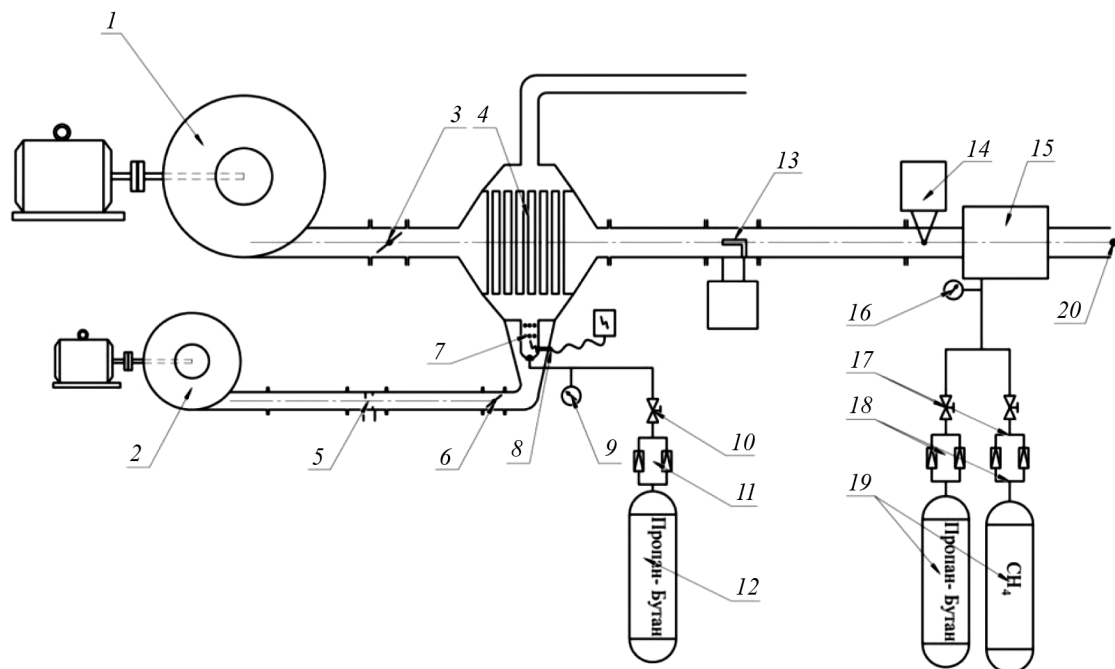


Рис. 9. Схема экспериментальной установки: 1 – основная воздуходувка; 2 – воздуходувка генераторной камеры; 3, 6 – дроссельные задвижки; 4 – теплообменник; 5 – мерная шайба (сдвоенная диафрагма); 7 – генераторная камера сгорания; 8 – свеча зажигания; 9 – манометр; 10 – расходный кран; 11, 18 – газовые редукторы; 12 – баллон с сжиженным газом; 13 – мерное устройство (интегральная трубка Пито–Прандтля); 14 – термопара гр. ХК; 15 – исследуемая камера сгорания; 16 – манометр; 17 – запорные краны; 19 – баллоны с газом для основной камеры сгорания; 20 – датчик отбора пробы продуктов сгорания

Система подачи воздуха обеспечивает в полном объеме расход воздуха в камеру сгорания на всех режимах работы и состоит из воздуходувки, системы воздухопроводов, перепускных и дроссельных заслонок.

Система подогрева воздуха позволяет повышать температуру проходящего через нее к камере сгорания воздуха до 230 °С. Она состоит из воздуходувки, системы воздухопроводов, дроссельной задвижки, теплообменника, трубчатой камеры сгорания, системы подачи топлива и запальной системы.

Система измерений позволяет замерять расходы рабочих тел путем замера статических давлений, скоростных напоров и статических температур в конкретных точках и сечениях. На срезе камеры сгорания расположен датчик 20 отбора пробы продуктов сгорания (охлаждаемый водой, позволяет получать замороженную пробу) и датчик температуры (термопара Гр. ХА). Состав газа определялся газоанализаторами ДАГ-510 и ДАГ-500.

Исследовалось:

– влияние режимных параметров (T , V , α_{Σ}) на изменение состава топливовоздушной смеси в разных сечениях;

– диапазон устойчивого горения;

– полнота сгорания топлива по содержанию СО в продуктах горения на срезе;

– эмиссия СО и NO_x на срезе КС.

Наиболее оптимальной представляется схема с минимальным выходом СО и NO_x (см. рис. 1).

Горение в КС организовано следующим образом: через фронтное устройство 1 подается однородная смесь ($\alpha = 0.1\text{--}0.4$), далее через тангенциальные трубки 2 подается воздух, образуется закрученная горючая смесь ($\alpha = 0.6\text{--}0.8$), при этом начинается «богатое» горение, в котором, согласно термодинамическим расчетам, образование NO_x минимально [3]. Затем через первый пояс 3 поступают радиальные струи воздуха, резко обедняя смесь до $\alpha = 1.0\text{--}1.4$, за струями образуются короткие по длине области высоких температур, где эффективно дожигается СО, поступивший из предыдущей зоны, а

NO_x вырастает незначительно из за высокой скорости (т.е. малого времени пребывания $\tau_{\text{пр}} < 0.0251$ с) [4]. Горение продолжается до подачи струй воздуха через второй пояс 5, за которым значение обедняется до $\alpha = 1.4-2.0$, данный состав газов имеет также высокую температуру, достаточную для доокисления CO в CO_2 , однако не достаточную для образования NO_x . Воздух от третьего пояса 6 формирует поле и заданное значение выходных температур T_r . Такая схема позволяет минимизировать выделение CO и NO_x при сохранении устойчивости горения.

В результате проведенных исследований были получены экспериментальные данные для разных режимов (рис. 10, 11).

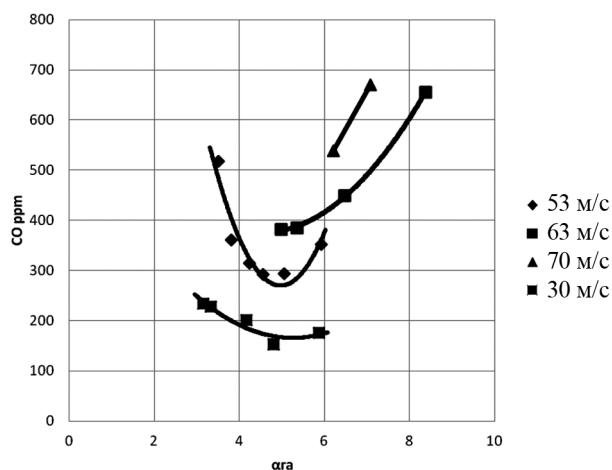


Рис. 10. Изменение CO за модулем от $\alpha_{га}$ на разных скоростях в отверстиях W ($P_k = 1.1$ атм, $T_k = 443$ К, $G_k = 0.05$ кг/с)

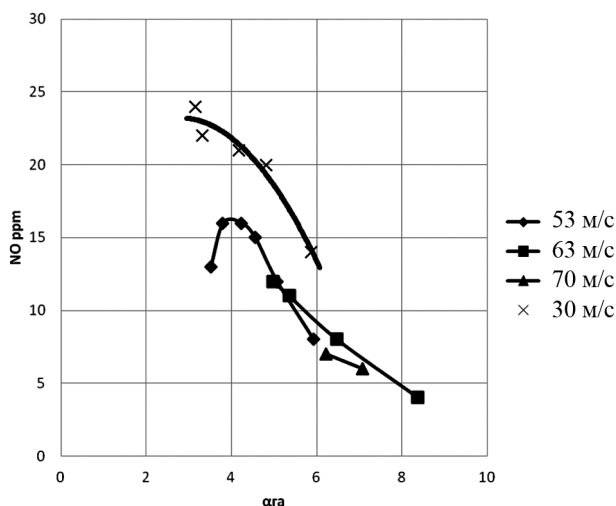


Рис. 11. Изменение NO_x за модулем от $\alpha_{га}$ на разных скоростях в отверстиях W ($P_k = 1.1$ атм, $T_k = 443$ К, $G_k = 0.05$ кг/с)

По результатам проведенной работы можно отметить следующее:

- из анализа способов снижения эмиссии CO , NO_x в малоэмиссионных камерах сгорания ГТД были отмечены основные способы их уменьшения: сжигание хорошо перемешанных смесей, использование двухзонного горения (предкамера и зона основного горения), увеличение времени пребывания смеси в зоне высоких температур с $\alpha < 1$;

- разработана экспериментальная установка для исследования камер сгорания;

- проведены расчетные исследования и определена векторная картина течения и распределение температур и скоростей по длине КС, которые позволили определить высокотемпературные области, застойные области и области интенсивного горения.

- проведены испытания на модулях камеры на нескольких режимах расходов топлива и воздуха, по полученным результатам видно, что для эффективного горения данной камеры оптимальный состав топливо-воздушной смеси должен быть при $\alpha_{кс} \approx 5$. Максимальные значения эмиссии NO_x получены при $\alpha_{кс} = 4$. При увеличении расхода воздуха во всем диапазоне работы камеры сгорания наблюдается закономерное увеличение эмиссии CO и снижение NO_x из-за уменьшения времени пребывания реагирующих веществ в зоне горения.

- полученные значения эмиссии требуют дальнейшей доводки камеры сгорания в области зоны догорания для повышения интенсивности выгорания CO , при этом следует поддерживать значения NO_x в пределах 25 ppm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаченко В.Г., Янковский В.М., Талантов А.В. Исследование массообмена между первичной зоной и струями вторичного воздуха в камерах сгорания ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. № 1. С. 81–85.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 220 с.
4. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М., Бакланов А.В. Технические решения по снижению NO_x в традиционной камере сгорания ГТД НК-16 СТ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3(19). С. 291–297.

The study of emission reduction in small-sized combustion chambers

Yousef Wisam Mahmoud, N.V. Davydov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, 420111, Russia
e-mail: wyasen@mail.ru*

One of the main problems in aviation is developing low emission combustion chambers. The article studied various schemes of the combustion chambers such as:

- traditional scheme of combustion chamber with axial vane swirlers in the front plate;
- straight-through arrangement of combustion chamber with flat flame stabilizers.

Traditional combustion chamber has two vane swirlers in the front area and a swirling air supply in the first belt of the orifices. For better mixing, the main gaseous fuel was fed between the blades of the large swirler, while the small swirler formed a stable pilot burner in the wide range of the combustion chamber operation. Burning in this combustion chamber was uniform over the whole area of the front plate, and being finished before reaching the second belt of orifices. The CO values of more than 3000 ppm were observed herewith at the outlet. The straight-through arrangement employed the flat stabilizers, located in circumferential and radial directions from 10 to 15 mm wide, instead of the front plate. The main fuel supply through a tubular manifold with orifices of 1mm diameter, located in at a distance of 10 mm, was arranged prior to the stabilizers. The pilot burner was located at the center (similar to the previous scheme). This scheme demonstrated better combustion in a wide operation range, but burning was non-uniform along the area, with dark zones where the combusting mixture «freezing» may occur.

According to these results, an approach was chosen to emissions reduction (CO, NO_x), namely:

- fuel and air mixing efficiency increase (for example, by swirler);
- combustion scale reduction by combustion chamber separation into smaller modules, the pre-chamber diameter herewith was of $d_{mcc} \approx 40\text{--}50$ mm;
- combustion zone partition in several zones:
 - a) a rich zone ($\alpha = 0.6\text{--}0.8$) with an increased mixture residence time (due to twist). Here, CO is formed in large quantities, but NO_x is not formed due to the lack of O₂, since all O₂ will go to form CO
 - b) a poor zone ($\alpha = 1.0\text{--}1.40$, $T = 2000\text{K}$) with a rapid oxidation of CO to CO₂ in the high-temperature zone, and with a reduced mixture residence time so that the NO_x yield is being minimal;
 - c) a subsequent air supply for rapid mixing with high-temperature combustion products (zones *b*) by diluting the maximum temperature to the temperatures $T < 1760$ K, which, according to Zeldovich theory, will freeze the formation of NO_x, but will allow complete the CO to CO₂ oxidation

As is known, the combustion chamber is a very difficult part of the engine, and an experimental study of the dynamics of intra-chamber processes is expensive, difficult and time consuming. The more simple and cheap way is simplified models application of numerical calculation methods in ANSYS Fluent software, which also allows optimizing and shaping dynamics of processes and currents.

The optimal combustion chamber was selected by comparing the results obtained by a numerical method performed according to the above said approach with experimental studies.

The scheme with modular (optimal) combustion chamber allows obtain minimum values for emissions. This was achieved by organizing the zones with high burning intensification of the rich mixtures ($\alpha \leq 0.8$) with high-degree of mixing and fuel oxidizing to CO. The oxides formation herewith is minimal. Further, behind the second belt of orifices the high-temperature zone ($\alpha \geq 1.25$ with $T = 1700\text{C}^\circ$) is formed where CO is burned-out to CO₂. The CO emission level is 200-300 ppm, and NO_x is 20-25ppm.

In conclusion, the results of the work include the following:

- The analysis of ways to reduce CO, NO_x emissions in low-emission combustion chambers of gas turbine engines was performed, and experimental setup for testing the combustion chamber was developed.

- Computational studies were performed, and vector picture of the flow and distribution of temperatures and velocities along the length of the combustion chamber were determined.
- Tests of the combustion chamber modules performed, experimental data on CO and NO_x emissions was obtained for various modes.
- The obtained emission values require further refinement of the combustion chamber in the afterburning zone area, minimum NO_x emissions maintaining herewith is necessary.

Keywords: numerical simulations, experimental research, small-sized combustion chamber, computational grid, the excessive air coefficient.

REFERENCES

1. **Chumachenko V.G., Yankovsky V.M., Talantov A.V.** Исследование массообмена между первичной зоной и струями вторичного воздуха в камере сгорания GTD [The study of mass transfer between the primary zone and the secondary air jets in the gas turbine combustion chamber]. *Izv. vuzov. Aviacionnaya tekhnika – Russian Aeronautics*, 1979, no. 1, pp. 81–85. In Russ.
2. **Lefebvre A.** *Processy v kamerax sgoraniya GTD* [Gas turbine combustion]. Moscow: Mir, 1986. 566 p. In Russ.
3. **Mingazov B.G.** *Kamery sgoraniya gazoturbinyh dvigatelej. Konstrukciya, modelirovanie processov i raschet* [The combustion chamber of gas turbine engines. Design, process modeling and calculation]. Kazan: Publishing house of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, 2004. 220 p. In Russ.
4. **Markushin A.N., Merkushin V.K., Byshin V.M., Baklanov A.V.** *Tekhnicheskie resheniya po snizheniyu NOx v tradicionnoj kamere sgoraniya GTD NK-16 ST* [Technical solutions of NO_x decrease in traditional combustion chamber of GTE NK-16ST]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta – Bulletin of the Samara State Aerospace University*, 2009, no. 3(19), pp. 291–297. In Russ.

Учредитель и издатель журнала:

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-72651 от 16.04.2018

Редактор *Бублик Н.П.*, e-mail: tpt@mai.ru

Оригинал-макет и электронная версия изготовлены в МАИ.

Сдано в набор 18.03.2019. Подписано в печать 02.04.2019.

Формат 60×90 1/8. Печать цифровая. Усл. печ. л. 5.82. Уч.-изд. л. 6.35. Тираж 55 экз. «Свободная цена».

Отпечатано в ООО «Печатный салон ШАНС»