

УДК 629.7.036.3

А.Н. Маркушин¹, В.К. Меркушин¹, А.В. Бакланов²¹ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»²Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева «КАИ»

СНИЖЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В КОНВЕРТИРОВАННОМ АВИАДВИГАТЕЛЕ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

В статье описываются конструктивные особенности камеры сгорания с пониженным выбросом NO_x , которая была спроектирована для газотурбинной установки НК-16СТ. Камера сгорания работает на природном газе, организация рабочего процесса осуществлена по схеме «DLE» — Dry Low Emission (дословно: сухая низкая эмиссия). Это означает, что получение низких уровней выбросов вредных веществ достигается «сухим» методом, т.е. без добавления воды, пара или аммиака в проточную часть камеры сгорания. Стендовые испытания показали, что, эмиссия NO_x в новой камере сгорания оказалась приблизительно на 40 процентов ниже, чем в серийной камере сгорания НК-16СТ. При этом выбросы CO фактически не изменились по сравнению с базовой камерой. Полученные результаты достигнуты путем уменьшения температуры в зоне горения, введением подготовки топливозвоздушной смеси и сокращением объема камеры. Новая камера сгорания соответствует всем основным характеристикам, предъявляемым к серийной камере.

Токсичность, выхлопные газы, камера сгорания, диффузионное горение, экспериментальное исследование, доводка, модернизация, конструкция, газотурбинный двигатель, конвертирование

Введение

Современные тенденции развития газотурбинных двигателей и установок наземного применения, включая конвертируемые авиационные двигатели, обуславливают разработку тепловой машины с умеренными и высокими параметрами термодинамического цикла, высокой надежностью, большим ресурсом в сочетании с эксплуатационной технологичностью и низкой себестоимостью.

Проблема создания такого двигателя значительно усложняется в связи с ужесточением требований по защите окружающей среды от выбросов вредных веществ, образующихся при сжигании углеводородных топлив. При этом принятое прогрессивное направление, связанное с созданием ГТУ наземного использования на базе авиационного ГТД в газовой промышленности и в энергетике, потребовало некоторых новых подходов и принципов, что, в частности, отразилось на организации рабочего процесса малоэмиссионного сжигания углеводородного топлива [1].

Простота, надежность, десятилетиями отработанная технология проектирования, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления на основных режимах делают обоснованными многочисленные попытки конструкторов усовершенствовать традиционные камеры сгорания (КС) с

целью улучшения их экологических характеристик. Под традиционными КС понимаются камеры, в которые топливо и воздух поступают раздельно, и горение происходит в зонах со стехиометрическим составом смеси $a_{см} = 1$. Обычно объем и длина такой КС полностью соответствуют авиационному прототипу. Усовершенствованная традиционная КС, оснащена новыми конструктивными элементами, введенными для снижения выбросов токсичных веществ.

1. Способы снижения оксидов азота

В процессе расчета эмиссионных характеристик КС часто используется выражение, полученное на основе кинетического уравнения Я.Б. Зельдовича [2]:

$$NO = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{O_2} N_2 e^{-\frac{129000}{RT_g}} \sqrt{P_B / T_g^* \tau_{np}}, \quad (1)$$

представляющее концентрацию образовавшихся оксидов азота при горении однородной смеси, как функцию $C_{NO_x} = f_1(T_g, P_K, \tau_{np})$, где P_K — давление воздуха на входе в КС; T_g^* — температура газа в зоне горения; τ_{np} — время пребывания газов в камере.

Исходя из этого, можно сформулировать основные принципы снижения оксидов азота в камерах сгорания ГТД:

- для снижения NO_x необходимо обеспечить такой процесс выгорания топлива, при котором распределение температуры газов по длине жаровой трубы должно иметь минимальные значения местных температур газа, или же область высоких температур малой протяженности.

- к уменьшению выбросов оксидов азота ведет, так же снижение времени пребывания $t_{пр}$ продуктов сгорания в КС.

- обеднение топливовоздушной смеси и интенсификация смешения топлива и воздуха в первичной зоне;

- такой способ снижения NO_x как предварительное смешение топлива с воздухом также является оптимальным вариантом, когда реализуется получение гомогенной топливовоздушной смеси и введение ее в зону горения. В результате

из времени пребывания в зоне высоких температур исключается время смесеобразования, что также уменьшает выход NO_x .

2. Особенности конструкции

Разработанная низкоэмиссионная кольцевая КС для газотурбинной установки НК-16СТ мощностью 16 МВт, созданной на базе авиационного газотурбинного двигателя НК-8-2У, является модернизированным вариантом серийной камеры, то есть основная часть конструктивных элементов камеры осталась неизменной. На рис. 1 представлена 3D компоновка серийной и модернизированной камеры сгорания ГТД НК-16СТ. Камеры состоят из корпуса 5, жаровой трубы 1, патрубков смесителей 4, газового коллектора для подачи газа к форсункам 3. Фронтное устройство содержит 32 горелки 2. Жаровая труба — кольцевая, многосекционная с конвективно-плечным охлаждением.

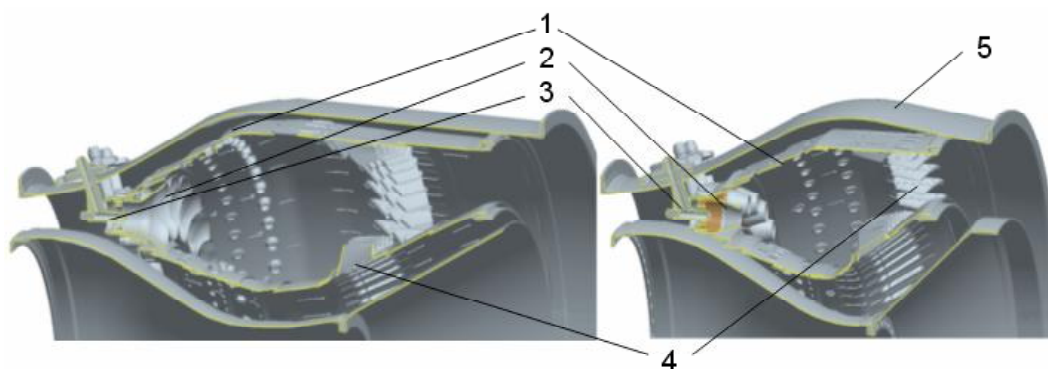


Рис. 1. 3D компоновка серийной и модернизированной камеры сгорания ГТД НК-16СТ

В конструкции новой камеры во фронтном устройстве были установлены конфузорные горелки частичного смешения (ГЧС) вместо серийных диффузорных горелок. ГЧС обеспечивают более интенсивное выгорание топлива на малой длине, что позволило укоротить жаровую трубу (ЖТ) с 0,575 м до 0,347 м (за точку отсчета взята плоскость фронтного устройства) на 38,5%, а следовательно, уменьшить время пребывания $\tau_{пр}$ продуктов сгорания с 11 до 7 мс и за счет этого снизить выбросы NO_x [3].

На рис. 2 отражено, как по длине ЖТ происходит распределение смешиваемого воздуха в соответствии с изменением площадей отверстий подвода вторичного воздуха для серийной и модернизированной камер, которое определяется соотношением:

$$\bar{F}_i(x) = \frac{F_i(x)}{F_\Sigma} \quad (2)$$

Откуда видно, что в зону горения укороченной КС, было подведено большее количество воздуха по сравнению с серийной КС, это осуществлялось за счет уменьшения проходных сечений патрубков смесителей в зоне смешения и организации дополнительного ряда отверстий в зоне горения. К тому же, больше воздуха было подведено через фронтное устройство с целью обеднения смеси на выходе из горелки. Дополнительная масса воздуха способствовала падению уровня температур в зоне горения, что повлияло на снижение выхода NO_x , так как большая их часть формируется в зоне высоких температур. Следовательно, снижение температуры в зоне горения, так же как и уменьшение $\tau_{пр}$ привело к подавлению образования оксидов азота.

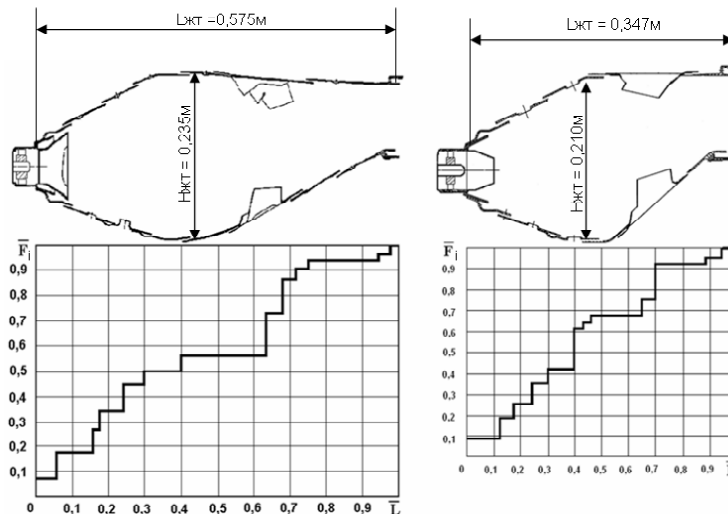


Рис. 2. Распределение относительных площадей отверстий по длине серийной и модернизированной камер сгорания ГТД НК-16СТ

3. Экспериментальная часть

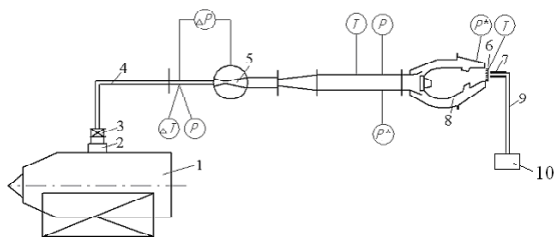


Рис. 3. Схема стенда для испытаний КС

Испытания серийной и модернизированной КС проводились на автономном стенде рис. 3., с целью контроля уровня выбросов токсичных веществ NO_x , CO .

Стенд оборудован необходимыми системами измерения параметров и их регистрации. В составе стенда находится ГТД 1, который служит для подвода сжатого воздуха к испытываемой камере сгорания. Двигатель оснащен отборами воздуха 2 от компрессора высокого давления КВД за девятой ступенью, к которым подсоединены воздухопроводы. Воздух через регулируемую заслонку 3 поступает к КС по трубопроводу 4. Расход воздуха измеряется расходомерным устройством (соплом Вентури) 5 с регистрацией показаний датчика давления, температура воздуха контролируется термопарой группы хромель-алюмель.

В ходе испытаний также проводится проверка заданной радиальной и окружной эпюр неравномерности поля температуры газа. Для этого в выходном сечении ЖТ была установлена подвижная в окружном направлении гребенка термопар 6. Регистрация измерений производится

ЭВМ с последующим выводом результатов на печатающее устройство. При замерах эмиссии токсичных веществ CO и NO_x используется «одноточечный» газоотборный зонд, который размещается на выходе из ЖТ КС 8. Транспортировка пробы продуктов сгорания от зонда до анализирующего оборудования 10 осуществляется по герметичной магистрали 9 за счет скоростного напора газового потока на выходе из КС.

Во время испытаний параметры стенда соответствовали номинальному режиму работы КС: температура воздуха на входе в мерный участок $T=200\text{ }^\circ\text{C}$, скорость воздуха $C = 115\text{ м/с}$, средний коэффициент избытка воздуха $\alpha_\Sigma = 5$, но давление близкое к атмосферному. При этом, замеры эмиссии CO и NO_x проводились при $\alpha_\Sigma = 3...7$.

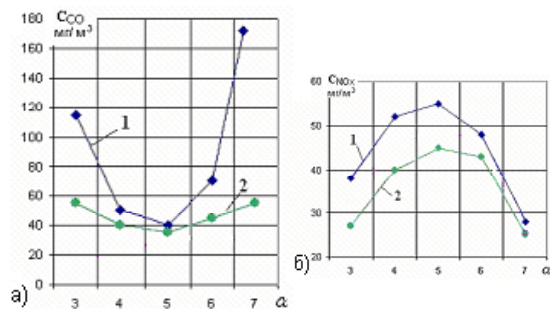


Рис. 4. Зависимость приведенной концентрации CO (а) и NO_x (б) от α для серийной (1) и модернизированной КС (2)

Из графика (рис. 4, а) видно, что для ЖТ модернизированной КС наблюдается несущественное снижение эмиссии окиси углерода по

сравнению с серийным вариантом камеры. По графику (рис. 4, б) видно, что для ЖТ укороченной КС можно отметить значительное снижение эмиссии окислов азота по сравнению с серийным вариантом камеры. В среднем снижение эмиссии окислов азота NO_x , для номинального режима работы КС, составило 40% от уровня выбросов серийного варианта.

По результатам испытаний модернизированной КС, фактические величины окружной неравномерности и радиального поля температур, соответствовали нормам технических условий серийной КС (рис. 5 а, б).

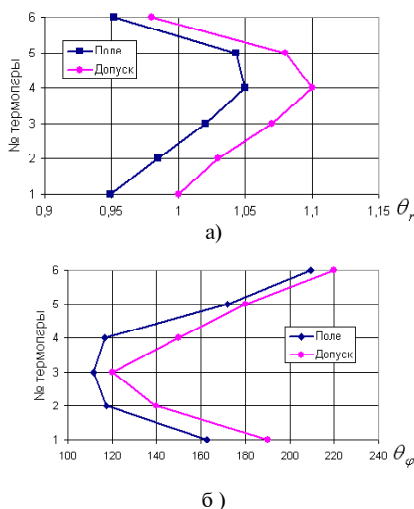


Рис. 5. Величины окружной неравномерности (а) и радиального поля температур (б)

Дальнейшие работы проводились в составе полноразмерного двигателя НК-16СТД: отрабатывался запуск, выход на режимы частичной и полной мощности, а также был произведен замер эмиссии токсичных веществ. Параметры эмиссионных характеристик по оксидам азота NO_x и углерода CO , на основных режимах работы газотурбинной установки приведены на рис. 6.

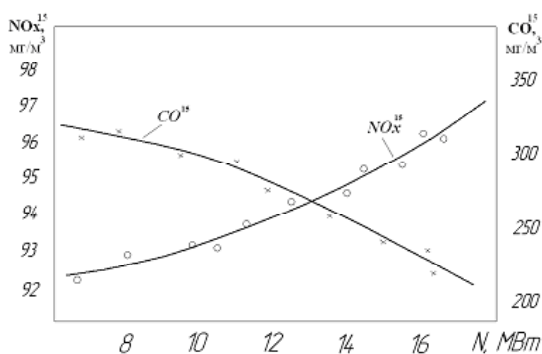


Рис. 6. Зависимость концентрации CO и NO_x от мощности установки

В спроектированной КС на максимальном режиме работы установки $Ne = 16$ МВт, эмиссия NO_x приведенная к концентрации кислорода 15% составила $C(NO_x)_{НОМ}^{15\%O_2} = 96$ мг/м³, что удовлетворяет современным требованиям. Следует отметить, что концентрации CO в спроектированной КС также не превысили допустимых нормами значений.

Данные по уровню концентрации CO и NO_x на максимальном режиме работы $Ne = 16$ МВт, для серийной и низкоэмиссионной камер, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Тип камеры сгорания	Выбросы, единицы мг/м ³	
	$C(CO)_{НОМ}^{15\%O_2}$	$C(NO_x)_{НОМ}^{15\%O_2}$
Серийная	270	147
Модернизированная	250	96

Выводы

Обеднение смеси и интенсификация смешения путем повышения расхода воздуха через горелочное устройство и отверстия первичной зоны, установка горелок частичного смешения и уменьшение объема камеры привели к существенному снижению выбросов токсичных веществ. Полученные результаты достигнуты «сухим» методом, т.е. без добавления воды, пара или аммиака в проточную часть камеры сгорания.

Переход от серийной КС к низкоэмиссионной не потребовал изменения конструкции других узлов двигателя. В результате не пришлось менять топливную систему и создавать сложную систему регулирования подачи воздуха.

Перечень ссылок

1. 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.
2. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода/ Канило П. М., Подгорный А.Н., Христич В.А. –Киев: Наук. думка, 1987. – 224 с.
3. Маркушин А.Н., Меркушин В.К, Бышин В.М, Бакланов А.В. Усовершенствование конструкции камер сгорания традиционных схем в целях улучшения экологических показателей ГТД// Изв. вузов. Авиационная техника. – 2010. - №1. – С. 41-44.

Поступила в редакцию 01.07.2010 г.

A.N. Markushin, V.K. Merkushev, A.V. Baklanov

**DECREASE IN TOXICITY OF EXHAUST GASES IN THE CONVERTED
AIRCRAFT ENGINE BY MODERNIZATION OF THE DESIGN
COMBUSTION CHAMBER**

У статті описуються конструктивні особливості камери згорання із зниженим викидом NO_x , яка була спроектована для газотурбінної установки НК-16СТ. Камера згорання працює на природному газі, організація робочого процесу здійснена за схемою «DLE» — Dry Low Emission (дослівно: суха низька емісія). Це означає, що здобуття низьких рівнів викидів шкідливих речовин досягається «сухим» методом, тобто без додавання води, пари або аміаку в проточну частину камери згорання. Стендові випробування показали, що емісія NO_x в новій камері згорання виявилася приблизно на 40 відсотків нижче, ніж в серійній камері згорання НК-16СТ. При цьому викиди CO фактично не змінилися в порівнянні з базовою камерою. Отримані результати досягнуті шляхом зменшення температури в зоні горіння, введенням підготовки топливовоздушної суміші і скороченням об'єму камери. Нова камера згорання відповідає всім основним характеристикам таким, що пред'являється до серійної камери.

Токсичність, вихлопні гази, камера згорання, дифузійне горіння, експериментальне дослідження, доведення, модернізація, конструкція, газотурбінний двигун, конвертація

This paper describes features of the combustion chamber with lowered emission NO_x which has been designed for gas turbine engine plant НК-16СТ. The combustion chamber works on natural gas, the organisation of working process is carried out under the scheme «DLE» — Dry Low Emission (literally: dry low issue). It means that reception of low levels of emissions of harmful substances is reached by a «dry» method, i.e. without addition of water, steam or ammonia in a flowing part of the chamber of combustion. Bench tests have shown that, issue NO_x in the new combustion chamber has appeared approximately for 40 percent more low, than in the serial chamber of combustion НК-16СТ. Thus emissions CO actually have not changed in comparison with the base chamber. The received results are reached by temperature reduction in a burning zone, preparation introduction air-fuel mixes and reduction of volume of the chamber. The new combustion chamber of corresponds to the basic characteristics shown to the serial chamber.

Toxicity, exhaust gases, the combustion chamber, diffusion burning, an experimental research, operational development, modernisation, a design, the gas turbine engine, converting