

## ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ NO<sub>x</sub> В ТРАДИЦИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД НК-16СТ

© 2009 А. Н. Маркушин<sup>1</sup>, В. К. Меркушин<sup>1</sup>, В. М. Бышин<sup>1</sup>, А. В. Бакланов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

<sup>2</sup>Казанский государственный технический университет им. А.Н.Туполева

Представлены результаты испытаний традиционной камеры сгорания с усовершенствованной конструкцией. Достигнута меньшая концентрация выбросов токсичных веществ по сравнению с серийной камерой сгорания.

*Камера сгорания, оксид азота, токсичность, эксперимент, экология*

Промышленные ГТУ большую часть своего ресурса работают на повышенных режимах (0,7...1,0) от номинального. Поэтому одной из основных экологических проблем для ГТУ является проблема снижения оксидов азота. При этом остальные составляющие вредных выбросов, такие как СО, СН, и др., должны остаться на низком уровне.

Применение той или иной концепции по снижению выбросов NO<sub>x</sub> определенным образом зависит от целей, которые видит разработчик, и затрат, которые может позволить себе заказчик.

В Российской Федерации ГОСТом 28775-90 для ГПА с газотурбинным приводом [1] допустимый уровень содержания ограничивается: NO<sub>x</sub> ≤ 150 мг/м<sup>3</sup>; СО ≤ 300 мг/м<sup>3</sup> (в отработанных газах при 0°С и 0,1013 МПа и условной концентрации кислорода 15%). К современным малотоксичным камерам сгорания, которые условно разделяют на низко- или малотоксичные камеры, предъявляются повышенные требования с различных сторон: природы, двигателя и потребителя энергии (заказчика). Низкоэмиссионные камеры сгорания (НКС) должны обеспечить NO<sub>x</sub> ≤ 100 мг/м<sup>3</sup>, а малоэмиссионные камеры сгорания (МКС) NO<sub>x</sub> ≤ 50 мг/м<sup>3</sup>.

В настоящее время известны основные концепции по организации малотоксичного горения:

– традиционные камеры сгорания диффузионного типа (трубчатая и кольцевая); Доработка КС традиционных схем характеризуется усовершенствованием диффузион-

ного процесса горения в этих камерах.

– камера по схеме “богатая смесь, резкое охлаждение, бедная смесь” (RQL); Концепция RQL (Rich - Quench- Lean): основана на низкотемпературном сжигании богатой топливоздушной смеси (ТВС) с подачей всего топлива в первой зоне горения, быстрым смешении с оставшимся воздухом и дожиганием бедной ТВС при низкой температуре во второй зоне камер сгорания.

– камера сгорания с предварительным смешением бедной ТВС (LPP). Концепция LPP (Lean - premixed and prevaporized): основана на низкотемпературном ( $T_{пл} \leq 1800...1900$  К) сжигании предварительно перемешанной бедной топливоздушной смеси.

Проведенный анализ различных способов организации малоэмиссионного горения, реализованных в ГТД, показал, что основным недостатком МКС являются их развитые габариты и, как следствие, большая материалоемкость, что обусловлено стремлением разработчиков обеспечить необходимую эффективность подготовки ТВС. К недостаткам можно отнести также применение усложненных систем регулирования МКС, решение проблемы запуска, предотвращения проскока и самовоспламенения смеси в зоне подготовки, надёжности горелок.

К примеру, в 1997 году фирма Дженерал Электрик была единственной в мире, имеющей на рынке в широкой эксплуатации ГТУ с  $\pi_k^* > 25$  и уровнем выбросов NO<sub>x</sub> ≤ 25 ppm. Для достижения таких результатов потребовалось более 30 лет исследований, направленных на понимание процессов об-

разования  $\text{NO}_x$  при горении предварительно перемешанной смеси, приобретения уникального опыта конструирования и доводки [2].

В отличие от концепций (LPP, RQL) модификация традиционных камер сгорания имеет ряд преимуществ: простота, надежность, десятилетиями отработанная технология проектирования, изготовления и эксплуатации, одноконтурная система подачи топлива и однозначность управления на основных режимах.

В настоящее время известны способы снижения выбросов оксидов азота в традиционных КС ГТД, реализация которых состоит в следующем:

- предельно возможное обеднение ТВС и интенсификация смешения топлива и воздуха в первичной зоне;
- предельно возможное уменьшение времени пребывания,  $\tau_{пр}$ ;

На ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение» разработана низкоэмиссионная кольцевая КС для газотурбинной установки НК-16СТ мощностью 16 МВт, созданной на базе авиационного газотурбинного двигателя НК-8-2У. Во время работы над данной камерой были реализованы представленные способы снижения выхода  $\text{NO}_x$ . 3-х мерная компоновка блока камеры сгорания ГТУ НК-16СТ изображена на рис. 1. Камера состоит из корпуса 3, жаровой трубы 2, патрубков смесителей 4, газового коллектора для подачи газа к форсункам 1. Фронтное устройство 5 содержит 32 горелки частичного смешения б.

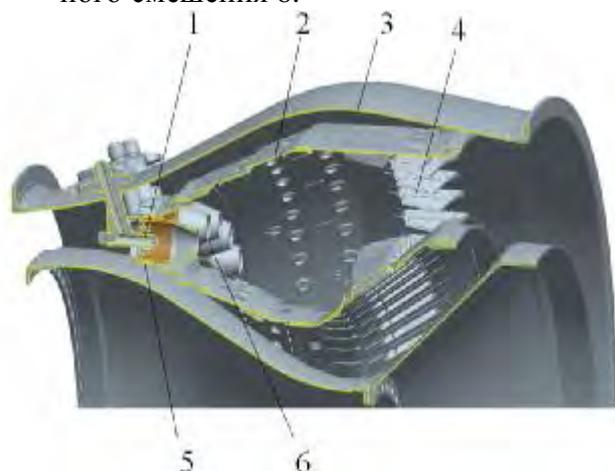


Рис.1. 3-х мерная компоновка БК ГТУ НК-16СТ

Жаровая труба — кольцевая, малой длины, многосекционная с конвективно-плёночным охлаждением.

НКС на номинальном режиме работы газотурбинной установки НК-16СТ имеет следующие значения основных параметров:

- давление воздуха на входе в КС:  
 $P_k^* = 8,85 \text{ кгс/см}^2$ ;
- температура воздуха на входе в КС:  
 $T_k^* = 581\text{К}$ ;
- коэффициент избытка воздуха на выходе из КС:  $\alpha = 5,1$ .

В конструкции НКС во фронтном устройстве были установлены конфузорные горелки частичного смешения (ГЧС), вместо серийных диффузорных горелок. ГЧС обеспечивают более интенсивное выгорание топлива, что позволило укоротить жаровую трубу (ЖТ) с 0,575м до 0,347м (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  $\text{NO}_x$ . Влияние  $\tau_{пр}$  на эмиссию  $\text{NO}_x$  в зависимости от состава смеси представлено на рис.2., где наблюдается существенное снижение уровня выбросов оксида азота в камере с меньшим временем пребывания газа.

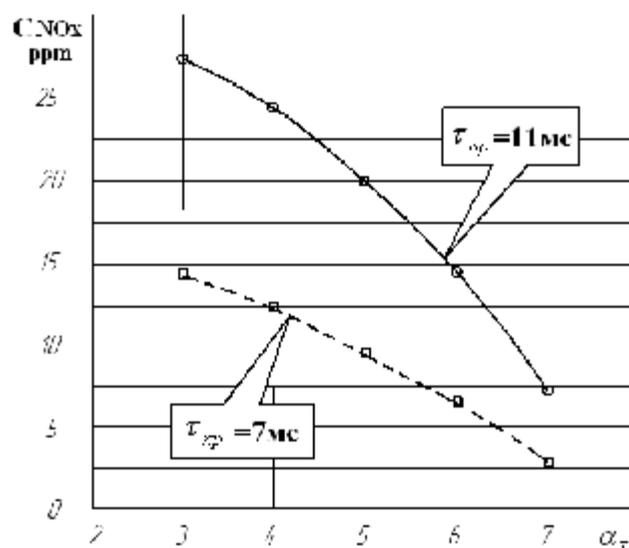


Рис.2. Влияние  $\tau_{пр}$  на эмиссию  $\text{NO}_x$  при различных  $\alpha$ ,  
 $T_k^* = 500 \text{ К}$ ,  $P_k^* = 0,1 \text{ МПа}$

Наряду с этим, в зону горения НКС, было подведено большее количество воздуха по сравнению с серийной КС, что осуществ-

лялось за счет уменьшения проходных сечений патрубков смесителей в зоне смешения и организации дополнительного ряда отверстий в зоне горения. Дополнительная масса воздуха способствовала снижению уровня температур в зоне горения, что повлияло на снижение выхода NOx, так как большая часть NOx формируется в зоне высоких температур. Следовательно, снижение температуры в зоне горения, так же как и уменьшение  $\tau_{np}$  привело к подавлению образования оксидов азота.

Сравнение основных геометрических параметров и характеристик ЖТ серийной КС и НКС представлены в табл. 1.

Определение основных параметров КС, выполнялось с помощью инженерного расчета.

По длине ЖТ происходит распределение смешиваемого воздуха в соответствии с изменением площадей отверстий подвода вторичного воздуха, которое определяется соотношением:

$$\overline{F_i(x)} = \frac{F_i(x)}{F_\Sigma}, \quad (1)$$

где  $F_\Sigma$  – суммарная площадь всех отверстий в ЖТ,  $F_i(x)$  - площадь отверстий в  $i$ -м поясе. Распределение относительных площадей отверстий по длине ЖТ серийной и НКС представлено на рис.3.

Коэффициент избытка воздуха в учитываемой зоне, можно оценить следующим образом:

$$\alpha_i = \frac{F_i(x) \cdot \Delta G_g}{L_0 \cdot G_T} \quad (2)$$

где  $\Delta G_B = \frac{G_g}{F_\Sigma}$ ;

$G_T, G_g$  - расход топлива и воздуха, известные параметры двигателя.

Говоря об окислах азота, принято обозначать их как NOx. Известно, что камерами сгорания в основном выбрасываются окись азота NO и двуокись азота NO<sub>2</sub>.

Таблица 1 - Сравнение основных геометрических параметров и характеристик ЖТ серийной КС и НКС

| Геометрические и режимные параметры             | Обозначения               | Значения параметров   |                      |
|---|---------------------------|-----------------------|----------------------|
|   |                           | Серийная КС           | НКС                  |
| Длина ЖТ  | $L_{жс}$                  | 0,575 м               | 0,347 м              |
| Высота ЖТ                                       | $H_{жс}$                  | 0,235 м               | 0,210 м              |
| Относительная длина ЖТ                          | $L_{жс}/H_{жс}$           | 2,44                  | 1,65                 |
| Длина газосборника                              | $L_\Gamma$                | 0,17м                 | 0,097 м              |
| Число горелочных устройств                      | $n_\Gamma$                | 32                    |                      |
| Суммарная площадь всех имеющихся отверстий ЖТ   | $F_\Sigma$                | 0,175 м <sup>2</sup>  |                      |
| Суммарная площадь воздухоподводящих отверстий   | $F_{\Sigma omе}$          | 0,0823 м <sup>2</sup> | 0,091 м <sup>2</sup> |
| Суммарная площадь охлаждающих каналов           | $F_{\Sigma охл}$          | 0,0927 м <sup>2</sup> | 0,084 м <sup>2</sup> |
| Относительная площадь отверстий                 | $F_{\Sigma omе}/F_\Sigma$ | 0,47                  | 0,52                 |
| Относительная площадь охлаждающих каналов       | $F_{\Sigma охл}/F_\Sigma$ | 0,52                  | 0,48                 |
| Относительная скорость на входе в камеру        | $\lambda_\kappa$          | 0,28                  |                      |
| Вес жаровой трубы                               | $G_K$                     | 98 кг                 | 80 кг                |
| Высота щелей охлаждения                         | $h_{щ}$                   | 1,5-2                 | 1,5-3                |
| Число секций ЖТ                                 | $n_c$                     | 6                     | 4                    |
| Длина секций охлаждения ЖТ                      |                           | 0,075-0,085           |                      |
| Полнота сгорания топлива на максимальном режиме | $\eta_\Gamma$             | 0,99                  |                      |

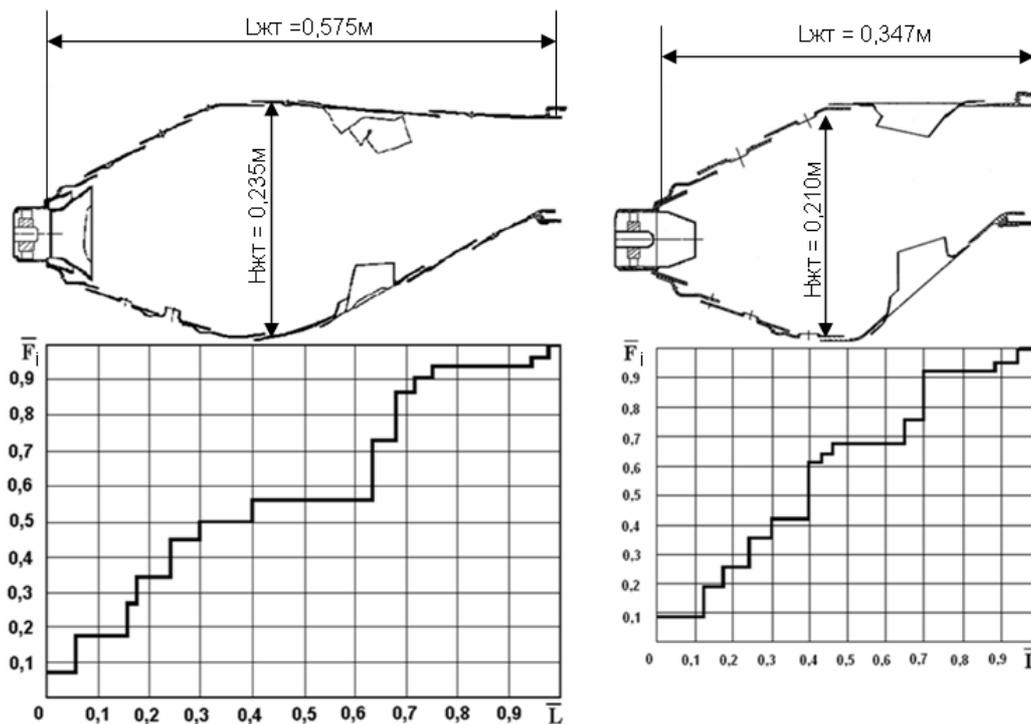


Рис. 3. Схема жаровой трубы серийной и низкоэмиссионной камеры сгорания двигателя НК-16СТ и распределение относительных площадей отверстий по их длине

При сжигании традиционных топлив NO образуется зачастую в результате окисления азота воздуха и в наиболее высокотемпературных областях камер сгорания. При этом принято выделять основные механизмы:

- термический (механизм Зельдовича) – непосредственное окисление азота кислородом в высокотемпературных зонах;
- «быстрый» – через реакции  $N_2$  с углеводородными радикалами;

Согласно расчетным исследованиям, выполненным в работе [3] было выявлено, что доля «быстрых» NO, образующихся в КС ГТД незначительна и составляет от 0,1 до 0,2% от общего выхода NOx. Поэтому целесообразно вести расчет выхода NOx в зоне высоких температур по термическому механизму Я.Б. Зельдовича. Для этого необходимо знать температуру газа в зоне горения. Ее можно определить следующим выражением [4]:

$$T_{Г}^* = T_{К}^* + \frac{Hu \cdot \eta}{c_{pГ}(1 + \alpha \cdot L_0)}, \quad (3)$$

где  $c_{pГ}$  – средняя теплоемкость газа при постоянном давлении;  $c_{pГ} = 1,16596$  кДж/кгК;  $Hu$  – низшая теплотворная способность (для метана  $Hu = 50000$  кДж/кг);  $\alpha$  – коэффициент

та избытка воздуха в рассчитываемой области;  $T_{К}^*$  – температура перед компрессором, К.

В работе [5], для проведения инженерного расчета представлено выражение, полученное на основе кинетического уравнения Я.Б. Зельдовича, связывающего концентрацию образовавшихся оксидов азота при горении однородной смеси:

$$NO = 3,84 \cdot 10^{14} e^{-65000/T_{Г}^*} \times \sqrt{p_B/T_{Г}^*} \tau_{np} (1,1/\alpha_{\Sigma})^{1,7}, \quad (4)$$

где  $p_B$  – давление воздуха на входе в КС;

$T_{Г}^*$  – температура газа в зоне горения;  $\tau_{np}$  – время пребывания газов в камере.

Таким образом,

$$C_{NO_x} = f_1(T_{Г}^*, p_B, \tau_{np}, \alpha_{\Sigma})$$

Значения, здесь рассчитываются в объемных процентах, но зная, что  $NO_x - 1 \text{ ppm} = 1 \cdot 10^{-4} \% = 2,054 \text{ мг/м}^3$ , можно определить выбросы  $NO_x$  в любой удобной единице измерения.

Среднее время пребывания газа в КС определяется зависимостью:

$$\tau_{np} = \frac{V_{жс} P_{К}^*}{R_B T_{К}^* G_B}, \quad (5)$$

где объем ЖТ КС определяется выражением  $V_{жс} = \pi d_{ср} H_{жс} L_{жс}$  ( $d_{ср}$  – средний диаметр ЖТ;  $H_{жс}$  – высота кольцевой ЖТ;  $L_{жс}$  – длина ЖТ).

Приближенная оценка полноты сгорания  $\eta = 1 - 0,8k_v^2$  осуществлялась с помощью параметра форсировки  $k_v$ , впервые предложенным В.Е Дорошенко[6]:

$$k_v = \frac{G_B}{P_K^{*1,25} T_K^* V_{жс}} \quad (6)$$

Результаты расчета для НКС:  $NO_x = 87,5 \text{ мг/нм}^3$ ,  $\tau_{ПР} = 7 \text{ мс}$ ,  $\eta = 0,992$ .

Данные, полученные по результатам расчета, позволили приближенно оценить изменение основных параметров КС.

Исследования спроектированной НКС осуществлялись на автономном стенде, который обеспечивает в КС, на режимах испытаний: параметры воздуха, газа и топлива, требуемые техническими условиями (ТУ): температура воздуха на входе в мерный участок стенда  $t_{вх} = 200^\circ\text{C}$ , скорость воздуха  $C_{вх} = 115 \text{ м/с}$ , средний коэффициент избытка воздуха в КС  $\alpha_\Sigma = 5$ .

Во время стендовых испытаний КС, производилась оценка пусковых, срывных характеристик и контроль заданной радиальной и окружной эпюр неравномерности поля температуры газа в выходном сечении.

По результатам испытаний, после доводки, фактические величины окружной неравномерности и радиального поля температур соответствовали нормам ТУ на серийную КС. Поэтому дальнейшие работы по НКС были проведены в составе полноразмерного двигателя НК-16СТД: отработаны запуск, выход на режимы частичной и полной мощности, так же произведен замер эмиссии токсичных веществ.

Параметры эмиссионных характеристик по оксидам азота  $NO_x$  и углерода  $CO$ , на некоторых режимах работы газотурбинной установки приведены на рис. 4.

В спроектированной КС на максимальном режиме работы установки  $Ne=16 \text{ МВт}$ , эмиссия  $NO_x$  приведенная к концентрации кислорода 15% составила  $C(NO_x)_{ном}^{15\%O_2} =$

$96 \text{ мг/м}^3$ , что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к НКС. Следует отметить, что концентрация  $CO$ , в НКС, так же не превысила допустимых ГОСТом значений.

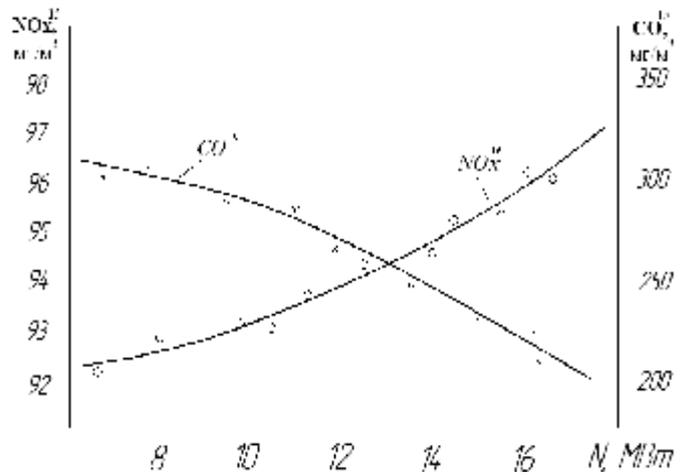


Рис.4. Зависимость концентрации  $CO$  и  $NO_x$  от замеренной мощности установки

Данные по концентрации  $CO$  и  $NO_x$  при максимальном режиме работы  $Ne=16 \text{ МВт}$ , для двух типов КС - серийной и низкоэмиссионной, представлены в табл. 2.

Таблица 2- Концентрации  $CO$  и  $NO_x$  для двух типов КС

| Тип КС           | Выбросы, единицы $\text{мг/нм}^3$ |                           |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------|
|                  | $C(CO)_{ном}^{15\%O_2}$           | $C(NO_x)_{ном}^{15\%O_2}$ |
| Серийная         | 340                               | 147                       |
| Низкоэмиссионная | 230                               | 96                        |

На рис. 5. показана НКС 2 ГТУ НК-16СТ в сравнении с традиционной КС 1. Откуда видно, что переход от серийной КС к низкоэмиссионной не потребовал изменения конструкции других узлов двигателя. Не было необходимости менять систему подачи топлива и создавать сложную систему регулирования воздуха.

В промежутке между последней ступенью компрессора и диффузором КС была установлена проставка, предназначенная для транспортировки сжатого воздуха к КС. Сокращение длины КС, в перспективе, позволяет добавить дополнительную ступень КВД. Тем самым увеличить  $\pi_k$  компрессора, а следовательно, повысить мощность и КПД ГТУ.

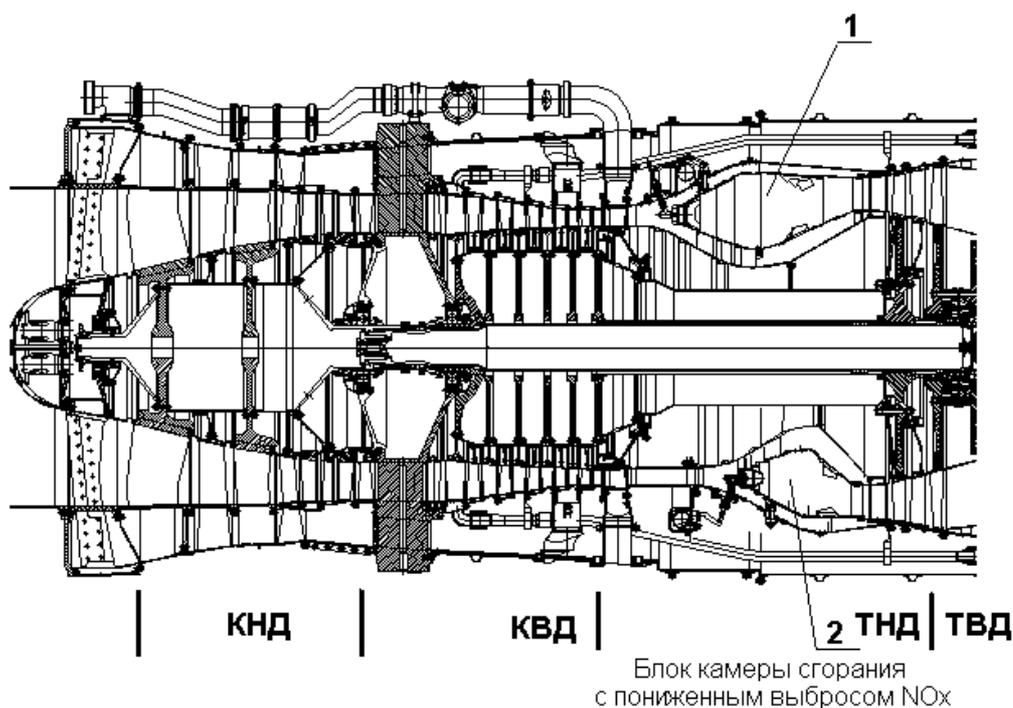


Рис. 5. Схема ГТУ НК-16СТ: 1 – традиционная камера сгорания; 2 – низкоэмиссионная камера сгорания

#### Выводы

В настоящее время спроектирована и испытана КС с пониженными выбросами NOx. Результаты испытаний показали, что данная камера удовлетворяет всем основным характеристикам, предъявляемым к серийной КС и соответствует современным требованиям, предъявляемым к НКС. Представленные в работе конструкторские решения показали свою эффективность и целесообразность. Камеру, после ресурсной отработки можно рекомендовать для применения на серийных двигателях НК-16СТ, НК-16-18СТ и опытного двигателя НК-16-20СТ.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 28775-90 "Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия". Госстандарт, М., 1991.
2. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. Самара. Изд-во Самарского научного центра РАН; 2002. 286с.
3. Куценко Ю.Г. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. Екатеринбург-Пермь: УрО РАН, 2006.
4. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 220 с.

5. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 280с.

6. Гриценко Е.А и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. – Самара: СНЦ РАН, 2002.-527с.

#### References

1. State standard 28775-90 Gas pumping units driven with gas turbine. General specifications. M.: Standartinform, 2005. p 12.
2. Postnikov A.M. Decrease nitrogen oxide in exhaust gases GTP. Samara: The Samara centre of science of the Russian Academy of Sciences, 2002.p 286.
3. Kutchenko Yu.G. Numerical methods an estimation of emission characteristics of combustion chambers of gas turbine engines. Ekaterinburg-Perm, The Ural branch of the Russian Academy of Sciences
4. Mingazov B.G. Combustion chambers of gas turbine engines. Kazan: Publishing house of the Kazan state technical university, 2004. p 220.
5. Pchelkin Yu.M. Combustion chambers of gas turbine engines. M.: Mashinostroenie, 1984. p 280.
6. Gritcenko E.A. and others. Some questions of designing aviation gas turbine engines. Samara: The Samara centre of science of the Russian Academy of Sciences, 2002.-p 527.

## TECHNICAL SOLUTIONS OF NO<sub>x</sub> DECREASE IN TRADITIONAL COMBUSTION CHAMBER OF GTE NK-16ST

© 2009 A. N. Markushin<sup>1</sup>, V. K. Merkushin<sup>1</sup>, V. M. Byshin<sup>1</sup>, A. V. Baklanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-Stock Company «Kazan motor building production association»

<sup>2</sup>Kazan State Technical University

The results of traditional combustion chamber with modified construction examinations are presented. Decreased concentration of toxic agents emissions in comparison with serial combustion chamber is reached.

*The combustion chamber, the lowered level of emission, experimental research*

### Информация об авторах

**Маркушин Андрей Николаевич**, главный конструктор Казанского моторостроительного производственного объединения. E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Область научных интересов: разработка и производство газотурбинных двигателей.

**Меркушин Валентин Константинович**, ведущий инженер–конструктор отдела главного конструктора Казанского моторостроительного производственного объединения. E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Область научных интересов: проектирование камер сгорания ГТД.

**Бышин Владимир Михайлович**, главный специалист отдела главного конструктора Казанского моторостроительного производственного объединения. E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Область научных интересов: низкоэмиссионное сжигание топлив в камерах сгорания ГТД.

**Бакланов Андрей Владимирович**, аспирант Казанского государственного технического университета. E-mail: [andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru). Область научных интересов: горение в турбулентном потоке, моделирование, исследование.

**Markushin Andrey Nikolaevich**, The main designer of Joint-Stock Company «Kazan motor building production association». E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Area of research: development and manufacture gas turbine engines.

**Merkushin Valentin Konstantinovich**, The leading engineer-designer of Department of the main designer of Joint-Stock Company «Kazan motor building production association». E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Area of research: Designing of combustion chambers of GTE.

**Byshin Vladimir Mihailovich**, The main expert of Department of the main designer of Joint-Stock Company «Kazan motor building production association». E-mail: [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru). Area of research: fuel burning with low level of emission in combustion chambers of GTE.

**Baklanov Andrey Vladimirovich**, The post-graduate student of Kazan State Technical University. E-mail: [andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru). Area of research: Burning in a turbulent stream, modelling.