

УДК 621.438:536.38

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ВЫБРОСЫ NO_x В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

© 2013 А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов

ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

Представлены исследования по определению полей концентрации в закрученном потоке вихревых горелок различного конструктивного исполнения, применяемых в камерах сгорания, работающих по принципу сжигания предварительно перемешанной «бедной» топливовоздушной смеси. Оценено влияние качества подготовки топливовоздушной смеси на выбросы оксидов азота в камере сгорания ГТД.

Смешение, горелочное устройство, камера сгорания, оксиды азота, эксперимент.

В настоящее время одной из эффективных концепций низкоэмиссионного сжигания топлива является концепция LPP (Lean – premixed and prevaporised), которая основана на низкотемпературном ($T_{пл} \leq 1800...1900$ К) сжигании предварительно перемешанной «бедной» топливовоздушной смеси (ТВС) [1]. Эта концепция предусматривает тщательное перемешивание топлива с воздухом в специальном горелочном устройстве перед подачей в зону горения. Известно, что техническое совершенство таких горелочных устройств обеспечивает успешное решение задачи снижения выбросов оксидов азота с сохранением высокой эффективности и устойчивости процесса горения.

Поэтому исследования, направленные на улучшение качества подготовки смеси и процессов смешения в струе таких горелочных устройств, являются необходимыми при создании и доводке ка-

мер сгорания ГТД, выполненных в рамках концепции LPP.

На рис.1 приведены схема такого горелочного устройства и картина течения в области подготовки, стабилизации и сжигания гомогенной ТВС.

Для реализации устойчивой работы камеры сгорания во всём диапазоне рабочих режимов горелка выполнена двухзонной. Топливный газ через отверстия в лопатках завихрителя (основной контур) поступает в поток воздуха, идущий по межлопаточным каналам, и образует на выходе из горелки гомогенную ТВС.

Для устойчивой работы камеры на низких режимах, а также при розжиге, в горелке за центральным телом находится «дежурная зона», воздух и топливо в которую подаются отдельно через специальные отверстия в задней стенке развитой втулки завихрителя, при этом работая, как горелка диффузионного типа.

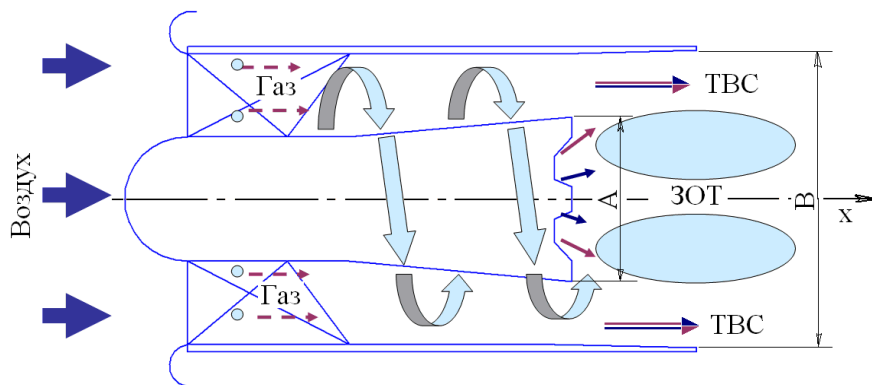


Рис.1. Схема горелочного устройства и картина течения потока

Схема комбинированной стабилизации пламени основана на использовании трёх механизмов [2]:

1) образования радиального градиента статического давления при закрутке, способствующего приосевому распаду закрученного потока;

2) действия градиента на срезе центрального тела (развитой втулки завихрителя);

3) газодинамической стабилизации на струях воздуха, вдуваемого внутрь жаровой трубы из отверстий в окончании центрального тела под углом к линиям тока.

Исследование качества подготовки ТВС проводилось для трёх горелок с различным диаметром выходной части развитой втулки завихрителя в три этапа:

- 1) получение поля концентраций;
- 2) оценка однородности смеси;
- 3) выявление степени перемешивания ТВС.

Горелки № 1, 2, 3 имеют соотношение диаметра выходной части развитой втулки завихрителя к диаметру выходного сопла горелки соответственно $A/B=0,5$; $0,62$; $0,71$.

На рис.2 приведена принципиальная схема стендовой установки, которая пред-

назначена для измерения полей концентрации в закрученном потоке вихревых горелок. В системе стенда предусмотрен подогрев углекислого газа. Подача воздуха осуществляется от сети высокого давления, подача углекислого газа CO_2 от баллонной системы. Пробы отбираются на срезе сопла горелки газоотборным зондом в виде трубки с внутренним диаметром 1 мм, закреплённой в координатном устройстве. Концентрация CO_2 определяется газоанализатором ПКУ-4-МК-С.

В стендовых условиях моделировались условия по составу смеси при работе камеры сгорания на номинальном режиме работы двигателя – коэффициент избытка воздуха в основной зоне горения $a = 2$:

$$a = \frac{G_6}{L_0 \cdot G_T}, \quad (1)$$

где

$L_0 = 17,2 \cdot (mCH_4/mCO_2) = 17,2 \cdot 0,365 = 6,27$ – стехиометрический коэффициент при имитации топливного газа углекислым газом CO_2 ; G_6 – расход воздуха; G_T – расход топлива; m – молекулярная масса газа.

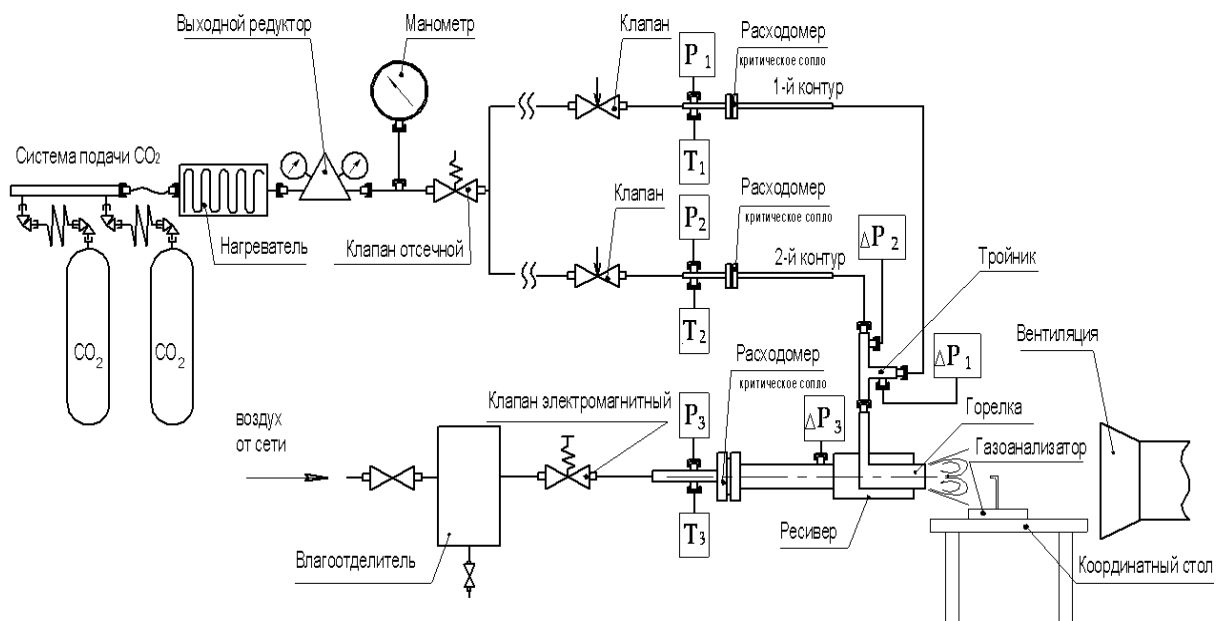


Рис.2. Стенд определения пропускной способности и концентрации CO_2

Определение смешения струи с окружающим воздухом проводилось измерением местных концентраций углекислого газа, подаваемого через отверстия в завихрителе с последующим измерением его концентраций по сечениям закрученного потока.

Измерения концентрации осуществлялись от середины горелки, за которую был принят центр втулки «0», далее пробоотборник перемещался в обе стороны вдоль сопла горелки поперек струи с шагом 4 мм. По данному принципу измерения повторно проводились на срезе сопла ($x/B=0$), одного ($x/B=1$), двух и трёх калибров.

Проведение измерений concentra-

ции CO_2 вдоль оси закрученной струи за горелкой было направлено на определение длины, на которой происходит выравнивание полей концентрации, и темпа изменения концентрации вдоль оси струи.

Этап 1. Распределение концентраций по сечениям за горелкой представляет картину, позволяющую увидеть динамику изменения уровня концентрации CO_2 во всей области измерения и в каждой конкретной точке струи. Поэтому поля концентраций топлива по поперечному сечению сопла представлялись в виде $C_{CO_2} = f(r)$ для трёх горелок в четырех сечениях (рис. 3).

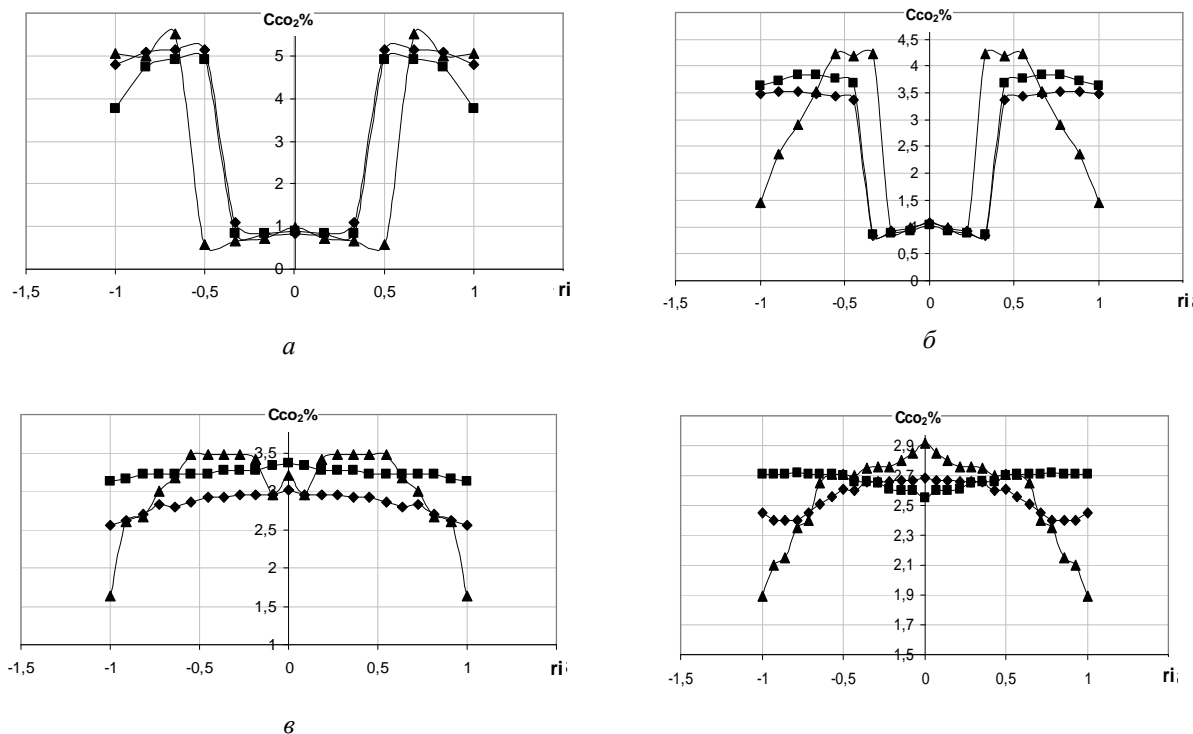


Рис.3. Оценка качества смешения ТВС при $G_B = 0,086 \text{ кг/с}$; $G_T = 21 \text{ кг/ч}$:

◆ – горелка № 1; ■ – горелка № 2; ▲ – горелка № 3

Исследование по определению поля концентраций в горелках (рис. 3, а) показало, что в центре сопла имеет место пониженная ~ на 30% концентрация CO_2 относительно среднего значения, что объясняется наличием зоны обратных токов (ЗОТ) на срезе развитой втулки завихрителя. При этом увеличение диаметра

втулки приводит к увеличению объёма ЗОТ, в результате чего большее количество подготовленной ТВС увлекается в данную зону. Затем, с перемещением зонда из области расположения втулки, наблюдается резкий рост концентрации CO_2 , а в области завихрителя её дальнейшее выравнивание.

Из рис. 3, б видно, что на расстоянии одного калибра от среза сопла картина распределения CO_2 качественно схожа с картиной на срезе ($x/B=0$). Однако наблюдается количественное падение концентрации в районе завихрителя на 0,5 % и уменьшение поперечных размеров ЗОТ.

Из рис. 3, в видно, что на расстоянии $x/B=2$ происходит практически полное выравнивание концентрации CO_2 у горелок № 1 и 2, что характеризуется большой интенсивностью процесса смешения. У горелки № 3 в поле концентраций CO_2 имеется «провал», который свидетельствует о более протяженной ЗОТ. При этом у данной горелки наблюдается самый высокий уровень концентрации, а полное выравнивание концентрации CO_2 достигается на расстоянии $x/B=3$ (рис. 3, г).

Этап 2. Одной из основных задач при создании горелки с предварительной подготовкой ТВС является выравнивание поля концентраций внутри зоны смешения горелки. Степень гомогенизации смеси оценивается по равномерности поля концентраций на срезе сопла горелки и в других сечениях.

Качество подготовки смеси, то есть равномерность её распределения в сечении, было представлено при помощи зависимости, являющейся максимальным относительным отклонением концентрации от среднеинтегрального значения поля концентраций [3]:

$$\bar{C} = \frac{C_{\text{CO}_2 \text{ max}} - C_{\text{CO}_2 \text{ ср}}}{C_{\text{CO}_2 \text{ ср}}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{CO}_2 \text{ max}}$ – максимальное значение измеренной концентрации; $C_{\text{CO}_2 \text{ ср}}$ – среднеинтегральное значение концентрации.

При этом показателем равномерного распределения концентрации ТВС в сечении является значение $\bar{C} = 0$.

На рис.4 приведены гистограммы величин \bar{C} для трёх горелок в четырёх сечениях. Из рисунка видно, что наилучшее качество смешения наблюдается у горе-

лочного устройства № 1, в котором отклонение от среднего составило $\bar{C} = 0,48$, максимальное отклонение \bar{C} достигается у горелки №3, что свидетельствует о низком качестве подготовки смеси.

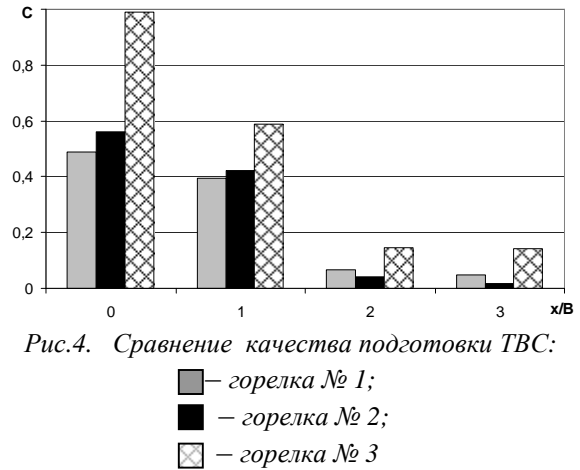


Рис.4. Сравнение качества подготовки ТВС:

- – горелка №1;
- – горелка №2;
- ▨ – горелка №3

Тенденция изменения качества смешения в четырёх сечениях здесь заключается в его улучшении с отдалением от среза сопла, достижении минимального значения \bar{C} на длине двух калибров и дальнейшем снижении. При этом на длине $x/B=3$ наблюдается фактически полное выравнивание поля концентраций, поэтому значение \bar{C} практически приближается к нулю.

Этап 3. Измерения местных значений концентраций CO_2 позволили оценить степень перемешанности струи с окружающим воздухом. Степень перемешивания оценивалась с помощью коэффициента смешения m , представляющего собой отношение расхода эжектированного воздуха G_3 к расходу эжектирующей струи G_3 [4]:

$$m = G_3 / G_3. \quad (3)$$

В случае подачи инертного газа в струю с последующим измерением его концентрации экспериментальные значения коэффициента смешения m определялись с помощью уравнения материального баланса:

$$m = \frac{C_{\text{CO}_2 3} - C_{\text{CO}_2 i}}{C_{\text{CO}_2 i} - C_{\text{CO}_2 j}}, \quad (4)$$

где концентрации $CO_2: C_{CO_2}$ – перед завихрителем фронтального устройства; C_{CO_2i} – текущая в струе; C_{CO_2j} – в окружающем воздухе.

В результате обработки экспериментальных данных с помощью формулы (4) были получены зависимости коэффициента смешения m от диаметра развитой втулки завихрителя. На рис. 5 приведены характерные картины смешения закрученной струи с окружающим воздухом в виде полей распределения местных значений m . Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что изменение выходного диаметра развитой втулки влияет на профиль местных значений коэффициента смешения. На рис.5, а наблюдается высокая интенсивность смешения в приосевой области горелки, с увеличением диаметра развитой втулки завихрителя интенсивность смешения преобладает в периферийной области.

Дальнейшие работы по исследованию процессов в камерах сгорания с тремя горелочными устройствами были проведены в составе двигателя НК-38СТ: на режимах прогрева и номинальном работы двигателя, где было проведено измерение выбросов оксидов азота.

Из рис.6 видно, что наиболее высокий уровень концентрации оксидов азота в отработанных газах наблюдается в камере сгорания с горелочным устройством № 3.

Это объясняется тем, что в дежурной зоне горелки №3 преобладает большой объем факела с околостехиомерическим составом смеси, он формирует в центре горелки высокотемпературное ядро потока, что увеличивает выбросы оксида азота. К тому же увеличение диаметра развитой втулки завихрителя приводит к перераспределению воздуха в жаровой трубе и «обогащает» смесь в зоне горения.

Высокую роль в формировании оксидов азота также играет качество подготовки топливоздушной смеси, что наглядно демонстрируют проведенные выше эксперименты. В горелке № 3 качество подготовки ТВС практически в два раза ниже, чем у вариантов № 1 и 2, при этом наилучшая подготовка наблюдается в горелке № 1.

Для обеспечения минимального выброса оксидов азота в камере с горелочным устройством рассмотренного типа найдено оптимальное соотношение диаметра развитой втулки завихрителя и диаметра сопла горелки $A/B=0,5$.

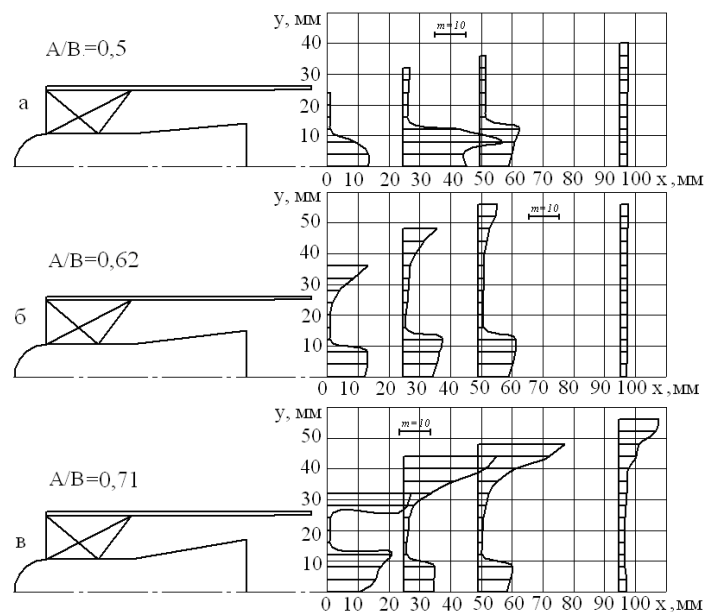


Рис.5. Поля местных значений коэффициента смешения за горелочным устройством: а - горелка №1; б - горелка №2; в - горелка №3

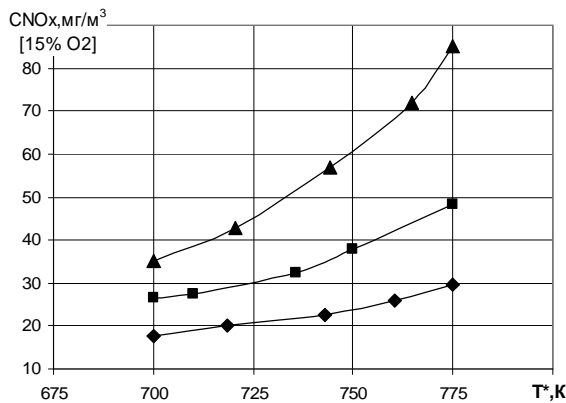


Рис. 6. Сравнение экологических характеристик камер сгорания с горелками № 1, 2, 3, ГТУ НК-38СТ при $G_{Т1к}/G_{Т2} = 0,025$:
 ◆ – горелка № 1; ■ – горелка № 2; ▲ – горелка № 3

Библиографический список

1. Постников, А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст]/ А. М. Постников. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН,

2002. – 286 с.

2. Беляев, В.В. Повышение экологической безопасности ГТУ путём организации малоэмиссионного горения в камерах сгорания ГТД [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук // В.В. Беляев. Самара, 2006. – 24 с.

3. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения [Текст]/ Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев [и др.]. – Самара: изд-во Самарского научного центра РАН, 2004. – 266 с.

4. Мингазов, Б.Г. Влияние формы горелочного устройства на параметр смешения в закрученной струе [Текст]/ Б.Г. Мингазов, А.В. Бакланов // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2011». – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2011. – Т.1. – С.471–477.

ANALYZING THE QUALITY OF PREPARING FUEL-AIR MIXTURE AND ITS INFLUENCE ON NO_x IN A LOW EMISSION GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBER

© 2013 A. N. Markushin, A. V. Baklanov

«Kazan motor production association» plc

The paper presents the results of research carried out to determine the concentration fields in the swirl flow of swirl burners of various design. The burners are used in combustion chambers working on the principle of burning premixed lean air-fuel mixture. The influence of the quality of pre-operation air-fuel mixture on the NO_x emission in a gas turbine engine combustion chamber is assessed.

Mixing, burner, combustion chamber, nitrogen oxides, experiment.

Информация об авторах

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

Бакланов Андрей Владимирович, ведущий инженер-конструктор отдела главного конструктора Казанского моторостроительного производственного объединения. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Область научных интересов: проектирование камер сгорания ГТД, горение в турбулентном потоке, моделирование, исследование.

Markushin Andrey Nikolaevich, chief designer of «Kazan motor production association» plc. E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Area of research: development and manufacture of gas turbine engines.

Baklanov Andrey Vladimirovich, leading design engineer of the department of the chief designer, «Kazan motor production association» plc. E-mail: andreybaklanov@bk.ru. Area of research: designing of gas turbine engine combustion chambers, burning in a turbulent flow, modelling.