

УДК 629.7.036.3

А. Н. МАРКУШИН, А. В. БАКЛАНОВ

ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение», Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В СТРУЯХ ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛОК

В статье приводятся результаты испытаний по измерениям концентрации углекислого газа, имитирующего топливо, в струях вихревых горелок камеры сгорания авиапроизводной газотурбинной установки НК-16СТ. Представлены экспериментальный стенд, методика и результаты проведенных испытаний по определению пропускной способности и качеству смешения в струях вихревых горелок различной конструкции. Описываются особенности конструкции исследуемых горелок. Формируется поле концентраций и проводится анализ качества смешения по длине и в различных сечениях закрученной струи.

Ключевые слова: камера сгорания, экспериментальное исследование, газотурбинный двигатель, конвертирование, завихритель, смешение, вихревая горелка.

Введение

Одним из важнейших параметров, влияющих на процессы горения в камере сгорания конвертированного авиационного ГТД, работающего на газообразном топливе, является качество смешения топлива с воздухом в вихревых горелках. Формированием топливоздушной смеси на выходе из вихревой горелки можно влиять на температуру пламени, форму факела, выбросы вредных веществ, поэтому исследования, проводимые в данном направлении, являются актуальными.

1. Объект исследования

В данной работе рассматриваются вихревые горелки двух вариантов (рис. 1), работающие по общему принципу.

Топливо, подаваемое газовыми форсунками 1 вдоль оси горелки, перемешивается в камере смешения 3 с закрученным в завихрителе 2 потоком воздуха. В результате в первичной зоне камеры сгорания за сопловым насадком 4 вихревой горелки формируются потоки топливоздушной смеси, имеющие приосевые циркуляционные области. Наличие таких областей обеспечивает циркуляцию горячих продуктов сгорания из зоны горения к корню факела свежей смеси, что создает условия для устойчивого воспламенения и стабилизации пламени. Горелка № 2 отличается от № 1 тем, что вместо диффузорного соплового насадка у нее установлен конфузионный насадок. К тому же у горелки № 2 между завихрителем и форсункой сформирован кольцевой канал. Завихрители обеих горелок имеют одинаковую геометрию.

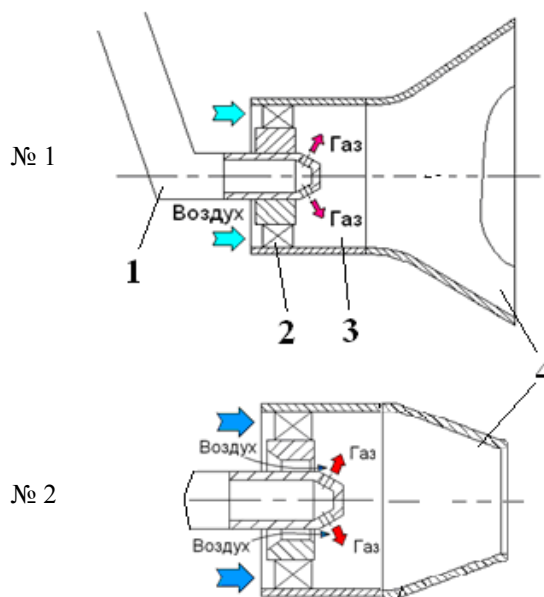


Рис. 1. Схема горелочных устройств

2. Экспериментальная установка

На рис. 2 приведена принципиальная схема стендовой установки, которая предназначена для проведения двух типов эксперимента: измерения пропускной способности и полей концентрации топлива в закрученном потоке вихревых горелок. Для проведения этих экспериментов стенд оборудован тремя системами: подвода воздуха, подвода газа и системой измерения.

Воздух от сети по трубе с расходомерным участком поступает в ресивер, предназначенный для размещения горелки и выравнивания поля скоростей на

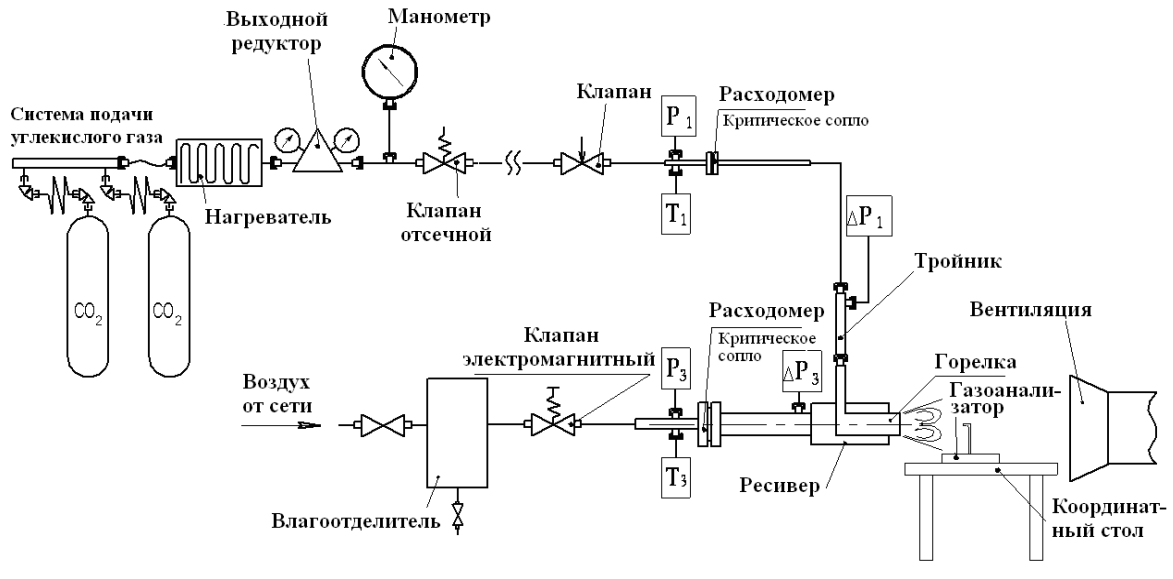


Рис. 2. Принципиальная схема стенда. Фото ресивера

входе в горелку. Горелка устанавливается в крышку ресивера, форсунка, при помощи которой топливо поступает к исследуемой горелке, устанавливается на корпусе ресивера. Для измерения давления перед завихрителем устанавливается трубка Пито.

В случае, когда испытания проводятся по определению смешения топлива с воздухом в струях вихревых горелок, к стенду подключается система подачи топлива, которое подводится от баллонной рампы, в качестве газа имитирующего метан используется углекислый газ CO₂. Для измерения полей концентрации на выходе из горелки установлено координатное устройство с приемником газоанализатора ПКУ-4-МК-С [1]. Это устройство позволило перемещать приемник газоанализатора в осевом и радиальном направлении. Измерения концентрации производились от центра горелки, за который была принята ось форсунки «0», далее производилось перемещение пробоотборника в обе стороны вдоль сопла горелки, поперек струи через каждые 4 мм. По данному принципу измерения повторно производились в шести сечениях: на срезе сопла и через каждые 50 мм до расстояния 300 мм.

3. Результаты исследования. Анализ

На первом этапе исследования вихревых горелок осуществлялось определение через них пропускной способности воздуха $V = f(\pi)$, с помощью выбранной для каждого варианта горелки характеристике [2]:

$$V = \frac{G_B \sqrt{T_B^*}}{P_B^*}, \text{ при } \pi = \frac{P_B^*}{P_{\text{ВЫХ}}^*}, \quad (1)$$

где G_B , T_B^* , $P_{\text{ВХ}}^*$, $P_{\text{Н}}^*$ - соответственно весовой расход воздуха, его температура, полное давление на входе в горелку и барометрическое давление. Определение V проводилось при отношении $P_{\text{ВХ}}^*/P_{\text{Н}}^* = 1,03$, что соответствует перепаду на жаровой трубе камеры сгорания, равному 3%. Режимы течения воздуха находились в области автомодельности по числу Рейнольдса.

Исследования, проведенные с двумя горелками (рис. 3) показали, что увеличение пропускной способности горелки № 2 начинает наблюдаться при

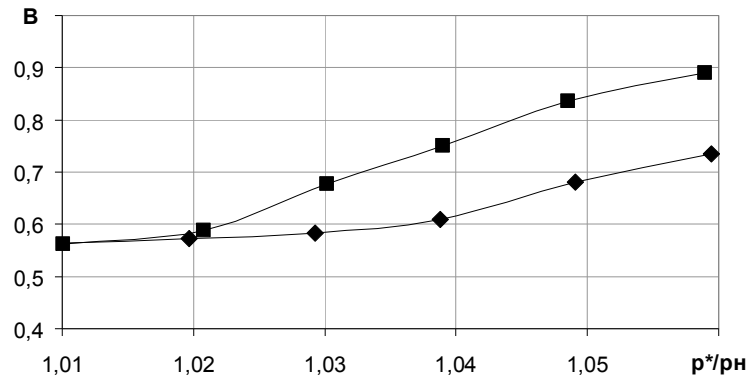


Рис. 3. Схема горелочных устройств: \blacklozenge – горелка № 1; \blacksquare – горелка № 2

перепаде давления равном 2%. При перепаде 3%, который обеспечивается в камере сгорания, вихревая горелка № 2 имеет по сравнению с первой, у которой, $V_3\%=0,59$, увеличенную пропускную способность $V_3\%=0,68$, что достигнуто путем организации кольцевого канала между форсункой и завихрителем.

При заданных геометрических характеристиках двигателя определяющим параметром при исследовании взаимодействия струи со сносимым потоком является гидродинамический параметр, представляющий собой отношение скоростного напора струи газа к скоростному напору потока:

$$\bar{q}_v = \frac{\rho_v \cdot V_0^2}{\rho_w \cdot W^2}, \quad (2)$$

где $\rho_v \cdot V_0^2$ - плотность и скорость струи газа;

$\rho_w \cdot W^2$ - плотность и скорость потока воздуха.

В условиях двигателя он составляет $\bar{q}_v = 9$, поэтому, определив на этапе выявления пропускной способности горелки расход и давление воздуха при $P_{вх}^*/P_H = 1,03$, рассчитывается плотность и скорость потока воздуха, затем подбирается такой расход и давление газа, чтобы в стендовых условиях гидродинамический параметр был равен 9.

Измерения концентраций CO_2 в струях горелки было направлено на определение длины, на которой происходит выравнивание поля концентрации, а также определение темпа изменения концентрации вдоль оси струи.

Для более наглядного представления интенсивности процесса смешения на рис. 4 приведены характеристики $CO_2 = f(\tau)$, более детально отражающие выравнивание концентрации по сечению струи на выходе из вихревых горелок.

За вихревой горелкой № 1, вследствие высоко-го скоростного напора, существенного расширения струи не происходит, при этом струя обладает высо-

кой эжекционной способностью и формирует узкое ядро потока, в котором происходит интенсивное смешение топлива с воздухом.

Вихревая горелка № 2 имеет широкое поле концентраций и низкий ее уровень, что объясняется объемной зоной рециркуляции вследствие постановки диффузорного насадка. На расстоянии 150мм имеет наименьшую концентрацию по сравнению с горелкой № 2.

Проведенные измерения полей концентрации за вихревыми горелками показали, что высокая интенсивность процесса смешения достигается у горелки № 1 за счет более объемной зоны рециркуляции, а у горелки № 2 вследствие высокой эжекционной способности закрученной струи.

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 $G_э$ к расходу эжектирующей струи G_3 [3]:

$$m = G_э / G_3. \quad (3)$$

Во время подачи углекислого газа в струю с последующим измерением его концентрации экспериментальные значения коэффициента смешения m определялись с помощью уравнения материального баланса:

$$m = \frac{r_{CO_2_3} - r_{CO_2_i}}{r_{CO_2_i} - r_{CO_2_j}}, \quad (4)$$

где $r_{CO_2_3}$ – концентрация CO_2 перед завихрителем фронтального устройства; $r_{CO_2_i}$ – текущая концен-

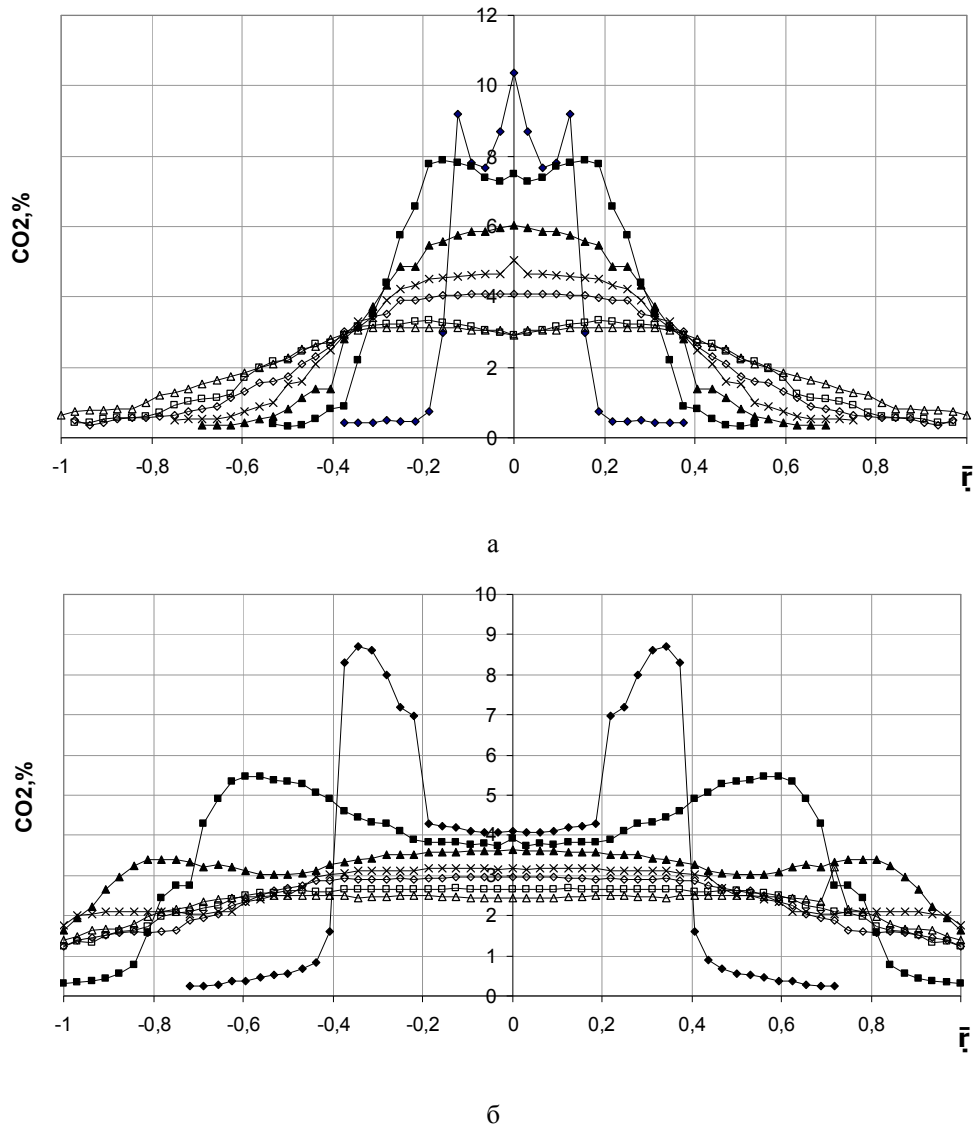


Рис. 4. Поле концентраций CO₂ в различных сечениях закрученной струи:
 ◆ – срез сопла; ■ – 50мм; ▲ – 100мм; × – 150мм; ◇ – 200мм; □ – 250мм; Δ – 380мм

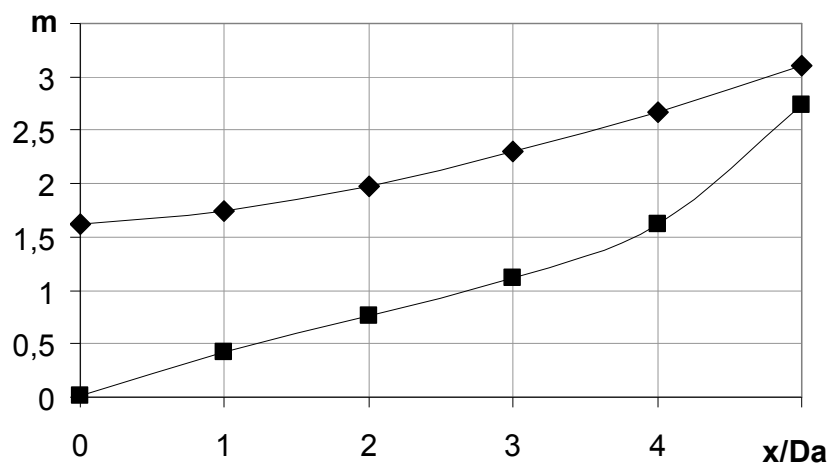


Рис. 5. Изменение коэффициента смешения в закрученной струе вихревых горелок:
 ◆- горелка № 1; ■- горелка № 2

трация CO_2 в струе; c_{CO_2} – концентрация CO_2 в окружающем воздухе.

На рис. 5 представлены графики изменения m вдоль оси струи при отдалении от сопла горелки. Откуда видно что, при увеличении закрутки струи коэффициент смешения резко возрастает, что говорит об интенсификации процесса смешения при отдалении от сопла горелки. При этом эжекционная способность увеличивается и на расстоянии 5 калибров параметр смешения в струе за горелкой № 1 и 2 практически выравнивается.

Литература

1. Маркушин, А. Н. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД [Текст] / А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов // Вестник СГАУ им. С. П. Королева. – 2013. - № 3(41), Ч. 1. – С. 131-138.

2. Постников, А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ [Текст] / А. М. Постников. – Самара : Изд-во СНЦ РАН; 2002. – 286 с.

3. Маркушин, А. Н. Исследование качества подготовки топливозоудушной смеси и его влияния на выбросы NO_x в малоэмиссионной камере сгорания ГТД [Текст] / А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов // Вестник СГАУ им. С. П. Королева. – 2013. – № 3(41), Ч. 1. – С. 139-145.

Поступила в редакцию 05.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. В. Щукин, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева «КАИ», Казань.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ З ВИМІРУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В СТРУМЕНЯХ ВИХРОВИХ ПАЛЬНИКІВ

А. М. Маркушин, А. В. Бакланов

У статті наведено результати випробувань з вимірювання концентрації вуглекислого газу, який імітує паливо, в струменях вихрових пальників камери згоряння авіапохідної газотурбінної установки НК-16СТ. Представлено експериментальний стенд, методику і результати проведених випробувань щодо визначення пропускну придатності і якості змішування вихрових пальників різної конструкції. Описуються особливості конструкції досліджуваних вихрових пальників. Формується поле концентрацій і проводиться аналіз якості змішування по довжині і в різних перетинах закрученого струменя.

Ключові слова: камера згоряння, експериментальне дослідження, газотурбінний двигун, конвертування, завихрювач, змішування, вихровий пальник.

TEST RESULTS OF MEASUREMENTS OF CARBON DIOXIDE CONCENTRATION IN THE JETS OF SWIRL BURNERS

A. N. Markushin, A. V. Baklanov

Article presents the results of tests on measurements of carbon dioxide concentration, which simulates fuel in the jets of combustion chamber's swirl burners of a gas turbine plant NK-16ST which is made of the aircraft engine. Experimental facility, technique and results of tests conducted to determine the capacity and quality of mixing in jets of swirl burners of various designs are presented. Design features of studied burners are described. Concentration field is formed and analysis of the quality of mixing along the length and in various sections of a swirling jet is given.

Key words: combustion chamber, experimental research, design, gas turbine engine, converting, hydraulic loss.

Маркушин Андрей Николаевич – Главный конструктор, ОАО «Казанское Моторостроительное Производственное Объединение», Казань, Россия, e-mail: AMarkushin@kmpo.ru

Бакланов Андрей Владимирович – начальник бюро камер сгорания, ОАО «Казанское Моторостроительное Производственное Объединение», Казань, Россия, e-mail: andreybaklanov@bk.ru.