

УДК 621.438

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И ДОВОДКИ НИЗКОЭМИССИОННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

© 2013 А. Н. Маркушин, А. В. Бакланов

ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

Выполнены ряд стендов, представляющих собой базу по исследованию газодинамических процессов, процессов смешения и горения в горелочном устройстве камеры сгорания ГТД, а также стенды для испытаний полноразмерных камер сгорания отдельно и в составе двигателя. Данная база является необходимой для создания и отработки конструкции низкоэмиссионных камер сгорания ГТД.

Стенды, камера сгорания, токсичность, эксперимент, исследование, экология.

Несмотря на многообразие существующих подходов и наличие программ газодинамического моделирования, таких как Ansys-Fluent, Ansys-CFX, FlowVision и т.д., на сегодняшний день не выработана универсальная методика, позволяющая учитывать совокупность сложных химических и газодинамических процессов при их моделировании в камерах сгорания ГТУ. К тому же отработка моделей в этих программах всегда сопровождается сравнением полученных данных с результатами реального эксперимента. Поэтому эксперимент является неотъемлемым процессом при создании и доводке камер сгорания ГТД.

С целью создания и отработки конструкции низкоэмиссионных камер сгорания ГТД на ОАО «КМПО» выполнены ряд стендов, представляющих собой базу по исследованию газодинамических процессов, горения и смешения в горелочном устройстве, камере сгорания, а также в составе полноразмерного двигателя.

Исследование качества подготовки топливоздушной смеси на выходе из горелочного устройства

На рис.1 приведена принципиальная схема стендовой установки, которая предназначена для проведения двух типов эксперимента: измерения пропускной способности и полей концентрации в закрученном потоке вихревых горелок.

Исследование горелок по определению пропускной способности воздуха $G_{B_{пр}} = f(\pi)$ осуществляется с помощью определенной для каждого варианта горелки характеристики [1]:

$$G_{B_{пр}} = \frac{G_B \sqrt{T_B^*}}{P_{BX}^*}; \quad p = \frac{P_{BX}^*}{P_{ВЫХ}^*},$$

где $G_B, T_B^*, P_{BX}^*, P_H^*$ – соответственно весовой расход воздуха, его температура, полное давление на входе в горелку и барометрическое давление. Определение $G_{B_{пр}}$ проводится при отношении $P_{ex}^*/P_H^* = 1,03$, что соответствует перепаду на жаровой трубе камеры сгорания, равному 3%. Режимы течения воздуха находятся в области автомодельности по числу Рейнольдса.

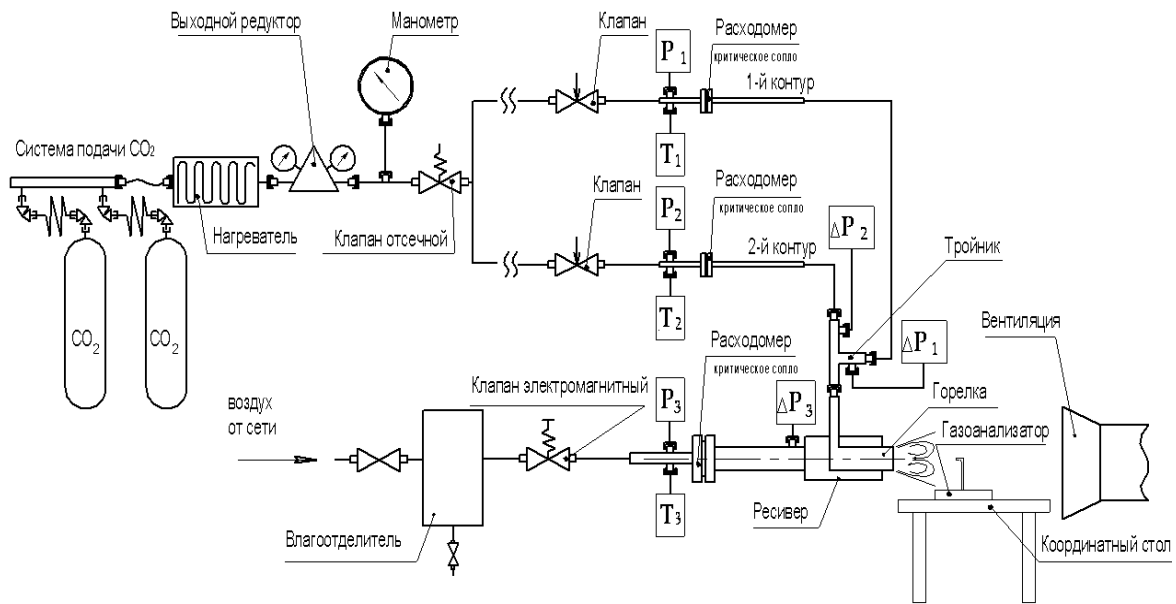


Рис.1. Стенд определения пропускной способности и концентрации CO_2

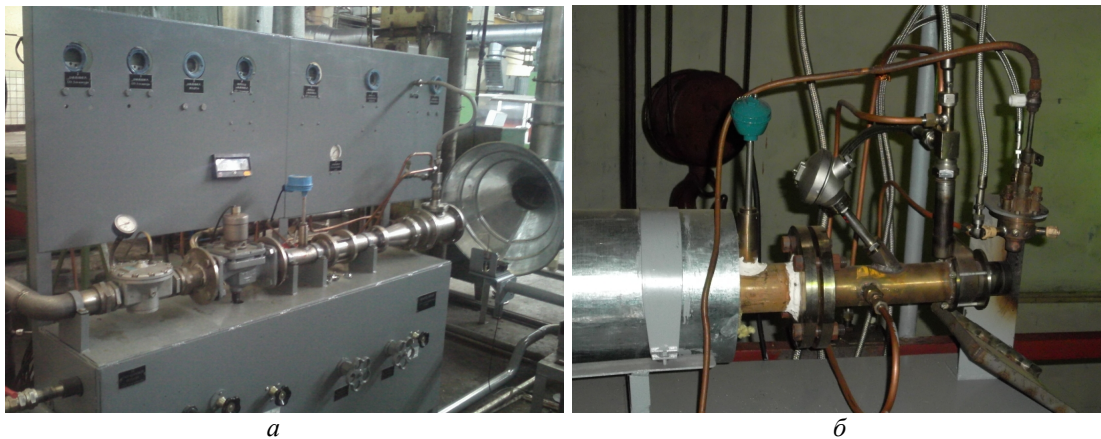


Рис. 2. Стенды по исследованию горелочных устройств:

а – по пропускной способности и концентрации CO_2 ; б – для газодинамических и огневых испытаний

Газодинамическая доводка горелок проводится на экспериментальной установке (рис.2, а). Воздух от заводской сети по трубе с расходомерным участком поступает в ресивер, на выходе из которого установлена исследуемая горелка, в которую подводится углекислый газ CO_2 от баллонной системы. На срезе сопла горелки отбираются пробы газа газоанализатором ПКУ-4-МК-С.

Перемещается газоотборный зонд с помощью координатного устройства с переменным шаговым расстоянием 2 мм.

Перед измерениями определяется время отбора пробы, при которой стабилизируется постоянное значение концентрации на неизменном режиме испытания.

В ходе исследований решается задача выбора наиболее оптимальной конструкции горелки для обеспечения низкого уровня неравномерности поля концентрации топливовоздушной смеси на срезе сопла с целью получения минимальной эмиссии оксидов азота и обеспечения характеристик интенсивного горения.

Качество подготовки смеси и коэффициент смешения оцениваются по зависимостям (2)-(4) статьи [2].

Основные технические характеристики стенда:

- рабочие среды – воздух, углекислый газ;
- расход воздуха через горелку от 0,03 до 0,20 кг/с;
- расход углекислого газа через первый контур горелки от 1 до 24 кг/ч;
- расход углекислого газа через второй контур горелки от 2 до 48 кг/ч;
- перепад давления воздуха на горелке от 0,8 до 5,2 кПа;
- перепад давления углекислого газа на горелке первого и второго контуров от 5 до 60 кПа;
- расход углекислого газа через критические сопла от 1 до 48 кг/ч.

Исследование газодинамических параметров закрученного потока и огневые испытания горелочных устройств

Стенд (рис. 2, б) предназначен для получения полей полных давлений на выходе из горелки, осевых и тангенциальных составляющих давлений и скоростей. Для этого на выходе из горелки устанавливается пневмометрический прибор, размещенный на координатном столе для перемещения прибора по заданным координатам.

Работа стенда осуществляется следующим образом (рис. 3). Воздух из заводской сети поступает на вход в расходомерный участок, представляющий собой цилиндрический канал с установленным в нем критическим соплом.

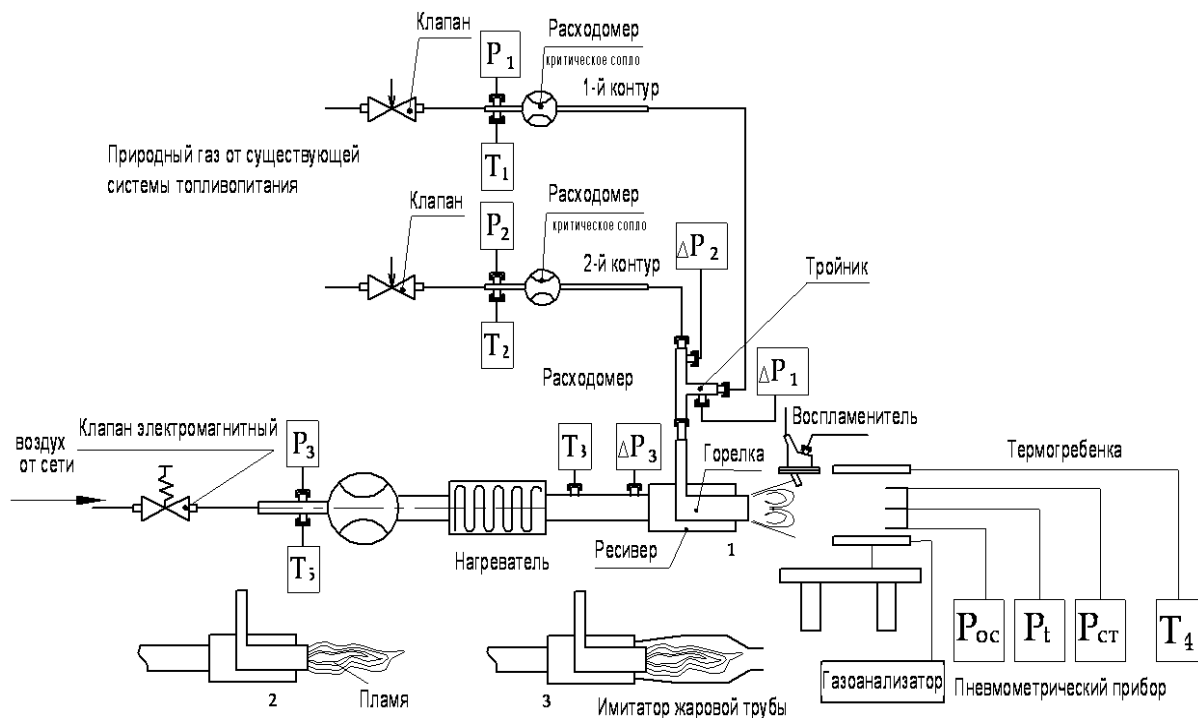


Рис.3. Стенд газодинамических и огневых испытаний горелочных устройств

Далее воздух поступает в подогреватель, представляющий собой электрическую печь, а затем транспортируется к горелочному устройству.

Основные технические характеристики стенда:

- рабочие среды – воздух, природный газ;
- расход воздуха через горелку от 0,03 до 0,2 кг/с;
- расход природного газа через первый контур горелки от 0,4 до 10 кг/ч;
- расход природного газа через второй контур горелки от 0,8 до 20 кг/ч;
- избыточное давление воздуха перед горелкой от 0,8 до 6,2 кПа;
- избыточное давление природного газа на горелках первого и второго контуров от 5 до 60 кПа;
- максимальная температура воздуха перед горелкой от 400 до 500 °С.

Второе назначение стенда: огневые испытания горелочного устройства.

В ходе испытаний выполняются розжиг горелочного устройства, определение концентрации продуктов сгорания в различных сечениях пламени. Для определения концентрации компонентов конечной газовой смеси используются охлаждаемый газоотборный зонд и газоанализатор testo350.

Измеряются концентрации NO_x , CO , O_2 и CH_4 в отобранной пробе, определяются коэффициент избытка воздуха $a_{\text{хим}}$ и полнота сгорания $h_{\text{Г}}$ на заданных режимах.

Также определяются границы устойчивого горения и изменение температуры по длине факела.

Определяются пределы возникновения неустойчивого горения и срыва пламени на различных режимах для соответствующих распределений топливного газа по контурам горелки.

Температура пламени измеряется высокотемпературной одноточечной гребёнкой с камерой торможения из неме-

таллического материала – кристаллического диоксида циркония, рассчитанной на измерение температуры до 1800°С, после чего строится распределение температуры вдоль оси завихрителя горелочного устройства или поле температур в заданном сечении.

Для определения полноты сгорания топлива, учитывающей только химический недожог метана, в зависимости от коэффициента избытка воздуха используется выражение [4]

$$h_{\text{Г}} = 1 - (0,20175 \cdot EI_{\text{CO}} + EI_{\text{CH}_4}) \cdot 10^{-3},$$

где EI_{CO} , EI_{CH_4} – индексы эмиссии окиси углерода и метана, коэффициент 0,20175 – учитывает отношение низшей теплоты сгорания окиси углерода $Q_{\text{H}}^{\text{CO}} = 10096$ кДж/кг к низшей теплоте сгорания метана $Q_{\text{H}}^{\text{CH}_4} = 50042$ кДж/кг при стандартных условиях [5].

Индексы эмиссии EI_i для окиси углерода, окислов азота и несгоревших углеводородов (метана) рассчитывались по уравнению

$$EI_i = \frac{m_i}{m_{\text{в}}} (1 - a_i \cdot L_0) \cdot c_i \cdot 10^{-3},$$

где $L_0 = 17,2$ – стехиометрический коэффициент сгорания метана (кг воздуха / кг топлива); a_i – суммарный или местный коэффициент избытка воздуха; m_i – молярная масса определяемого токсичного вещества (CO , NO_x и CH_4); $m_{\text{в}}$ – молярная масса воздуха; c_i – объемная доля токсичного вещества (ppm). При расчетах EI_i берутся следующие значения молярных масс: $m_{\text{CH}_4} = 16,042$ кг/кмоль, $m_{\text{CO}} = 28,010$ кг/кмоль, $m_{\text{NO}} = 30,006$ кг/кмоль и $m_{\text{в}} = 28,964$ кг/кмоль [6].

Данный стенд позволяет помещать горелочное устройство в имитатор жаровой трубы и проводить испытания в условиях одного горелочного отсека, где также отрабатывается розжиг и определяются срыв пламени, температура пламени и выбросы вредных веществ.

Исследование рабочего процесса полноразмерной камеры сгорания

Полноразмерные камеры сгорания исследуются на стенде, схема которого показана на рис.4.

Стенд оборудован необходимыми системами измерения параметров и их регистрации. В составе стенда находится ГТД НК-16СТ, который служит для подвода сжатого воздуха к испытываемой камере сгорания. Воздух отбирается за 9

ступенью компрессора высокого давления, затем поступает по трубопроводу в мерный участок. Расход воздуха измеряется расходомерным устройством (труба Вентури) с регистрацией показаний датчика давления, температура воздуха контролируется термопарой группы хромель-алюмель. Газ подаётся по топливной системе стенда в зависимости от числа контуров к топливному коллектору камеры сгорания.

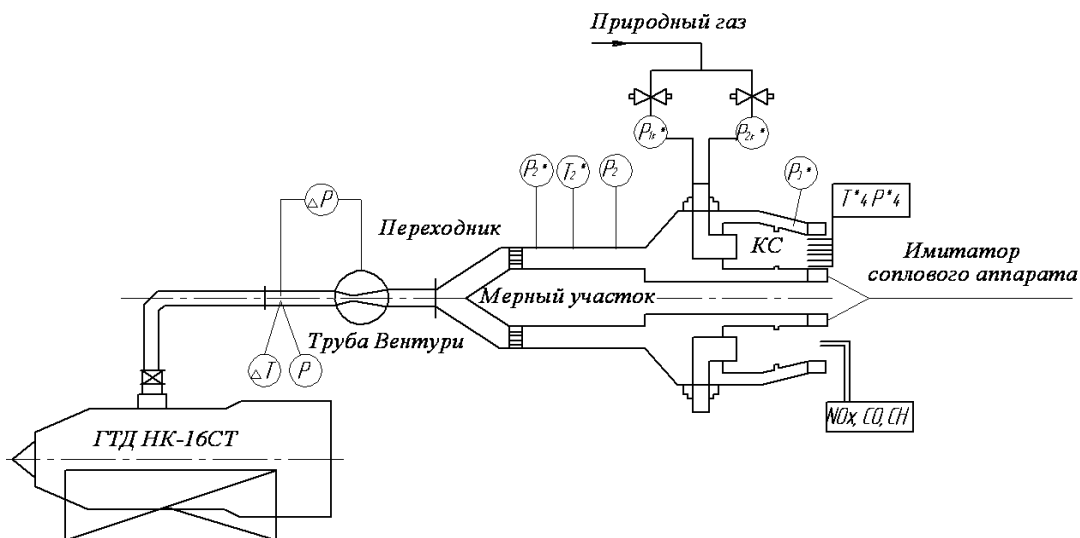


Рис. 4. Схема стенда для испытаний полноразмерных камер сгорания

Испытание камеры сгорания на данном стенде проводится в два этапа.

Первый этап: определение газодинамических характеристик камеры сгорания, которые включают в себя потери полного давления на жаровой трубе и в районе соплового аппарата. Для этого на выходе из камеры устанавливается гребёнка полного давления, а в наружном и внутреннем пространствах между корпусом и жаровой трубой устанавливаются три равномерно расположенных приемника полного давления.

По результатам измерений на каждом режиме рассчитываются потери полного давления в камере сгорания

$$\bar{\Delta p} = \frac{\Delta p^*}{P_{2abc}^*} = \frac{P_{2cp}^* - P_{4cp}^*}{P_{2cp}^* + P_n}$$

и перепад давления на стенках жаровой трубы

$$\Delta p_{cp} = \frac{P_{cm,cp}^* - P_{4cp}^*}{P_{2cp}^* + P_n},$$

где $P_{cm,cp}^*, P_{2cp}^*, P_{4cp}^*$ – среднеарифметические значения давлений, кгс/см²; P_n – атмосферное давление в условиях продувок, кгс/см².

По результатам измерений строятся графики зависимостей $\bar{\Delta p} = f(I_2)$ и $\bar{\Delta p}_{cm} = f(I_2)$, где I_2 – значение приведённой скорости воздуха на входе в камеру сгорания.

В случае получения неудовлетворительных результатов по гидравлическим потерям происходит доработка жаровой трубы.

Второй этап: в ходе «горячих» испытаний отрабатывается розжиг камеры, определяются срывные характеристики при разных значениях коэффициента избытка воздуха и распределения топлива по контурам.

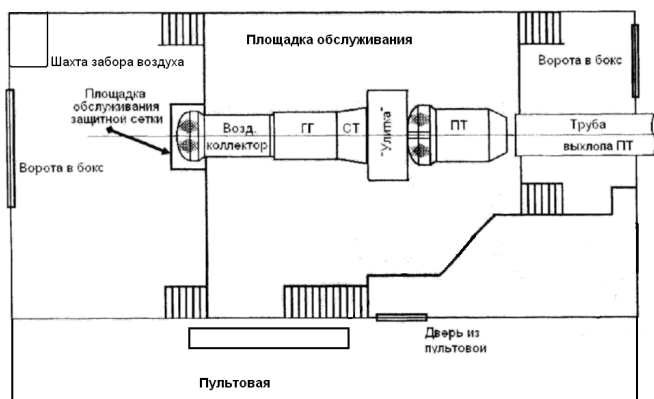
Проводится проверка заданной радиальной и окружной эпюр неравномерности поля температуры газа, для чего в выходном сечении жаровой трубы устанавливается подвижная в окружном направлении гребёнка термомпар. Регистрируются измерения ЭВМ с последующим выводом результатов на печатающее устройство. При измерении концентрации токсичных веществ CO и NO_x используется газоотборный зонд, который размещается на выходе из жаровой трубы. Транспортировка пробы продуктов сгорания от зонда до анализирующего оборудования осуществляется по герметичной магистрали за счёт скоростного напора газового потока на выходе из камеры и насоса, встроенного в газоанализатор testo 350.

Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе двигателя

Целью исследования работы камер сгорания в составе двигателя является определение рабочих характеристик ГТД.

Исследование рабочих процессов в камерах включает в себя:

- 1) отработку запуска двигателя;
- 2) отработку программы регулирования расхода газа по топливным контурам на режиме прогрева и на номинальном режиме работы двигателя с целью минимизации выбросов токсичных веществ;
- 3) определение выбросов вредных загрязняющих веществ на режимах от прогрева до максимального;
- 4) измерение пульсаций давления за компрессором и в камере сгорания при работе двигателя на режимах от прогрева до максимального.



а



б

Рис.5 Схема (а) и фото (б) стенда испытаний ГТД

Стенд состоит из воздушного коллектора, вход в который предохраняет защитная сетка с целью предотвращения попадания посторонних предметов в тракт двигателя, самого ГТД, улитки – выходное устройство, предназначенное для транспортировки отработавших газов в шахту выхлопа. В качестве загрузочного

устройства свободной турбины применяется воздушный компрессор (пневмомотор-моз) ПТ-82У-16. Он соединен с трубой выхлопа, через которую осуществляется выброс воздуха в атмосферу (рис.5).

Стенд оборудован необходимыми измерительными приборами; оснащен масляной системой, необходимой для

смазки опор и работы агрегатов; газовой системой для обеспечения запуска и подачи топливного газа к элементам топливоснабжения. Контроль и управление процессом испытания проводятся из пульта управления с выводом всех измеряемых параметров на монитор.

Отработка запуска заключается в нахождении оптимального соотношения расхода топлива по контурам камеры сгорания, при котором двигатель имеет гарантированный запуск с низким уровнем пульсаций давления в камере и высокой полнотой сгорания топлива. На режимах прогрева и максимальном также находится оптимальное соотношение топлива по контурам с целью отработки программы регулирования для минимизации выбросов токсичных веществ.

С целью обеспечения устойчивого горения на режимах работы двигателя от малого газа до максимального определяется уровень пульсаций давления в камере сгорания.

Библиографический список

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

2. Маркушин, А.Н. Исследование качества подготовки топливовоздушной смеси и его влияние на выбросы NOx в малоэмиссионной камере сгорания ГТД [Текст] / А.Н. Маркушин, А.В. Бакланов // Статья в настоящем сборнике.

3. 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.

4. Канило, П.М. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода [Текст] / П.М. Канило, А.Н. Подгорный, В.А. Христинич. – Киев: Наук. думка, 1987. – 224 с.

5. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст]: справочное пособие / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1987. – 336 с.

6. Дубовкин, Н.Ф. Справочник по теплофизическим свойствам углеводородных топлив и их продуктам сгорания [Текст] / Н.Ф. Дубовкин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.

TEST BENCHES FOR RESEARCHING THE PROCESSES AND OPERATIONAL DEVELOPMENT OF LOW EMISSION GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

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

«Kazan motor production association» plc

The paper presents a range of test benches that form the base for researching gas dynamic processes the processes of mixture and combustion in the burner of a gas turbine engine combustion chamber, as well as benches for testing full-size combustor chambers both separately and as part of the engine. This base is necessary for the production and optimization of low emission gas turbine engine combustion chambers.

Test benches, combustion chamber, toxicity, experiment, research, ecology.

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 Nikolaevih, chief designer of «Kazan motor production association» plc. E-mail: AMarkushin@kmpo.ru. Area of research: development and production 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.