

# ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

УДК 621.43.056

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ УГЛЕРОДА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Бакланов А.В.**

*Казанское моторостроительное производственное объединение,  
ул. Дементьева, 1, Казань, 420036, Россия  
e-mail: andreybaklanov@bk.ru*

Статья поступила в редакцию 05.12.2018

---

Рассматривается проблема завышенной концентрации оксида углерода в продуктах сгорания газотурбинного двигателя — ГТД НК-16СТ. Данную проблему можно отнести к возникающему недожогу топлива. Если принять, что выброс СН определяют те же факторы, что и выброс СО, то проблема снижения СН решается теми же способами.

В работе сделано предположение, что наиболее приемлемой для улучшения процесса горения является струйная подача топлива, в связи с чем выполнен расчет и определено оптимальное количество топливных отверстий в форсунке, а также их диаметры. Дальнейшая работа заключалась в исследовании двух типов форсунок: с закрученной топливной струей и струйной подачей топлива.

Проведены исследования по определению качества смешения топлива, огневые испытания горелок с двумя типами форсунок. Проведены испытания отсеков с данными форсунками, где определена полнота сгорания. Проведены испытания камер с двумя типами форсунок в составе двигателей.

По результатам проведенных работ подтверждено предположение, что организация струйной подачи топлива наиболее эффективно позволяет сжигать газообразное топливо и снижать концентрацию оксида углерода в продуктах сгорания.

*Ключевые слова:* камера сгорания ГТД, снижение выбросов вредных веществ, диффузионное горение, форсунка, горелка, смешение.

---

В газотурбинной установке камера сгорания большую часть времени работает на номинальном режиме в постоянном диапазоне изменения расходов топлива и воздуха, давления и температуры потока за компрессором в газозоудушном тракте

двигателя. Одним из наиболее важных требований при работе камеры является обеспечение высокой полноты сгорания топлива, так как от нее зависят топливная экономичность (КПД двигателя), выбросы загрязняющих веществ, таких как окси-

ды углерода CO. Поэтому задача повышения эффективности сжигания углеводородных топлив является одной из наиболее актуальных проблем в процессе совершенствования газотурбинной техники [1, 2].

В качестве объекта исследования выбрана форсунка камеры сгорания газотурбинного двигателя НК-16СТ, работающая на газообразном топливе.

Форсунка (рис. 1) включает в себя корпус 2, шнек 1 с резьбовой пробкой 3 и дросселирующую шайбу 4.

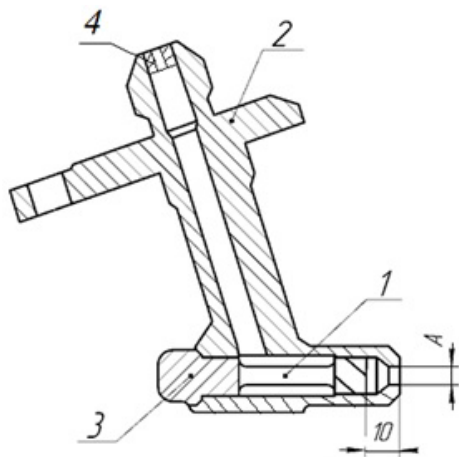


Рис. 1. Конструкция форсунки: 1 — шнек; 2 — корпус форсунки; 3 — гайка (заглушка); 4 — дросселирующая шайба

Корпус форсунки 2 выполнен с внутренним каналом для подвода газа и с дозированными отверстиями А для выхода газа. Корпус имеет фланец с отверстиями под болты для крепления форсунки к наружному корпусу камеры сгорания и канал с резьбой для установки шнека 1. Дросселирующая шайба 4 устанавливается для обеспечения необходимого расхода газа через форсунку [3].

Форсунка работает следующим образом: газ поступает из топливного коллектора по трубопроводам в форсунку, проходит по топливному каналу в корпусе форсунки, попадая на лопатки шнека 1, закручивается, выходит из дозированных отверстий А и, смешиваясь с воздухом, выходящим из завихрителя горелки, поступает в камеру сгорания [4]. Такая форсунка может быть классифицирована как центробежная газовая форсунка (ЦБГФ).

Устанавливаемый внутри корпуса форсунки шнек представляет собой завихритель с четырьмя лопатками, закрученными по винтовой линии [5] правой нарезки, ход — 32 мм, толщина лопаток — 1 мм (рис. 2).

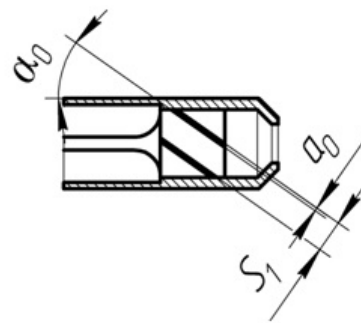


Рис. 2. Шнек (завихритель) форсунки:  $D_{нар.шн} = 10,5$  мм;  $D_{внутр.шн} = 5$  мм;  $\alpha_0 = 45^\circ$ ;  $a_0 = 4$  мм;  $S_1 = 5$  мм

Если считать, что при истечении из завихрителя на закрученные струйки не действуют внешние силы, то они растекаются по прямым, сохраняя свое первоначальное положение. При вращении этих прямых вокруг оси образуется поверхность однополостного гиперboloида вращения, уравнение которой согласно [6] имеет вид:

$$x^2 = (y^2 - d_H^2) \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (1)$$

Горловое сечение этого гиперboloида вращения совпадает с сечением сопла, а ось вращения с осью форсунки. Прямолинейные траектории струйки являются образующими. Участок гиперboloида, близлежащий к соплу топливовоздушной форсунки — ТВФ, можно рассматривать как полный конус (рис. 3), половину угла раскрытия которого можно определить из уравнения:

$$\frac{d_0}{2} = \operatorname{arctg} \sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \varphi}}. \quad (2)$$

Расположение ЦБГФ в составе камеры сгорания приводит к образованию завышенной концентрации оксидов углерода в продуктах сгорания ГТД НК-16СТ. Данную проблему можно отнести к возникающему недожогу топлива. Так как выброс СН определяют те же факторы, что и выброс CO, то проблема снижения СН решается теми же способами, что и снижение CO [7].

Обратившись к теории турбулентного горения, отметим, что на выгорание топлива влияют площадь поверхности горения и размер молей смеси. Если оценить скорости истечения закрученной струи из завихрителя в горелке и газообразного топлива из форсунки, можно заметить, что скорость истечения газа выше, чем в зоне обратных токов, в результате чего часть топлива покидает эту зону, не успевая сгореть. К тому же топливный конус, сформированный форсункой, не обес-



Рис. 3. Конус топливной струи на выходе из форсунки

печивает равномерного заполнения всего объема зоны обратных токов топливом, в результате площадь поверхности горения уменьшается, а размеры молей смеси слишком большие для быстрого сгорания. В связи с этим процесс подачи топлива из форсунки необходимо осуществить таким образом, чтобы получить как можно лучшее смешение, обеспечивающее большую площадь поверхности горения и меньший размер молей. Наиболее приемлемой для этих целей является струйная подача топлива [8].

Для наиболее равномерного смешения необходимо обеспечить оптимальное количество отверстий в форсунке и выбрать их диаметры для направления струи газа таким образом, чтобы траектория их движения проходила по касатель-

ной к кольцевой стенке камеры смешения, по которой движется закрученный завихрителем поток воздуха (рис. 4).

Основным параметром, характеризующим течение в камере смешения горелки, является скоростной напор воздуха  $q_B = \rho_B \cdot V_B^2 / 2$ , определяющий, в свою очередь, скоростной напор струй топлива  $q_T = \rho_T \cdot V_T^2 / 2$ , необходимый для их втекания в поток воздуха (рис. 5).

Известна [9] эмпирическая зависимость, характеризующая изменения оси поперечной струи газа, вытекающей в сносящий поток:

$$\frac{x}{d} = \left( \frac{q_B}{q_T} \right)^{1,3} \cdot \left( \frac{y}{d} \right)^3 + \frac{y}{d} \cdot \text{ctg}\alpha, \quad (3)$$

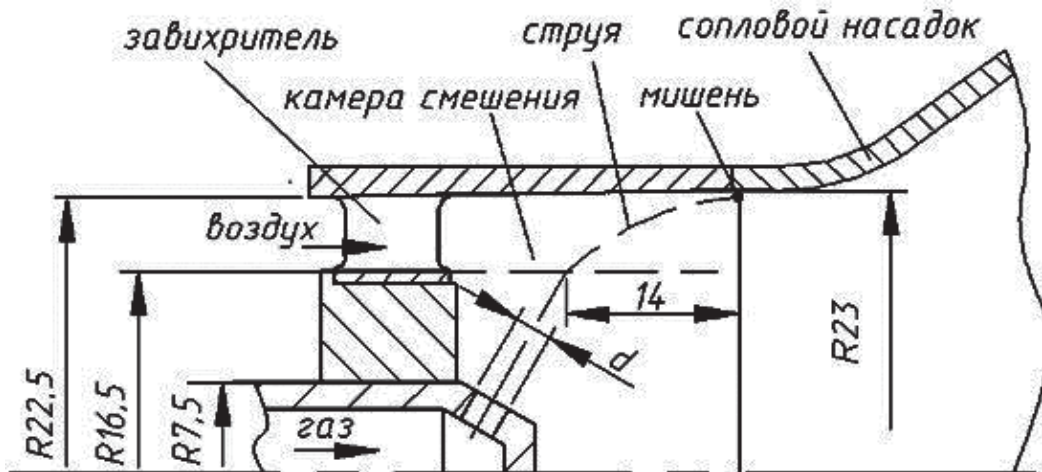


Рис. 4. Схема горелки камеры сгорания НК-16СТ

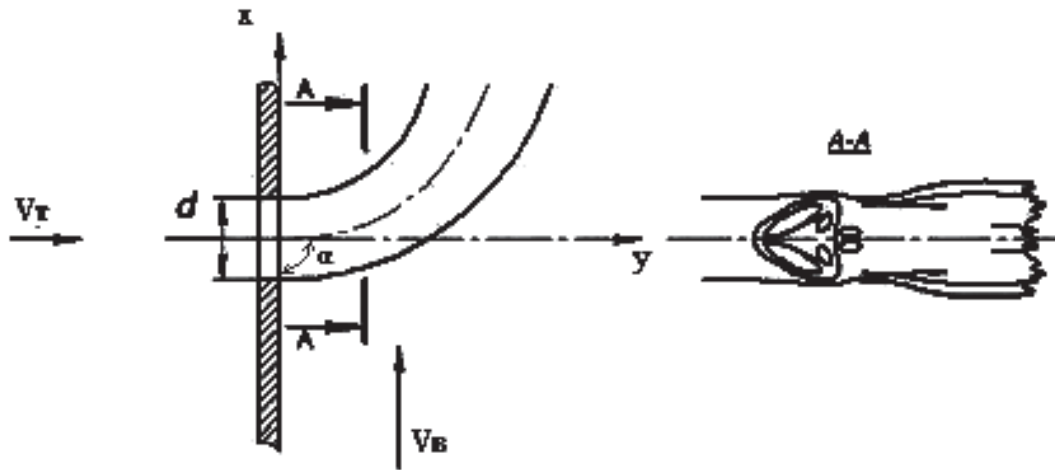


Рис. 5. Схема втекания струи газа в сносящий поток

где  $x, y$  — текущие координаты;  $d$  — диаметр отверстия;  $\alpha$  — угол между направлением струи и сносящим потоком.

В связи с тем, что большую часть времени двигатель работает на режиме 16МВт, параметры потока на входе в камеру сгорания принимаются соответствующими этому режиму.

Расчет траектории струи газа показал, что наиболее приемлем ввод газа под углом  $60^\circ$  с диаметром отверстий 3 мм и количеством 4 шт. (рис. 6). В этом случае обеспечивается целевая подача струи в камеру смешения. В качестве цели зада-

на конкретная координата попадания струи (см. рис. 4).

По результатам расчета изготовлена форсунка со струйной подачей топлива (рис. 7,б), которую можно классифицировать как струйная газовая форсунка (СГФ).

Для проверки пропускной способности [10] у ЦБГФ и СГФ (рис.7,б,в), на стенде (рис. 7,а) проведены испытания данных форсунок и определены их расходные характеристики, которые показали, что значения расходов у двух форсунок ле-

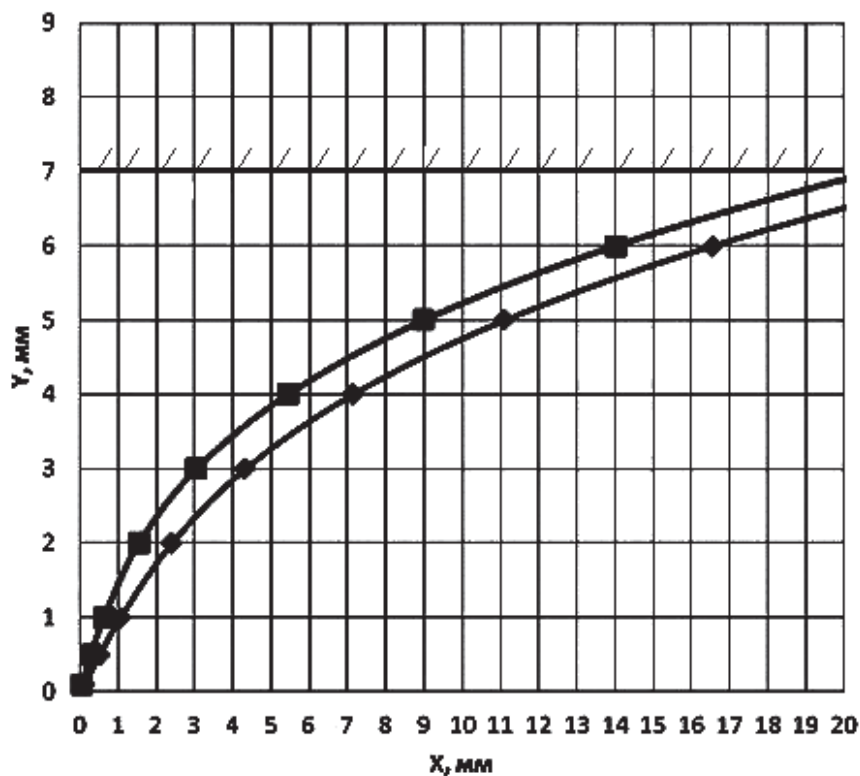


Рис. 6. Траектория газовой струи: ■ —  $\varnothing 2,9$ мм (4 отв), угол размещения отверстий к оси форсунки  $60^\circ$ ; ◆ —  $\varnothing 2,9$ мм (4 отв), угол размещения отверстий к оси форсунки  $45^\circ$

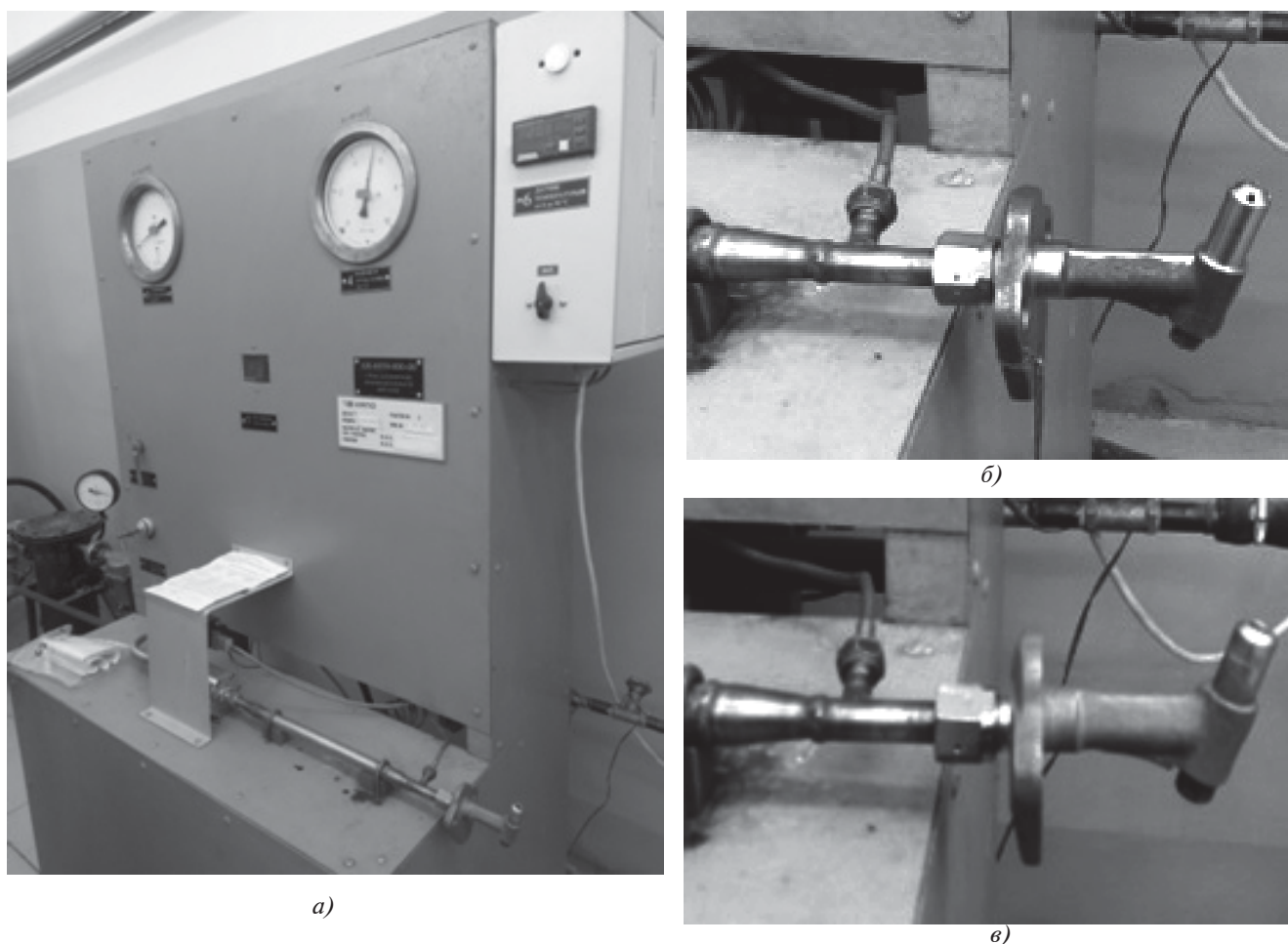


Рис. 7. Стенд по проверке расхода через каналы форсунок

жат на одном уровне и их разнорасходность не превышает 2% (рис. 8).

На следующем этапе проводились испытания по определению температуры пламени на стенде (рис. 9), работающем по следующему принципу:

воздух с помощью нагнетателя поступает на вход в расходомерный участок, представляющий собой цилиндрический канал с установленным в нем критическим соплом. Далее воздух поступает в подогреватель (электрическую печь), а затем

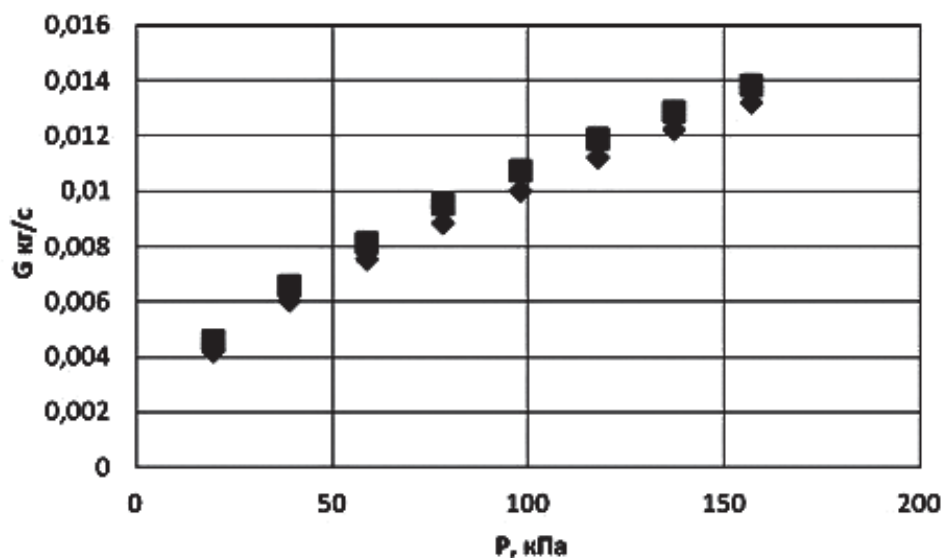


Рис. 8. Расходные характеристики форсунок: ■ — ЦБГФ; ◆ — СГФ

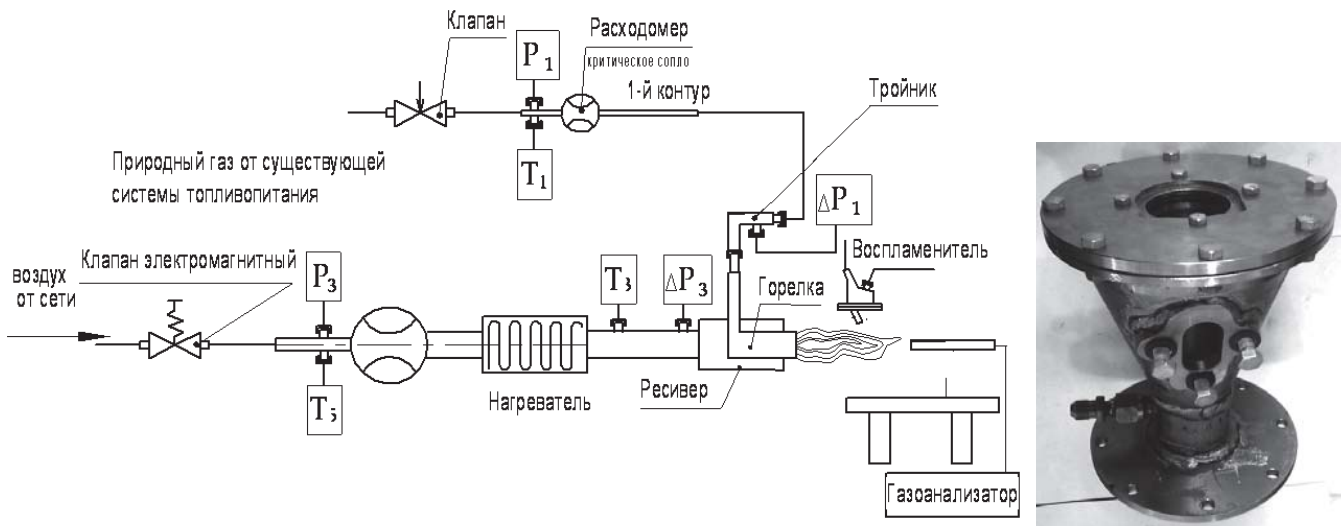


Рис. 9. Стенд газодинамических и огневых испытаний горелочных устройств

транспортируется к горелке. Топливо к форсункам подается по топливной магистрали.

Стенд оборудован необходимыми системами регулирования, измерения параметров и их регистрации.

Температура пламени измеряется высокотемпературной одноточечной гребёнкой с камерой торможения из кристаллического диоксида циркония.

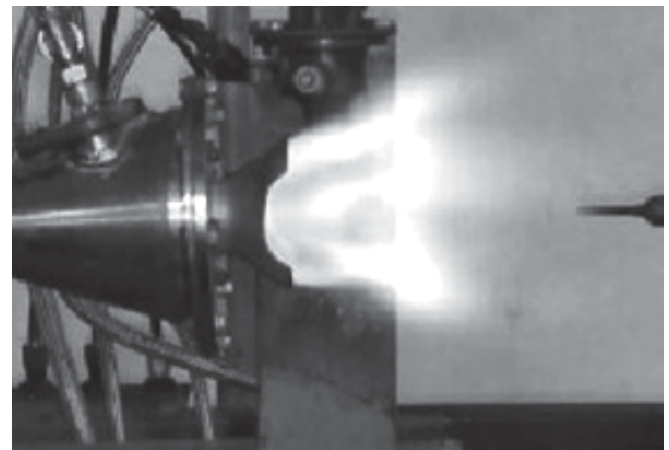
В результате проведения эксперимента выявлено, что при работе горелки, подача топлива в которой осуществляется с помощью ЦБГФ, фронт пламени стабилизируется вдоль стенок диффузора с видимым пустотелым ядром красного цвета (рис. 10,а). За основным пламенем наблюдается «хвост» красноватого цвета, по длине соответствующий длине основного пламени. Это свидетельствует о том, что топливо не успевает сгореть в основной зоне и фронт пламени вытягивается.

Визуальная оценка горения газа за горелкой с СГФ показала иную картину формы и цвета пламени (рис. 10,б). Цвет пламени бледно-голубой, что свидетельствует о хорошем перемешивании топливной воздушной смеси.

Измерение температуры пламени вдоль оси горелки показало, что распределение температур у горелок с двумя типами форсунок носит общий характер. Температура снижается при удалении от горелки с максимумом температур в диапазоне от 0 до 50 мм. При  $\alpha = 0,8$  горелка с ЦБГФ формирует вдоль оси более горячее ядро потока. При  $\alpha = 1,2$  температура пламени вдоль оси горелок с двумя видами форсунок практически одинакова. Это объясняется тем, что при более высоком коэффициенте избытка воздуха в смеси начинает нарастать содержание воздуха, его скорость и расход увеличиваются и в этой связи газодинамическая структура, формируемая завихрителем, ста-



а)



б)

Рис. 10. Факел пламени: а — горелка со струйной подачей топлива; б — горелка с подачей закрученной струи

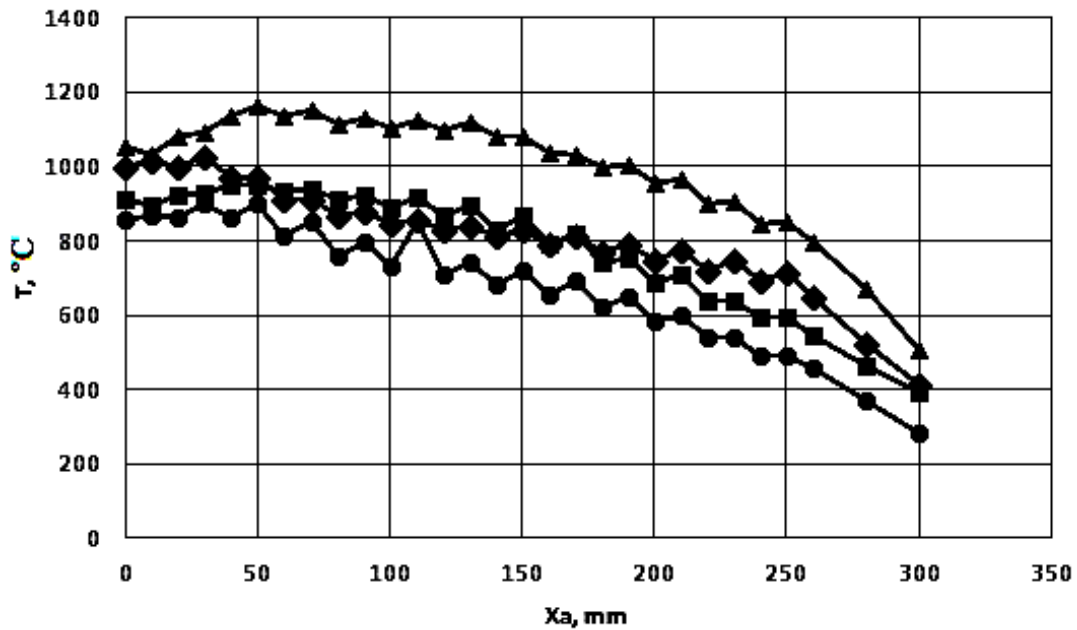


Рис. 11. Распределение температуры вдоль оси горелки: СГФ: ● —  $\alpha = 0,8$ , ◆ —  $\alpha = 1,2$ ; ЦБГФ: ▲ —  $\alpha = 0,8$ , ■ —  $\alpha = 1,2$

новится преобладающей в процессе смешения топлива с воздухом (рис. 11).

Для подтверждения версии о лучшем качестве смешения топлива с воздухом СГФ по сравнению с ЦБГФ проведены дополнительные исследования по определению качества подготовки топливоздушной смеси на выходе из горелок с данными форсунками.

Для проведения этих экспериментов используется стенд (рис. 12), который оборудован тремя системами: подвода воздуха, подвода газа и системой измерения. Размещение и подключение

горелки производится по аналогии со стендом на рис. 9. В качестве приемника 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, заменяющего метан, используется углекислый газ  $\text{CO}_2$ . Для измерения полей концентрации на выходе из горелки установлено координатное устройство с приемником газоанализатора ПКУ-4-МК-С, позволяющее перемещать

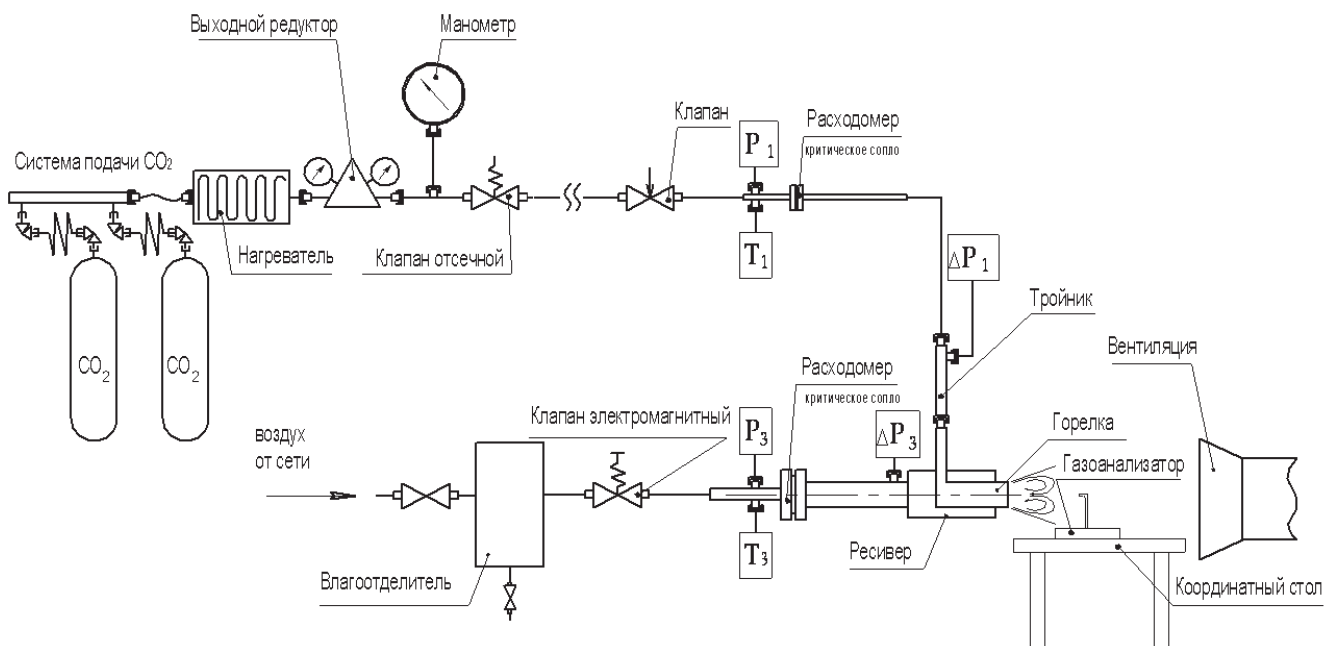


Рис. 12. Принципиальная схема стенда

приемник газоанализатора в осевом и радиальном направлении. Измерения концентрации производятся от центра горелки, за который принята ось форсунки «0», с дальнейшим перемещением пробоотборника в обе стороны вдоль сопла горелки, поперек струи через каждые 4 мм. По данному принципу измерения повторно производятся в семи сечениях: на срезе сопла и через каждые 50 мм до расстояния 300 мм [11].

Измерение концентраций  $\text{CO}_2$  в струях горелки также было направлено на определение расстояния, на котором происходит выравнивание поля концентрации, и для фиксации уровня изменения концентрации вдоль оси струи.

Для наглядного представления интенсивности процесса смешения на рис. 13 приведены ха-

рактеристики  $\text{CO}_2 = f(r)$ , более детально отражающие изменение концентрации по сечению струи на выходе из вихревых горелок.

По графикам (рис. 13) видно, что за горелкой с ЦБГФ нет существенного расширения области смешения, что связано с формированием высокой скорости истечения топливного газа, приводящей к высокой эжекционной способности струи, которая формирует узкое ядро потока, где происходит интенсивное смешение топлива с воздухом. За

пределами относительной координаты  $\bar{r} = \frac{r_i}{r_{\max}}$ ,

соответствующей значению 0,5, смешения не происходит, так как в этой области практически не содержится топлива.

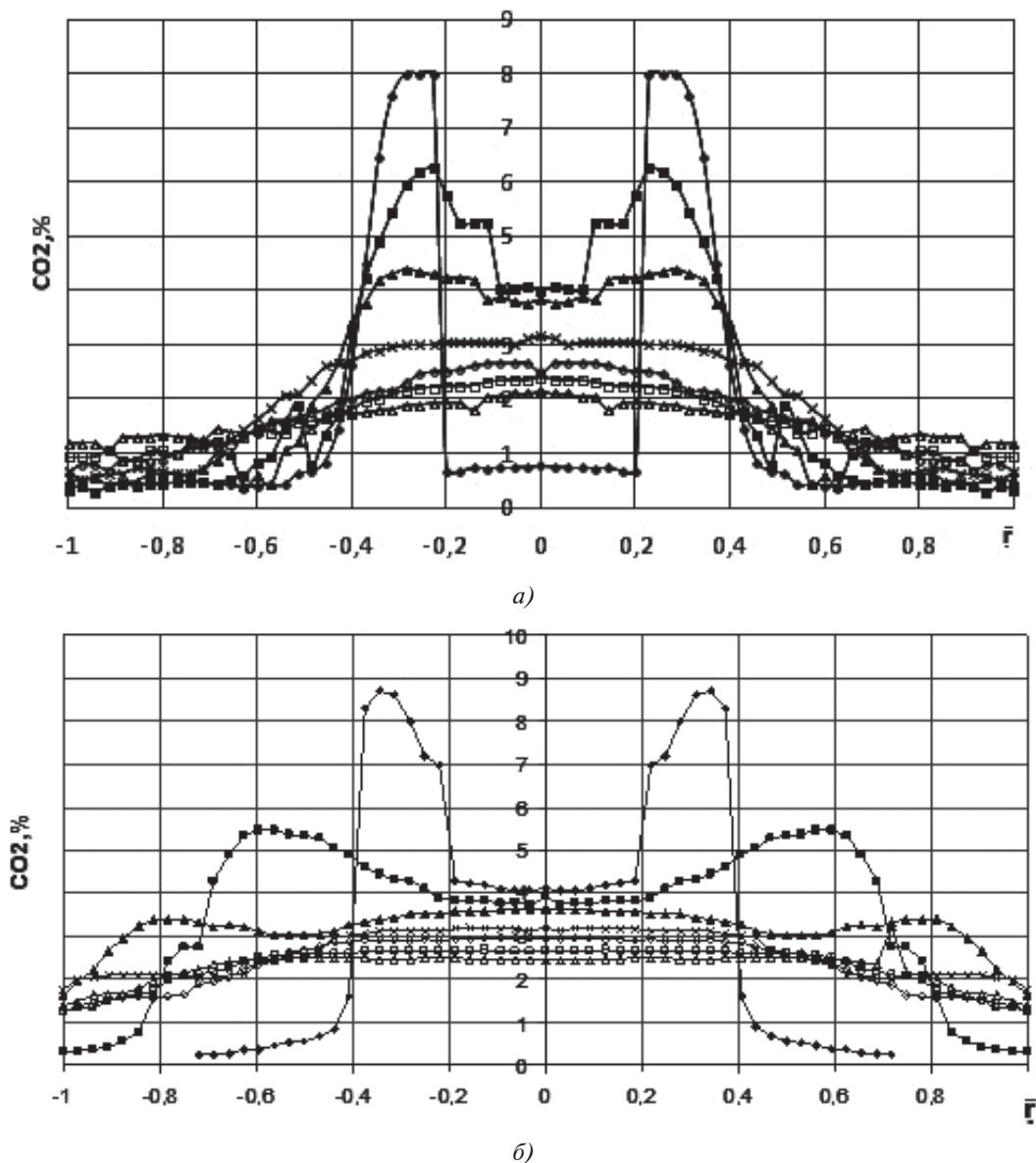


Рис. 13. Поле концентраций  $\text{CO}_2$  в различных сечениях закрученной струи:  $\blacklozenge$  — срез сопла;  $\blacksquare$  — 50 мм;  $\blacktriangle$  — 100 мм;  $\times$  — 150 мм;  $\blacklozenge$  — 200 мм;  $\square$  — 250 мм;  $\triangle$  — 300 мм; а — ЦБГФ; б — СГФ



Горелка с СГФ имеет широкое поле концентраций и низкий ее уровень, что объясняется объемной зоной рециркуляции вследствие наличия струйной подачи топлива, позволяющей обеспечить перемешивание топлива с воздухом во всем объеме закрученной струи, сформированной за горелкой.

Качество подготовки топливоздушной смеси оценивалось зависимостью, характеризующей максимальное относительное отклонение концентрации от среднеинтегрального значения поля концентраций [12]:

$$\bar{C} = \frac{C_{\max} - C_{\text{ср}}}{C_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где  $C_{\max}$  — максимальное значение в поле измеренной концентрации;

$C_{\text{ср}}$  — среднеинтегральное значение концентрации.

В соответствии с данной зависимостью показателем идеального равномерного распределения концентрации топливоздушной смеси в сечении является значение  $\bar{C} = 0$ .

Из рис. 14 видно, что наилучшее смешение во всех семи сечениях наблюдается у горелки с СГФ, что свидетельствует о качестве подготовки смеси.

Измерения полей концентрации за вихревыми горелками подтвердили, что процесс смешения достигается у горелки с СГФ за счет струйной подачи топлива в зону рециркуляции, а у горелки с ЦБГФ — вследствие высокой эжекционной

способности закрученной струи топлива внутри закрученной в противоположную сторону струи воздуха [13—16].

Дальнейшие исследования заключались в установке форсунок в отсек камеры сгорания для определения полноты сгорания, выбросов оксидов азота и оксидов углерода и температурного поля на выходе из отсека камеры сгорания. Отсек представляет собой 1/8 часть полноразмерной камеры сгорания, состоящий из наружного и внутреннего корпусов, жаровой трубы с фронтальным устройством, в которое устанавливаются форсунки. Жаровая труба ограничена с обеих сторон боковыми охлаждаемыми стенками (рис. 15).

Отсеки камеры сгорания исследуются на стенде, схема которого показана на рис. 16. Стенд оборудован необходимыми системами измерения параметров и их регистрации. В состав стенда входит газотурбинный двигатель (воздуходувка), который служит для подвода сжатого воздуха к испытываемому отсеку камеры сгорания 3. Воздух отбирается от компрессора высокого давления, затем поступает по трубопроводу в центральную магистраль 1. Расход воздуха измеряется расходомерным устройством, установленным в центральной магистрали. Стенд оснащен измерительным участком 2 с регистрацией показаний датчиков давления 4, 5. Температура воздуха измеряется термопарой группы хромель-алюмель 6. Топливо (природный газ) подается по топливной системе 7 к топливному коллектору 8 отсека камеры сгорания, а затем попадает во фронтальное устройство и форсунки [17—20]. Для измерения температуры

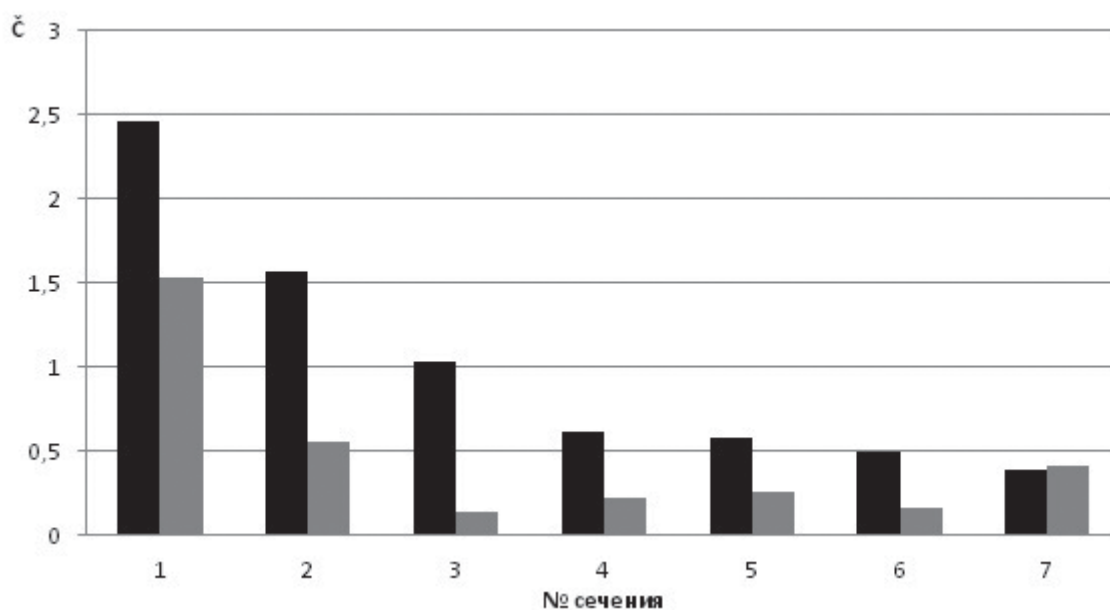
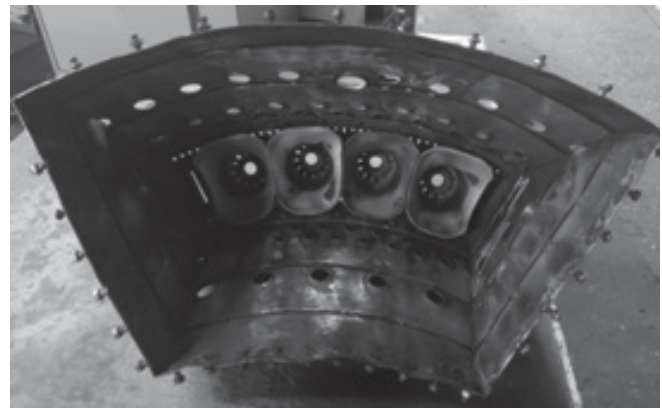


Рис. 14. Сравнение качества подготовки топливоздушной смеси в закрученной струе горелок: ■ — горелка с ЦБГФ; ■ — горелка с СГФ



а)



б)

Рис. 15. Отсек камеры сгорания, установленный на стенде (а); жаровая часть отсека (б)

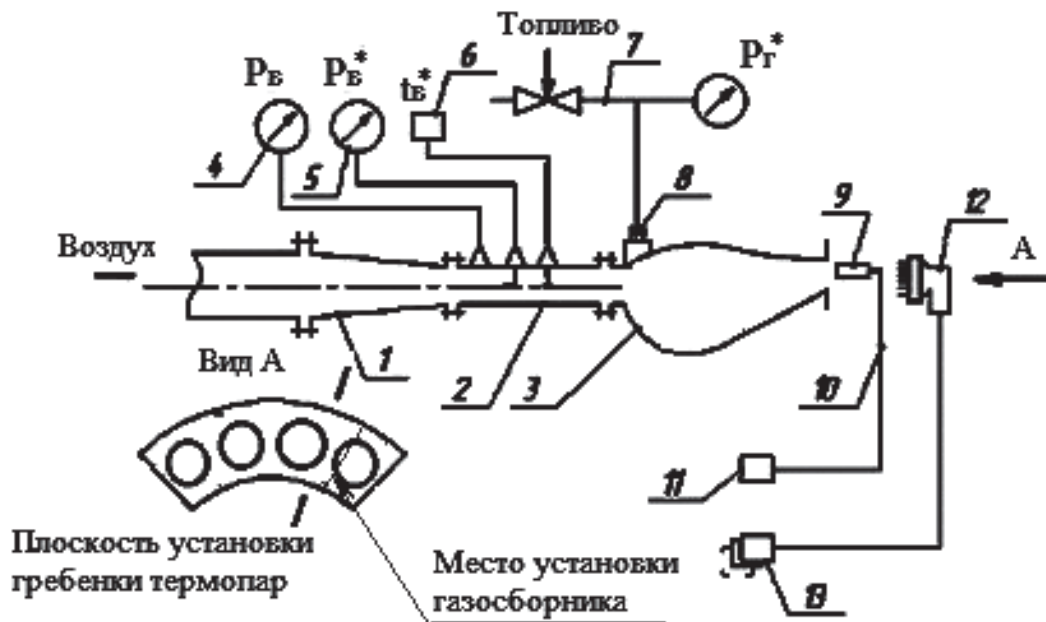


Рис. 16. Схема стенда для исследования отсеков камеры сгорания

в выходной части отсека на выходе из него устанавливается гребенка термопар 12, данные с которой передаются на регистрирующее оборудование 13. Для определения состава продуктов сгорания на выходе из отсека имеются газоотборный зонд 9 и линия транспортировки продуктов сгорания 10 к газоанализирующему оборудованию 11.

Для определения содержания  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  в продуктах сгорания используется газоанализатор testo350.

Результаты измерения содержания  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$  в продуктах сгорания занесены в таблицу.

Для определения полноты сгорания топлива, учитывающей только химический недожог метана, в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  использовалось выражение [21]:

$$\eta_{\Gamma} = 1 - (0,20175 \cdot \text{EI}_{\text{CO}} + \text{EI}_{\text{CH}_4}) \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $\text{EI}_{\text{CO}}$ ,  $\text{EI}_{\text{CH}_4}$  — 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.

Индексы эмиссии  $\text{EI}_i$  для окиси углерода, окислов азота и несгоревших углеводородов(метана) рассчитывались по уравнению:

$$\text{EI}_i = \frac{\mu_i}{\mu_{\text{B}}} (1 - \alpha_i \cdot L_0) \cdot \chi_i \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где  $L_0 = 17,1971$  — стехиометрический коэффициент сгорания метана (кг воздуха / кг топлива);

Горелка с СГФ				
Альфа	4	5	6	7
СО, ppm	158	459	690	760
NOx, ppm	32	27	22	18
CxHy, ppm	400	260	220	310
Горелка с ЦБГФ				
СО, ppm	701	829	1634	1878
NOx, ppm	28	26	21	16
CxHy, ppm	6	20	20	260

$\alpha_i$  — суммарный или местный коэффициент избытка воздуха;  $\mu_i$  — молярная масса определяемого токсичного вещества (СО, NO<sub>x</sub> и CH<sub>4</sub>);  $\mu_v$  — молярная масса воздуха;  $\chi_i$  — объемная доля токсичного вещества (ppm).

Из рис. 17 видно, что с увеличением коэффициента избытка воздуха полнота сгорания уменьшается, однако у горелки с ЦБГФ полнота сгорания ниже, чем у горелки с СГФ, что также подтверждает худшую эффективность сжигания топлива.

Результаты определения температуры на выходе из отсека показали, что горелка с ЦБГФ формирует более горячее ядро потока, и отражается в виде максимума температуры на поясе 3 (рис. 18,а). Горелка с СГФ формирует более широкое ядро потока, в связи с чем на поясах 3, 4, 5 температуры практически равны.

С целью подтверждения эффективности работы камер сгорания с СГФ в натуральных условиях, а также для сравнения с камерами, содержащими ЦБГФ, камеры по очереди устанавливались на

двигатель НК-16СТ для проведения испытания двигателя. По результатам испытаний определены дроссельные характеристики двигателя и выполнено измерение концентрации оксидов углерода в продуктах сгорания (рис. 19). Очевидно, что с увеличением мощности двигателя, уровень концентрации СО в продуктах сгорания падает, при этом в двигателе с камерой сгорания, содержащей СГФ, выбросы оксида углерода на 35% ниже, чем у двигателя с камерой, содержащей ЦБГФ, что обеспечивает уровень концентрации СО, соответствующий нормам по ГОСТ [22].

### Выводы

Организация струйной подачи топлива позволяет наиболее эффективно сжигать газообразное топливо. За счет струйной подачи топлива на 35% снижена концентрация оксида углерода в продуктах сгорания двигателя НК-16СТ.

Разработанные и внедренные мероприятия позволили обеспечить концентрацию оксида углерода, соответствующую нормам ГОСТ 28775-90.

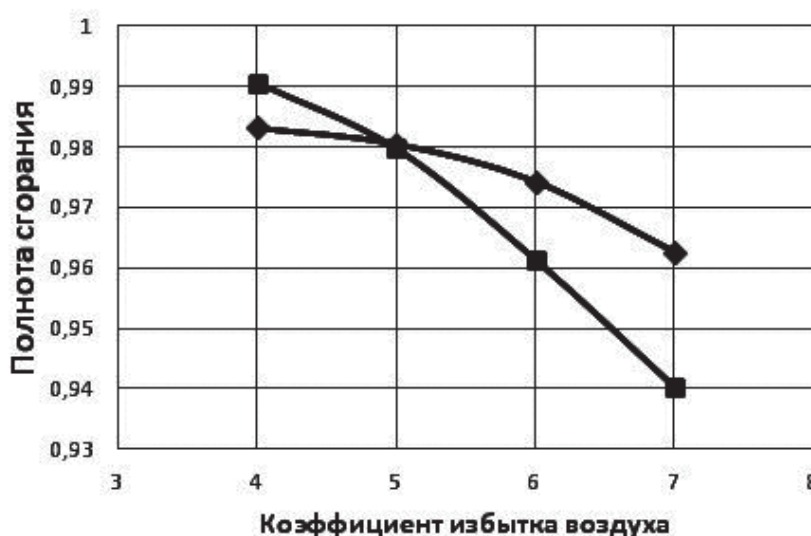


Рис. 17. Полнота сгорания топлива: ◆ — СГФ; ■ — ЦБГФ

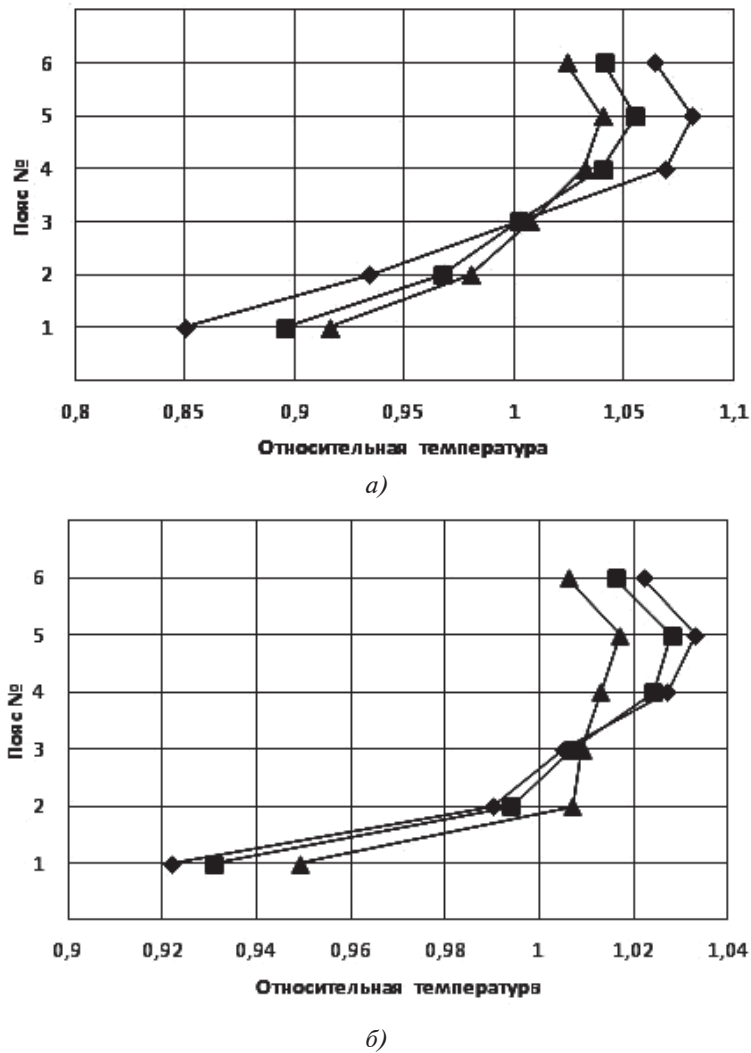


Рис. 18. Радиальная эпюра относительной температуры на выходе из отсека с форсункой: а — ЦБГФ; б — СГФ; ▲ —  $\alpha = 7$ ; ■ —  $\alpha = 6$ ; ◆ —  $\alpha = 5$

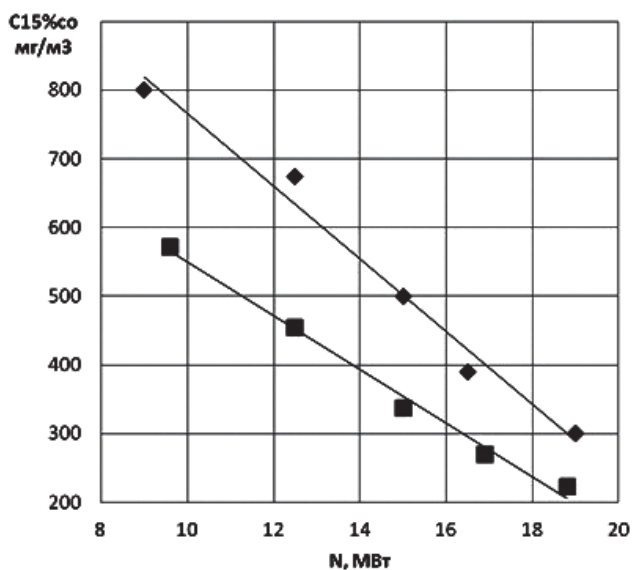


Рис. 19. Зависимость концентрации СО от мощности двигателя

Разработан комплекс мер по проверке эффективности конструктивных изменений в конструкции форсунки камеры сгорания ГТД.

#### Библиографический список

1. *Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. — Third Edition. — CRC Press, 2010. — 560 p.*
2. *Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency // Engineering for Gas Turbines and Power. 1984. Vol. 107. No. 1, 14 p. DOI: 10.1115/1.3239693*
3. *Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения: Учебное пособие. — Самара: СНЦ РАН, 2004. — 266 с.*
4. *Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М., Бакланов А.В. Организация низкоэмиссионного горения в кольцевой камере сгорания ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 3. С. 70-72.*

5. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бышин В.М., Бакланов А.В. Усовершенствование конструкции камер сгорания традиционных схем в целях улучшения экологических показателей ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 41-44.
6. Горбунов М.Г. Выбор параметров и расчет основных камер сгорания ГТД. — М.: Изд-во МАИ, 1972. — 231 с.
7. Бакланов А.В. Управление процессом сжигания топлива путем изменения конструкции горелки в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 73-85.
8. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. — 220 с.
9. Иванов Ю.В. Экспериментальное исследование струй, развивающихся в потоке // Теория и расчет вентиляционных струй: Сб. трудов. — Л.: Ленингр. правл. науч.-техн. о-ва строит. индустрии СССР. Секция теплоснабжения, отопления и вентиляции. ВЦСПС. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т охраны труда в г. Ленинграде, 1965. С. 249-257.
10. Бакланов А.В. Малоэмиссионная камера сгорания диффузионного типа с микропламенным горением для конвертированного авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 57-68.
11. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2013. № 3-1(41). С. 131-138. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-1(41)-131-138
12. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В. и др. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. — Самара: СНЦ РАН, 2002. — 527 с.
13. Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J. Numerical and experimental investigations of confinedswirling combustions flows // Progress in Computational Fluid Dynamics. 2003. Vol. 3. № 2-4, pp. 78-88. DOI: 10.1504/PCFD.2003.003778
14. Zheng H., Zhang Z., Li Y., Li Z. Feature-Parameter-Criterion for Predicting Lean Blowout Limit of Gas Turbine Combustor and Bluff Body Burner // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Vol. 2013, 17 p. DOI: 10.1155/2013/939234
15. Roy G.D., Frolov S.M., Netzer D.W., Borisov A.A. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control // International Colloquium on Control and Detonation Processes Held (Moscow, July 4-7 2000). — Moscow, ELEX-KM Publishers, 2001. — 384 p.
16. Kieseewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner With Cylindrical Mixing Zone // Engineering for Gas Turbines and Power. 2007. Vol. 129. No. 4, pp. 929-936. DOI:10.1115/1.2747259
17. Lieuwen T.C., Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling. — AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast), 2005. — 657 p.
18. Acharya V.S., Lieuwen T.C. Role of Azimuthal Flow Fluctuations on Flow Dynamics and Global Flame Response of Axisymmetric Swirling Flames // 52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum (13-17 January 2014, National Harbor, Maryland), 15 p. DOI: 10.2514/6.2014-0654
19. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor // ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition (Houston, Texas, USA, June 5-8 1995). Vol. 3, 10 p. DOI:10.1115/95-GT-111
20. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S., Joklik R.G., Kochar Y.N., Vaden S.N., Lieuwen T.C., Seitzman J.M. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation // Combustion and Flame. 2014. Vol. 161. No. 8, pp. 2038-2053. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.01.024
21. Канило П.М., Подгорный А.Н., Христич В.А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. — Киев: Наукова думка, 1987. — 224 с.
22. ГОСТ 28775-90. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2005. — 12 с.

## THE IMPACT OF THE OF FUEL SUPPLYING METHOD TO THE COMBUSTION CHAMBER ON CARBON OXIDES FORMATION IN COMBUSTION PRODUCTS OF THE GAS TURBINE ENGINE

**Baklanov A.V.**

*Kazan Motor Production Association,  
1, Dementyeva str., Kazan, 420036, Russia  
e-mail: andreybaklanov@bk.ru*

### Abstract

The fuel burning in the combustion chamber of a gas turbine engine (GTE) is attended by toxic substances formation. Carbon oxides, having deleterious effect on human and environment, are of particular danger. In this regard, the article solves the actual problem of determining the optimal method of gaseous fuel supplying to the GTE combustion chamber to ensure low emission of carbon oxide.

The article considers the burner with two types of injectors, differing by the gas spray method. The first injector is a centrifugal gas injector (CGI), and the second one is a jet injector (JI).

A technique of target feeding of a jet, formed by the injector in the burner unit was developed.

The fire tests of nozzles were performed. While the tests performing, it was revealed that during the burner operation with the fuel feeding by the CGI, the flame front was being stabilized along the walls of the burner nozzle extension with visible hollow red colored core. Behind the main flame, the reddish "tail" which length corresponded to the length of the main flame was observed. This indicates that the fuel has no time to burn out in the primary zone, and flame front is stretching out.

In this regard, the quality determination of air-fuel mixture preparation in the swirled jet at the outlet of burners with two types of nozzles was performed. It was established, that the nozzle with the jet-like fuel atomization ensured the best mixing quality. The engine throttle characteristics were determined, and carbon oxides concentration in the combustion products measuring was performed by the results of the experiments. The results demonstrated that with the power increase the carbon oxide concentration level in the combustion products decreases. The 25% from the initial variant decrease in concentration was observed herewith for the combustion chamber with JI, which corresponds to the 28775-90 State Standard

**Keywords:** combustion chamber of gas-turbine engine, emission reduction, diffusion combustion, nozzle, burner, mixing.

### References

1. Lefebvre A.H., Ballal D. R. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. Third Edition. CRC Press, 2010, 560 p.
2. Lefebvre A.H. Fuel effects on gas turbine combustion-ignition, stability, and combustion efficiency. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 1984, vol. 107, no. 1, 14 p. DOI: 10.1115/1.3239693
3. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Yu.I. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniya* (Aviation gas turbine engines conversion to the land-based gas turbines), Samara, SNTs RAN, 2004, 266 p.
4. Markushin A.N., Merkushin V.K., Byshin V.M., Baklanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2009, no. 3, pp. 70-72.
5. Markushin A.N., Merkushin V.K., Byshin V.M., Baklanov A.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2010, no. 1, pp. 41-44.
6. Gorbunov M.G. *Vybor parametrov i raschet osnovnykh kamer sgoraniya GTD* (Parameters selection and calculation of the GTE main combustion chambers), Moscow, MAI, 1972, 231 p.
7. Baklanov A.V. Controlling fuel combustion process by burner design change in gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 73-85.
8. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnyykh dvigatelei* (The combustion chamber of gas turbine engines), Kazan, Kazanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004, 220 p.
9. Ivanov Yu.V. *Teoriya i raschet ventilyatsionnykh strui. Sbornik trudov*. Leningrad, VTsSPS, 1965, pp. 249-257.
10. Baklanov A.V. Low-emission combustion chamber of diffusion type employing micro flame burning process for converted aircraft gas turbine engine. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 57-68.
11. Markushin A.N., Baklanov A.V. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2013, no. 3-1(41), pp. 131-138. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-3-1(41)-131-138
12. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V. *Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnyykh dvigatelei* (Some issues of the aircraft gas turbine engines design), Samara, SNTs RAN, 2002, 527 p.

13. Sadiki A., Repp S., Schneider C., Dreizler A., Janicka J. Numerical and experimental investigations of confinedswirling combustions flows. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2003, vol. 3, no. 2-4, pp. 78-88. DOI: 10.1504/PCFD.2003.003778
14. Zheng H., Zhang Z., Li Y., Li Z. Feature-Parameter-Criterion for Predicting Lean Blowout Limit of Gas Turbine Combustor and Bluff Body Burner. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, 17 p. DOI: 10.1155/2013/939234
15. Roy G.D., Frolov S.M., Netzer D.W., Borisov A.A. High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control. *International Colloquium on Control and Detonation Processes Held (Moscow, 4-7 July 2000)*. Moscow, ELEX-KM Publishers, 2001, 384 p.
16. Kiesewetter F., Konle M., Sattelmayer T. Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner With Cylindrical Mixing Zone. *Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007, vol. 129, no. 4, pp. 929-936. DOI:10.1115/1.2747259
17. Lieuwen T.C., Yang V. *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling*. AIAA (American Institute of Aeronautics & Ast), 2005, 657 p.
18. Acharya V.S., Lieuwen T.C. Role of Azimuthal Flow Fluctuations on Flow Dynamics and Global Flame Response of Axisymmetric Swirling Flames. *52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum (13-17 January 2014, National Harbor, Maryland)*, 15 p. DOI: 10.2514/6.2014-0654
19. Durbin M.D., Vangsness M.D., Ballal D.R., Katta V.R. Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor. *ASME 1995 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition (Houston, Texas, USA, 5-8 June 1995)*, vol. 3, 10 p. DOI:10.1115/95-GT-111
20. Gokulakrishnan P., Fuller C.C., Klassen M.S., Joklik R.G., Kochar Y.N., Vaden S.N., Lieuwen T.C., Seitzman J.M. Experiments and modeling of propane combustion with vitiation. *Combustion and Flame*, 2014, vol. 161, no. 8, pp. 2038-2053. DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.01.024
21. Kanilo P.M., Podgornyi A.N., Khristich V.A. *Energeticheskie i ekologicheskie kharakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodorodnykh topliv i vodoroda* (Energy and environmental characteristics of the gas turbine engines when employing hydrocarbon fuels and hydrogen), Kiev, Naukova dumka, 1987, 224 p.
22. *Agregaty gazoperekachivayushchie s gazoturbinnym privodom. Obshchie tekhnicheskie usloviya. GOST 28775-90* (Gas pumping units with gas turbine drive. General specifications. State Standard 28775-90), Moscow, Standartinform, 2005, 12 p.