

УДК 621.43.056

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В СЕРИЙНОЙ И МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ МНОГОФОРСУНОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГТД

© 2016. А.Н. Маркушин¹, А.В. Бакланов¹, Г.Ф. Салимзянова²

¹ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Статья поступила в редакцию 02.02.2016

В статье представлены результаты исследований по определению гидравлических потерь в серийной и модернизированной камере сгорания ГТД. Описана их конструкция и конструкция испытательного стенда, а также методика проведения эксперимента. Произведен расчет влияния потерь в камере сгорания на КПД двигателя.

Ключевые слова: камера сгорания, конструкция, эксперимент, гидравлические потери

В процессе модернизации камер сгорания ГТД в их конструкцию вводятся различного рода изменения, которые в той или иной степени влияют на изменение уровня гидравлических потерь. Очень важно, чтобы гидравлические потери в модернизированной камере были близки по значениям к серийной, поскольку экономичность ГТД, в определенной степени, зависит от сопротивления камеры, что может повлиять на потерю КПД двигателя.

В качестве объекта исследования выбрана многофорсуночная камера сгорания двигателя НК-16-18СТ. Схема данной камеры сгорания показана на рис. 1.

Камера состоит из корпуса 6, жаровой трубы 3 и газового коллектора 1 для подачи газа к форсункам 2. Жаровая труба — кольцевая, многосекционная. Между кольцами при соединении установлены дистанционные пластинки 5 или гофрированные ленты 4 для создания пленочного воздушного охлаждения. Жаровая труба с передней стороны подвешивается с помощью фиксаторов 7. К задней части наружного и внутреннего кожухов приварены кольца 8, которыми они опираются на соответствующие кольцевые поверхности соплового аппарата турбины. Принципиальной особенностью камеры сгорания этой схемы является многофорсуночное фронтное устройство (рис. 2). Оно состоит из корпуса, в котором расположены полости топливных коллекторов 8, соединенные радиальными каналами 10 с топливными форсунками. 136 топливных форсунок установлены в корпусе головки в два ряда в шахматном

порядке. Форсунки располагаются в отверстиях корпуса головки, вокруг каждой форсунки в корпусе головки выполнены фигурные окна 11 для подвода воздуха к завихрителям. Топливо из струйных форсунок подается во внутреннюю полость конуса форсунки [1].

На наружном и внутреннем кожухах установлены смесительные патрубки 12, которые способствуют эффективному перемешиванию вторичного потока воздуха и газа для обеспечения допустимой температуры газов перед турбиной двигателя. Наружный и внутренний корпус является сварными узлами, выполненным из жаропрочного сплава.

С целью улучшения характеристик серийной камеры сгорания (рис. 1) в конструкцию жаровой трубы были введены ряд изменений (рис. 2).

Основным конструктивным отличием модернизированной камеры сгорания от серийной, является наличие втулок вместо имеющихся отверстий для подачи воздуха в зону горения, что связано с увеличением пробивной способности струй втекающих в зону горения и как следствие к интенсификации процессов смешения в данной зоне. Так же произведена замена «патрубок смесителей» в наружном и внутреннем кожухах жаровой трубы на втулки подачи воздуха в зону смешения. Они установлены в два ряда в шахматном порядке (рис. 2).

Испытания камеры сгорания по определению гидравлических потерь, производились на установке (рис. 3). Рабочим телом установки является воздух, отбираемый от компрессора двигателя НК-16СТ. Магистраль подачи воздуха оборудована стандартным расходомерным устройством с соплом Вентури для измерения расхода.

Кольцевой канал конечного участка установки препарирован под измерение полного давления (P^*) с помощью трех пятиточечных гребенок, статического давления (P_2) в четырех точках и температуры (T^*) с помощью шести термопар.

Бакланов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, начальник бюро камер сгорания.

E-mail: andreybaklanov@bk.ru

Маркушин Андрей Николаевич, главный специалист по ГТД.

E-mail: amarkushin@oao.kmpo.ru

Салимзянова Гузель Фаритовна, аспирант.

E-mail: g.salimzyanova@yandex.ru

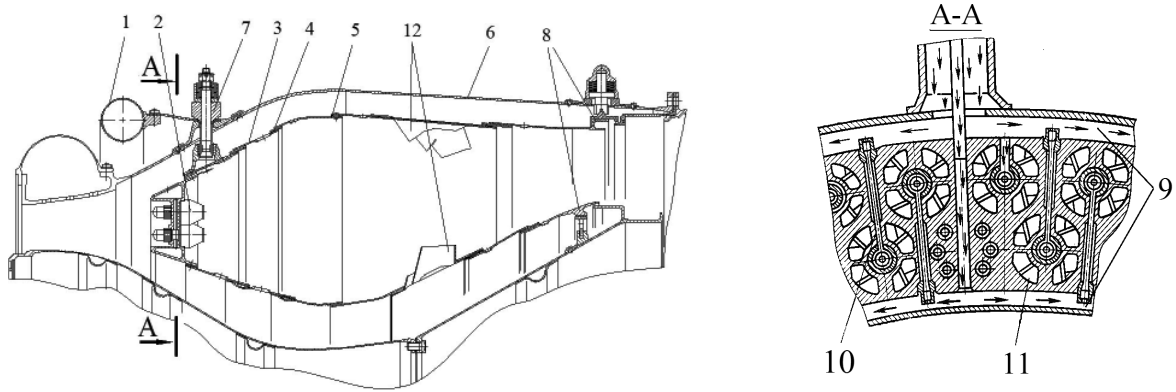


Рис. 1. Камера сгорания НК-16-18СТ

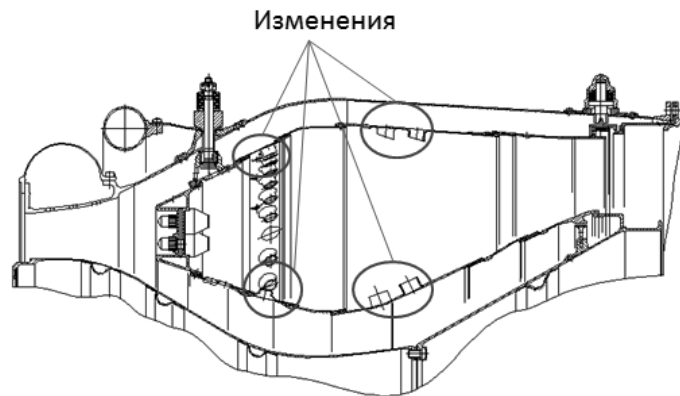


Рис. 2. Модернизированная камера сгорания НК-16-18СТ

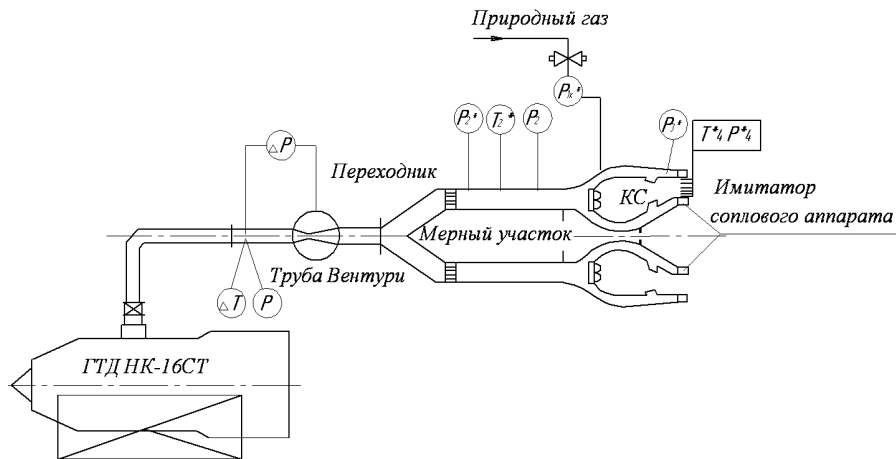


Рис. 3. Схема стенда для испытаний полноразмерных камер сгорания

На выходе из камеры сгорания устанавливалась восьми точечная гребенка полного давления (P^*_4). Дополнительно для оценки перепада давлений на стенке жаровой трубы измерялись полные давления в полости между кожухами и корпусами камеры сгорания; а именно в трех точках по окружности наружной полости ($P^*_{Ж.Т.нар}$) и в трех точках по окружности внутренней полости ($P^*_{Ж.Т.внут}$) [2].

Динамическое подобие течений в камере сгорания на установке и на двигателе обеспечивается при равенстве значений приведенной скорости $\lambda_{вх.КС}$ на входе в камеру сгорания. Зна-

чение $\lambda_{вх.КС}$ на максимальном режиме работы ГТД составляет 0,28.

На входе в камеру сгорания определялись и рассчитывались следующие параметры потока.

Расход воздуха определяется при помощи зависимости:

$$G_{в} = \frac{0,01252}{3600} \cdot \alpha_{\epsilon} \cdot \epsilon_{\epsilon} \cdot m \cdot D^2 \cdot \sqrt{\rho_{\epsilon} \cdot \Delta p_{\epsilon} \cdot 10^4}, \quad (1)$$

где $m = (d/D)^2$ – относительная площадь раскрытия сужающегося устройства

Δp_{ϵ} – перепад давления воздуха в сужающем устройстве, ρ_{ϵ} – плотность воздуха в сужающем

устройстве, α_6 - коэффициент расхода сужающего устройства, ε_6 - поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

Избыточное давление:

$$P_{\text{вх.КС изб.}}^* = P_{\text{вх.КС}}^* - P_{\text{н}}^* ; \quad (2)$$

Функция приведенной плотности потока массы:

$$q(\lambda_{\text{вх.КС}}) = \frac{G_B \cdot \sqrt{T_2^*}}{0,3965 \cdot P_{\text{вх.КС}}^* \cdot F_{\text{вх.КС}}} ; \quad (3)$$

$F_{\text{вх.КС}}^*$ - площадь на входе в камеру сгорания

Приведенная скорость воздуха на входе в камеру сгорания $\lambda_{\text{вх.КС}}$.

$$\lambda_{\text{к}} = 0,1897 \cdot q(\lambda_{\text{к}})^4 - 0,0526 \cdot q(\lambda_{\text{к}})^3 + 0,0493 \cdot q(\lambda_{\text{к}})^2 + 0,6285 \cdot q(\lambda_{\text{к}}) + 0,0001. \quad (4)$$

Потери полного давления в камере сгорания и в жаровой трубе (относительно давления на входе в камеру сгорания) [1] составляют:

$$\Delta P_{\text{КС}}^* = \frac{P_{\text{вх.КС}}^* - P_4^*}{P_{\text{вх.КС}}^*} \cdot 100\% ; \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{ЖТ}}^* = \frac{P_{\text{ЖТ}}^* - P_4^*}{P_{\text{вх.КС}}^*} \cdot 100\% ; \quad (6)$$

На рис. 4 построены графики зависимостей $\Delta P_{\text{КС}}^* = f(\lambda_{\text{вх.КС}})$ и $\Delta P_{\text{ЖТ}}^* = f(\lambda_{\text{вх.КС}})$, характе-

ризующие изменение гидравлических потерь в камере сгорания и в жаровой трубе $\Delta P_{\text{КС}}^*$, $\Delta P_{\text{ЖТ}}^*$ в зависимости от приведенной скорости. Графики показывают, что значения перепада на стенках и потерь в камере сгорания для серийной камеры меньше, чем аналогичные параметры для модернизированной камеры сгорания.

Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания

$$\sigma_{\text{КС}} = P_4^* / P_{\text{вх.КС}}^* . \quad (7)$$

На графиках (рис. 5) видно, что коэффициент восстановления полного давления $\sigma_{\text{КС}}$ в модернизированной камере сгорания ниже, чем в серийной камере.

Значение пропускной способности камеры сгорания по воздуху $B = f(\pi)$ [3]:

$$B = \frac{G_B \sqrt{T_B^*}}{P_B^*} , \quad (8)$$

где G_B , T_B^* , P_B^* - соответственно весовой расход воздуха, его температура, полное давление на входе в камеру сгорания.

Из графика (рис. 6) видно, что пропускная способность серийной и модернизированной камер сгорания близки по своим значениям и имеет идентичный характер изменения с увеличением режима по приведенной скорости, что свидетельствует

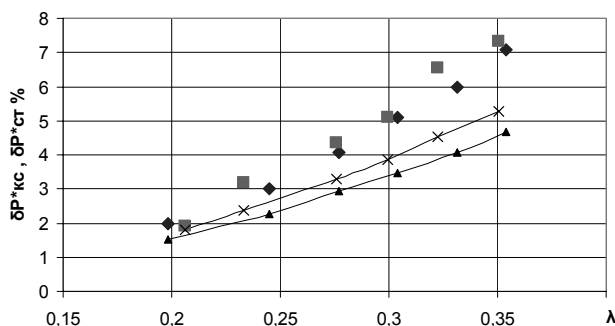


Рис. 4. Потери полного давления в камере сгорания в зависимости от приведенной скорости:

$\Delta P_{\text{КС}}^*$ ♦ - серийная камера сгорания; ■ - модернизированная;
 $\Delta P_{\text{ЖТ}}^*$ ▲ - серийная камера сгорания; × - модернизированная

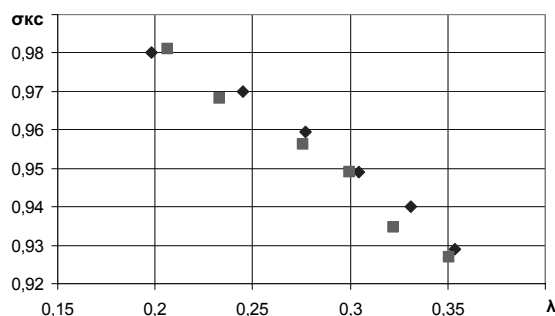


Рис. 5. Коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания в зависимости от приведенной скорости:

♦ - серийная камера сгорания; ■ - модернизированная

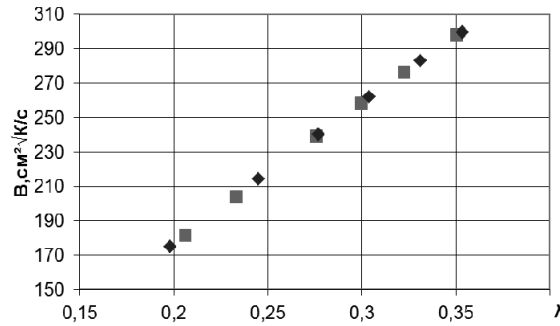


Рис. 6. Пропускная способность камер сгорания в зависимости от приведенной скорости:
◆-серийная камера сгорания; ■- модернизированная

о том, что в составе двигателя будет обеспечено продвижение необходимого количества воздуха.

Анализ возможных причин изменения гидравлических параметров в модернизированной камере по сравнению с серийной показал следующее. Площадь проходного сечения 70 наружных и 70 внутренних патрубков смесителя составляет $F_{карм} = 226,7 \text{ см}^2$ и $275,8 \text{ см}^2$ соответственно ($F_{карм.Σ} = 502,4 \text{ см}^2$), что больше площади $140 (d_{вт} = 20 \text{ мм}) F_{вт} = 439,8 \text{ см}^2$ втулок которые имеются в модернизированной камере.

Суммарная площадь отверстий в жаровой трубе камеры сгорания двигателя НК-16-18СТ с учетом фронтного устройства составляет $F_{ж.т.сер} = 1629 \text{ см}^2$. Площадь $F_{ж.т.мод}$ модернизированной камеры составляет $F_{ж.т.мод} = F_{ж.т.сер} - F_{карм.Σ} - F_{вт} = 1566 \text{ см}^2$.

Уменьшение суммарной площади отверстий в жаровой трубе составило

$$\Delta F_{ж.т.} = F_{ж.т.сер} - F_{ж.т.мод} = 1629 \text{ см}^2 - 1566 \text{ см}^2 = 63 \text{ см}^2 \text{ (3,87 \%)}.$$

Воспользовавшись зависимостью для определения коэффициента гидравлических потерь в жаровой трубе (без учета тепловых потерь) можно оценить влияние уменьшения степени раскрытия камеры сгорания на изменение гидравлического сопротивления [4]:

$$\xi_{:ж} = \xi_0 \left(\frac{F_K}{\sum \mu F_0} \right)^2. \quad (9)$$

В результате можно заметить, что уменьшение площади отверстий в жаровой трубе будет приводить к увеличению потерь и составляет для серийной камеры $\xi_{:ж} = 0,89$, а для модернизированной $\xi_{:ж} = 0,964$.

Увеличению гидравлического сопротивления модернизированной камеры сгорания способствует также то, что в отличие от патрубков смесителя спрофилированных по потоку, втулки выполнены под углом более 90° к осевому направлению потока, что приводит к потерям давления на поворот.

Параметры, характеризующие гидравлическое сопротивление камеры сгорания изменя-

ются следующим образом

$$\delta P_{КС}^* = 4,5 \% \text{ вместо } 4,3 \% ;$$

$$\delta P_{ж.т.}^* = 3,3 \% \text{ вместо } 2,95 \% ;$$

$$\sigma_{КС} = 0,954 \text{ вместо } 0,957.$$

Оценка изменения эффективного КПД двигателя при уменьшении коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания на $0,31\%$ определен при помощи зависимости:

$$\delta \sigma_{КС} = \frac{\sigma_{КС \text{ модерн}} - \sigma_{КС \text{ серийн}}}{\sigma_{КС \text{ серийн}}} \cdot 100\%.$$

При постоянном значении мощности (18 МВт) изменение эффективного КПД двигателя составит:

- относительное значение КПД

$$\delta \eta_{эф}^* = \frac{\delta \eta_{ов} \cdot \delta \sigma_{КС}}{\delta \sigma_{КС \text{ дв}}}.$$

При $\delta \eta_{ов} = 0,45\%$; $\delta \sigma_{КС \text{ дв}} = 1\%$ значение составит $-0,1285\%$.

- абсолютное значение КПД

$$\Delta \eta_{эф}^* = \frac{\delta \eta_{эф}^* \cdot \eta_{эф}^*}{100\%},$$

где $\eta_{эф}^*$ – эффективный КПД двигателя равный 31; при этом значение $\Delta \eta_{эф}^*$ составит $-0,0398\%$

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ оценочного расчета влияния изменения гидравлических потерь в камере сгорания на КПД двигателя.

2. Определено, что замена патрубков смесителя на втулки меньшей площади привела к увеличению гидравлического сопротивления модернизированной камеры сгорания, что в свою очередь приводит к незначительному ухудшению КПД двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. О возможности организации «богато-бедного» горения в серийной камере сгорания наземной газотурбинной установки

- // Энергетика Татарстана. №1(21). 2011. С 42-44.
2. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД// Вестник СГАУ им. С.П. Королева. 2013. №3(41). Часть 1. С 131-138.
3. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. Самара: СНЦ РАН, 2002. 286 с.
4. Идельчик Е.И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1976. 559 с.

**THE PRESSURE LOSS OF THE SERIAL PRODUCED
AND MODERNIZED GAS TURBINE COMBUSTOR WITH MANY BURNERS**

© 2016. A.N. Markushin¹, A.V. Baklanov¹, G.F. Salimzyanova²

¹JSC «Kazan motor production association»

²Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev

The article presents the research results of the pressure loss of the serial produced and modernized gas turbine combustor. Their design and test facility design and also experiment methods are described. The calculations of the effect of the pressure loss on the engine performance are made.

Keywords: combustion chamber, design, experimental research, hydraulic loss.

Andrey Markushin, Main Expert of GTE.

E-mail: amarkushin@oao.kmpo.ru

Andrey Baklanov, Candidate of Technical Sciences, Chief of the Design Office of Combustion Chambers.

E-mail: andreybaklanov@bk.ru

Guzel Salimzyanova, Postgraduate Student.

E-mail: g.salimzyanova@yandex.ru