

УДК 621.43.056

ВЛИЯНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ

© 2016 А.Н. Маркушин¹, А.В. Бакланов¹, Г.Ф. Салимзянова²¹ ОАО «Казанское моторостроительное производственное объединение»² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Статья поступила в редакцию 02.02.2016

Описан принцип конвертирования камеры сгорания авиационного ГТД в наземные условия и работу на природном газе. Представлена особенность конструкции фронтального устройства и этапы его доводки для обеспечения минимального расхождения расхода топлива по форсункам. Описана установка и методика проведения эксперимента. Выявлена зависимость влияния разброса топлива по форсункам на максимальную неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, конструкция, эксперимент, фронтальное устройство, форсунка, стенд.

Камера сгорания авиационного ГТД при конвертировании практически полностью переделывается, т.к. в наземных газотурбинных установках, в качестве топлива, вместо авиационного керосина используется природный газ или попутный нефтяной газ. Выбор топлива определяется назначением газотурбинных установок. Для газоперекачивающих агрегатов топливом является природный газ. В этой связи фронтальное устройство и горелки камеры сгорания должны быть адаптированы под газообразный вид топлива.

В данной работе в качестве объекта исследования выбрана камера сгорания двигателя НК-8-2У адаптированная для работы в составе ГТУ НК-16СТ.

Важным критерием для обеспечения стабильного процесса сжигания метана в камере сгорания ГТД является равномерное распределение топлива по форсункам фронтального устройства. Это обеспечивает однородный состав смеси на выходе из форсунок и оптимально сформированную неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания ГТД [1].

В первом варианте конфигурация и расположение топливных каналов внутри фронтальной плиты были заимствованы с летного варианта камеры сгорания. Так во фронтальной плите имеется два ряда окон для установки форсунок. Установленные в плите форсунки можно разделить на 3 группы. Форсунки внутреннего ряда №71...139 соединены с коллектором каналами диаметром $d_k=2,5$ мм. Нечетные форсунки, внешнего ряда

№1,3...69 получают топливо по каналам $d_k=2,5$ мм, а четные форсунки – $d_k=3,5$ мм.

Схема фронтальной плиты с располагаемыми топливными каналами представлена на рис.1.

Для определения расходных характеристик фронтального устройства использована установка (рис. 2), где в качестве рабочего тела, вместо метана, используется сжатый воздух.

Для измерения параметров воздуха через форсунки использовалась мерная трубка диаметром $d_{тр}=10$ мм. Конструкция трубки обеспечивает герметичное соединение с выходным сечением форсунки. С помощью водяных пьезометров в трубке измеряется полное и статическое давления – $\Delta H_{полн}$; $\Delta H_{стат}$.

Для оценки отклонения расхода воздуха, полученного с помощью мерной трубки, от истинного значения проведены тарировочные измерения на данной установке рис. 2.

Измерение давлений в коллекторе плиты по окружности камеры сгорания проводилось с помощью мерной трубки с заглушенным выходным сечением. В отсутствие протока воздуха через трубку в атмосферу, давление от коллектора – $P_{кол}$ по каналу через форсунку и мерную трубку передается без потерь на манометр.

Испытания проводились в несколько этапов. Поочередно проводилось измерение параметров для четных форсунок внешнего ряда (№2,4...70, $d_k=3,5$ мм), нечетных форсунок внешнего ряда (№13...69, $d_k=2,5$ мм), нечетных и выборочного четных форсунок внутреннего ряда (№71,72...139, $d_k=2,5$ мм), четных форсунок внешнего ряда при заглушенном штуцере №4. Отдельно измерялось давление воздуха в коллекторе плиты по окружности камеры сгорания. Схема расположения топливоподводящих каналов во фронтальном устройстве приведена на рис.3.

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

E-mail: andreymbaklanov@bk.ru

Маркушин Андрей Николаевич, главный специалист по ГТД.

E-mail: amarkushin@oao.kmro.ru

Салимзянова Гузель Фаритовна, аспирант.

E-mail: g.salimzyanova@yandex.ru

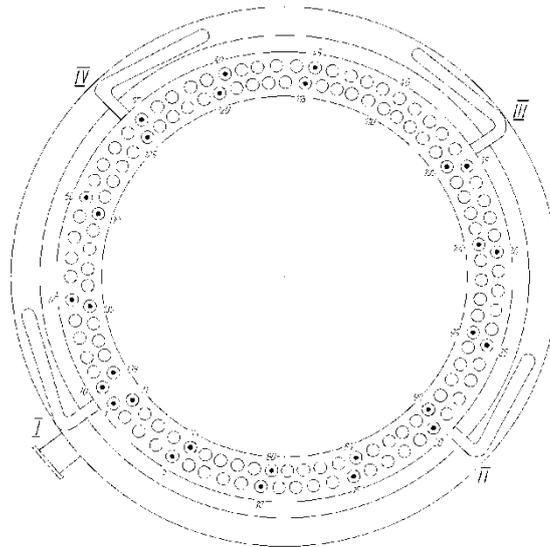


Рис. 1. Схема фронтальной плиты с располагаемыми топливными каналами

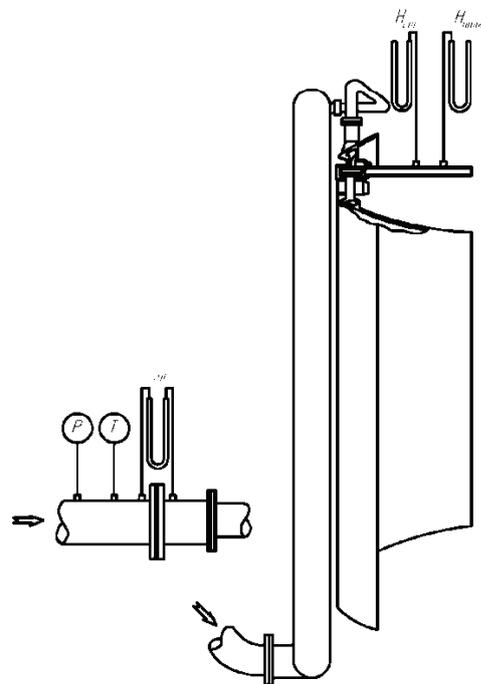
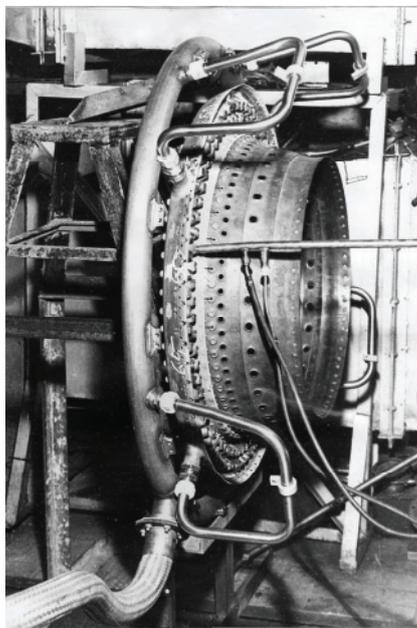


Рис. 2. Схема и фото установки для исследования расходных характеристик фронтального устройства

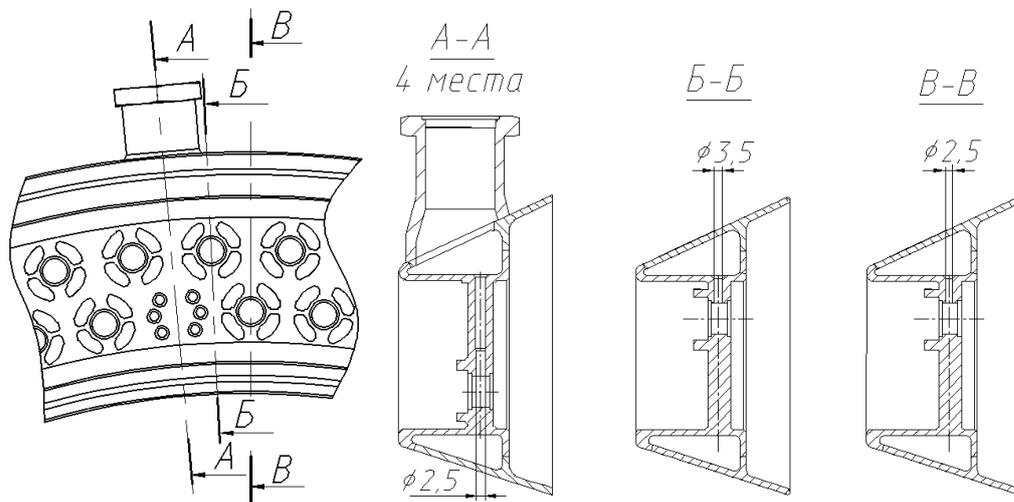


Рис. 3. Схема расположения топливоподводящих каналов во фронтальном устройстве

Вычисление расхода воздуха через форсунки проводилось по результатам измерения избыточного полного и статического давлений в мерной трубке и температуры воздуха перед топливным коллектором.

Давление в помещении определялось с помощью зависимости:

$$P_n = B_n / 735,6 . \quad (1)$$

Полное и статическое давление в мерной трубке:

$$P_{mp}^* = P_n + \Delta H_{стат} / 10000 ; \quad (2)$$

$$P_{mp} = P_n + \Delta H_{стат} / 10000 ; \quad (3)$$

$$\pi(\lambda_{тр}) = P_{mp} / P_{mp}^* . \quad (4)$$

$q(\lambda_{тр})$ определяется по таблицам ГДФ.

Расход воздуха через форсунку:

$$G_\phi = 0,3965 \cdot \frac{P_{mp}^* q(\lambda_{nh}) F_{mp}}{\sqrt{T}} , \quad (5)$$

где $F_{тр} = 0,7854 \text{ см}^2$.

Общий расход воздуха через топливную систему камеры сгорания определялся с помощью диафрагмы и вычисляется по формуле:

$$G_B = 0,154 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_i \cdot x P_1}{T}} \quad (6)$$

Для каждой группы форсунок вычислялось среднее значение расхода воздуха:

$$G_{\phi_{cp}} = \sum_{i=1}^n G_{\phi_i} / n . \quad (7)$$

Относительное отклонение расхода через форсунку от среднего значения:

$$\delta G_\phi = \frac{G_\phi - G_{\phi_{cp}}}{G_{\phi_{cp}}} . \quad (8)$$

Среднее значение разброса расхода воздуха:

$$\delta G_{\phi_{cp}} = \pm \sum_{i=1}^n G_{\phi_i} \delta / n . \quad (9)$$

Сравнение форсунок по уровню разброса расхода воздуха проведено для следующих вариантов:

- четные форсунки внешнего ряда ($d_k=3,5\text{мм}$);
- нечетные форсунки внешнего ряда ($d_k=2,5\text{мм}$);
- форсунки внутреннего ряда ($d_k=2,5\text{мм}$);

Отклонение расхода воздуха через форсунки от среднего значения представлен на рис. 4. Результаты исследования показали, что наибольший разброс значений G_ϕ по окружности камеры сгорания имеет место для форсунок, соединенных с каналами в плите $d_k=3,5 \text{ мм}$. Так, для четных форсунок внешнего ряда среднее значение разброса расхода равно $\delta G_{\phi_{cp}}=8,3\%$, а для нечетных форсунок внешнего ряда $\delta G_{\phi_{cp}}=5,5\%$. Для форсунок с диаметром выходного сечения $d_\phi=5 \text{ мм}$ и каналами $d_k=2,5 \text{ мм}$ расход однозначно определяется площадью канала.

Две группы форсунок, соединенных с каналами $d_k=2,5 \text{ мм}$, также отличаются по уровню неравномерности G_ϕ . Для форсунок внутреннего ряда $\delta G_{\phi_{cp}}=7,4\%$, для форсунок внешнего ряда $\delta G_{\phi_{cp}}=5,5\%$. То есть, при увеличении длины ка-

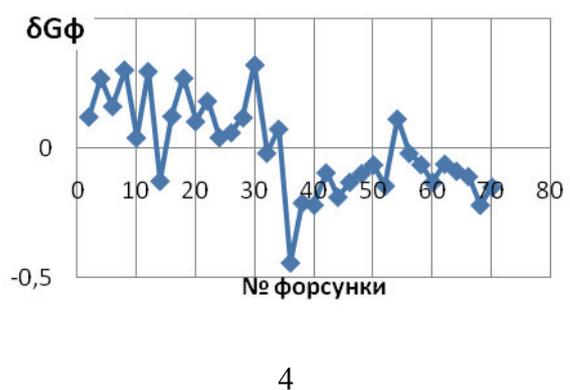
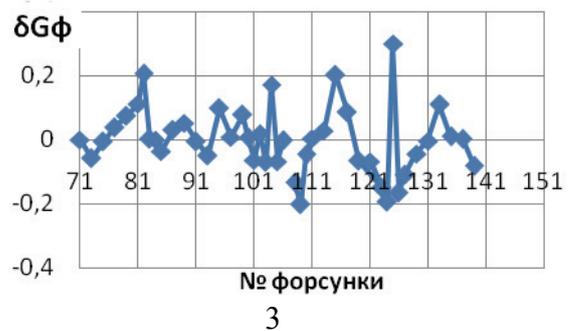
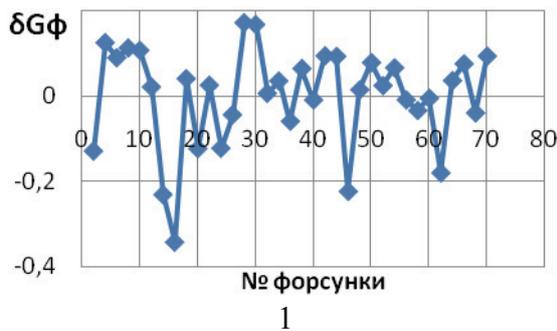


Рис. 4. Отклонение расхода воздуха через форсунки от среднего значения

налов (с 9 до 39 мм) уровень неравномерности G_{ϕ} увеличивается.

В результате выявленных недостатков в системе топливоподводящих каналов, фронтальная плита была доработана. Схема доработки топливоподводящих каналов представлена на рис. 5.

Наружный и внутренний коллекторы плиты были увеличены и выполнены сообщающимися, путем организации четырех равнорасположенных по окружности каналов соединяющих их. Данное конструктивное решение было реализовано за счет исключения трех окон для форсунок и на их месте внутри стенки плиты выполнены каналы.

После внедрения данных конструктивных мероприятий были проведены повторные испытания по оценке отклонения расхода воздуха. Так, для всех форсунок внешнего и внутреннего ряда среднее значение разброса расхода не превысило $\delta G_{\phi, \text{ср}} = 3,5\%$.

Для подтверждения эффективности внедренных мероприятий и выявления влияния разброса расхода топлива по форсункам на показатель максимальной окружной неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания. Исследования полноразмерной камеры сгорания по определению неравномерности температур-

ного поля производились на стенде, схема которого показана на рис. 7.

В качестве источника сжатого воздуха 1 служит двигатель НК-16СТ. Из-за последней ступени компрессора отбирался воздух, который подается в камеру сгорания 7. На линии подвода воздуха установлены расходомерные устройства 2, а перед камерой сгорания мерный участок 3 в который входят гребенки для определения полного 4 и статического 5 давлений и температуры 6 воздуха на входе в камеру сгорания. Для снятия температурного поля на выходе из камеры сгорания устанавливается гребенка 8 температуры T_4^* [2].

Топливный (природный) газ подается из магистрали через стандартную расходомерную шайбу 9 и манометр 10. Данный автономный стенд позволяет проводить испытание камеры сгорания в диапазоне параметров:

- расход воздуха $G_B = 0,2 \dots 13$ кг/сек;
- полное давление воздуха на входе $P_k^* = 1,06 \dots 1,6$ кг/см²;
- температура воздуха на входе $t_k = 20 \dots 220$ °C;

Стенд оборудован необходимыми системами измерения параметров и их регистрации.

На данной установке испытывалось несколько камер сгорания. Первая и вторая камера отли-

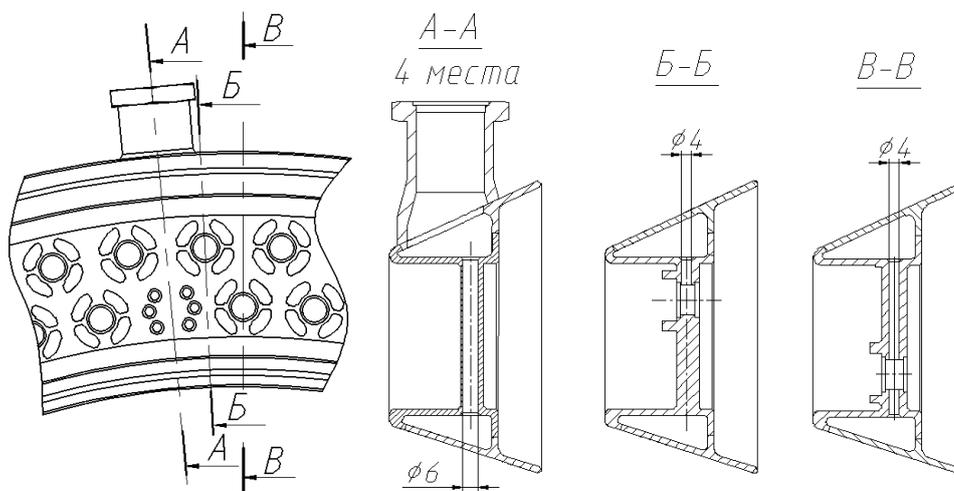


Рис. 5. Схема расположения топливоподводящих каналов во фронтальном устройстве после доработки



Рис. 6. Отклонение расхода воздуха через форсунки от среднего значения

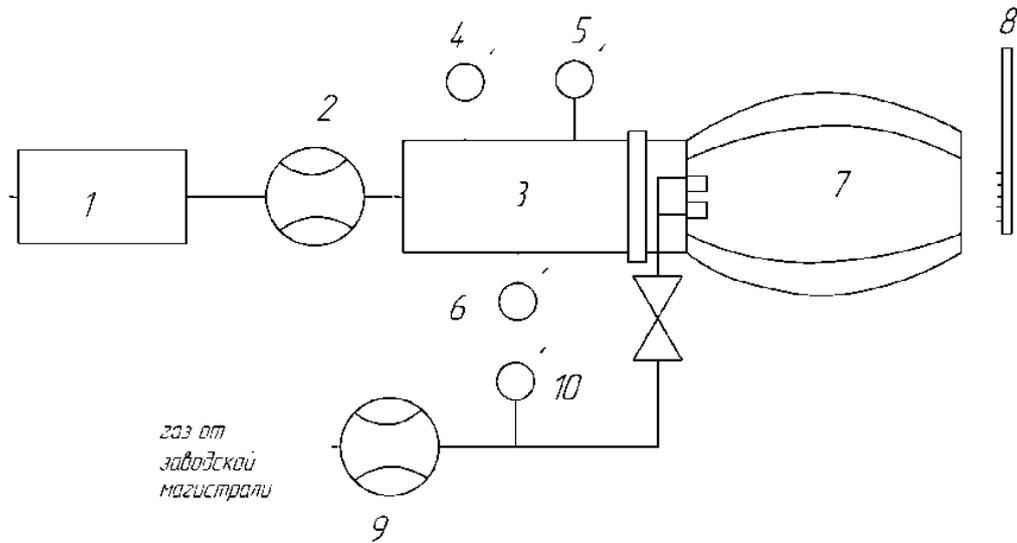


Рис. 7. Схема стенда для испытаний полноразмерных камер сгорания

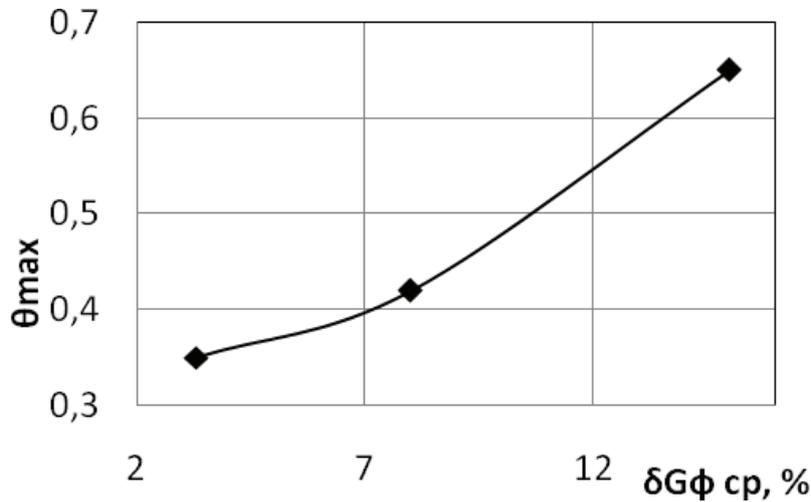


Рис. 8. Влияние относительного отклонения расхода через форсунки на максимальную неравномерность поля температур на выходе из КС

чались фронтными устройством, особенность конструкции которых описана выше, остальные отличались диаметрами и расположением топливоподводящих отверстий, а следовательно, и различным разбросом расхода топлива по форсункам.

Для оценки максимальной неравномерности температурного поля использовалась зависимость [3]:

$$\theta_{\max} = \frac{T_{\max}^* - T_{\text{cp}}^*}{T_{\text{cp}}^* - T_{\text{к}}}, \quad (10)$$

T_{\max}^* , T_{cp}^* – максимальная и средняя температуры на выходе из КС

С учетом оценки максимальной неравномерности температурного поля построена зависимость (рис. 8), характеризующая влияние относительного отклонения расхода через форсунки на максимальную неравномерность поля температур на выходе из КС.

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ и методика определения расхода топлива по форсункам и оценки отклонения расхода, которая позволила оптимизировать систему топливоподдачи во фронтальной плите многофорсуночной камеры сгорания.
2. Выявлено, что с увеличением разброса расхода топлива через форсунки увеличивается максимальная неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания.
3. Оптимальным значением $\delta G_{\text{ф ср}}$ является величина не более 3,5%, при которой максимальная неравномерность поля θ_{\max} лежит в пределах 0,3-0,4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние формы насадки вихревой горелки на смешение в закрученной струе/ А.Н Маркушин,

- А.В. Бакланов, Н.Е. Цыганов// Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 3.С 13-18.
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. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения/ Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, В.Е. Резник, Ю.И. Цыбизов. Самара: СНЦ РАН, 2004. 266с.

THE EFFECT OF FLOW CHARACTERISTICS OF THE DOME ON TEMPERATURE FIELD VARIATION AT THE COMBUSTOR EXHAUST

© 2016. A.N. Markushin, A.V. Baklanov, G.F. Salimzyanova

¹JSC «Kazan motor production association»

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

The article describes a principle of the aircraft engine combustor conversion for the ground operation condition and for using natural gas as a fuel. It also presents design features of the dome and its post-design process stages for minimising fuel flow difference between sprayers. The facility and experimental technique is described. The article shows the relation between fuel flow variation in the sprayers and maximal temperature field variation at the combustor exhaust.

Keywords: combustion chamber, design, experiment, dome, spray nozzle, stand.

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: andreymbaklanov@bk.ru

Guzel Salimzyanova, Postgraduate Student.

E-mail: g.salimzyanova@yandex.ru