

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ланский А.М.* , Лукачёв С.В. , Коломзаров О.В.*****

*Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет),
СГАУ, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

** e-mail: amlansky@mail.ru*

*** e-mail: lukachev@mail.ru*

**** e-mail: kolomzarov@gmail.com*

Представлен анализ изменения конструктивно-геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) при уменьшении их размеров. Особое внимание уделено наименее изученной области — малоразмерным ГТД, где происходит их существенное изменение. Получен комплекс корреляционно-регрессионных зависимостей, позволяющий на этапе эскизного проектирования более обоснованно оценивать параметры камер сгорания.

Ключевые слова: малоразмерный ГТД, камера сгорания, конструктивно-геометрические размеры, интегральные параметры, корреляционно-регрессионные зависимости, эскизное проектирование.

Разработка эскизного проекта камер сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей (КС МГТД) — это относительно небольшой по продолжительности, но чрезвычайно важный по принимаемым решениям этап жизненного цикла двигателя. В результате эскизного проектирования формируется необходимая информация как по камере сгорания в целом, так и по всем её элементам. Это в конечном итоге предопределяет облик КС и особенности её конструктивного исполнения. Важной и наименее изученной проблемой является выбор конструктивно-геометрических размеров и оценка интегральных характеристик КС МГТД с учётом совместной работы узлов турбокомпрессора [11]. Редкие публикации, касающиеся этого этапа проектирования ГТД [1—3], обычно не рассматривают проблемы, связанные с камерой сгорания, поэтому в данной работе предпринята попытка частного их решения.

Схемные решения для камер сгорания МГТД

Вследствие различного целевого назначения малоразмерных ГТД, условий их эксплуатации, широкого диапазона изменения параметров термодинамического цикла и размеров, наибольшее распространение в практике получили следующие схемы

камер сгорания МГТД (рис. 1): прямоточная (а), противоточная с выходом на осевую турбину (б), противоточная с выходом на радиальную турбину (в), индивидуальная (г), радиально-кольцевая (д) и диагональная (е). Их преимущества и недостатки общеизвестны [3].

Статистические зависимости конструктивно-геометрических размеров КС ГТД

В большинстве случаев на этапе эскизного проектирования для определения размеров камер сгорания ГТД используется прототип. Вместе с тем при создании принципиально новых ГТД, решающих расширенный комплекс задач, необходимы новые подходы к эскизному проектированию узлов двигателя. Одним из них является использование статистических данных, позволяющих более корректно решать задачи данного этапа.

К числу важных геометрических параметров камер сгорания ГТД относится объём жаровой трубы КС $V_{жт}$, определяющий её удельную теплонапряжённость $Q_{вр}$ и время пребывания продуктов сгорания τ_n в ней. Его значение можно определить, используя следующие зависимости [2, 3, 5, 6]:

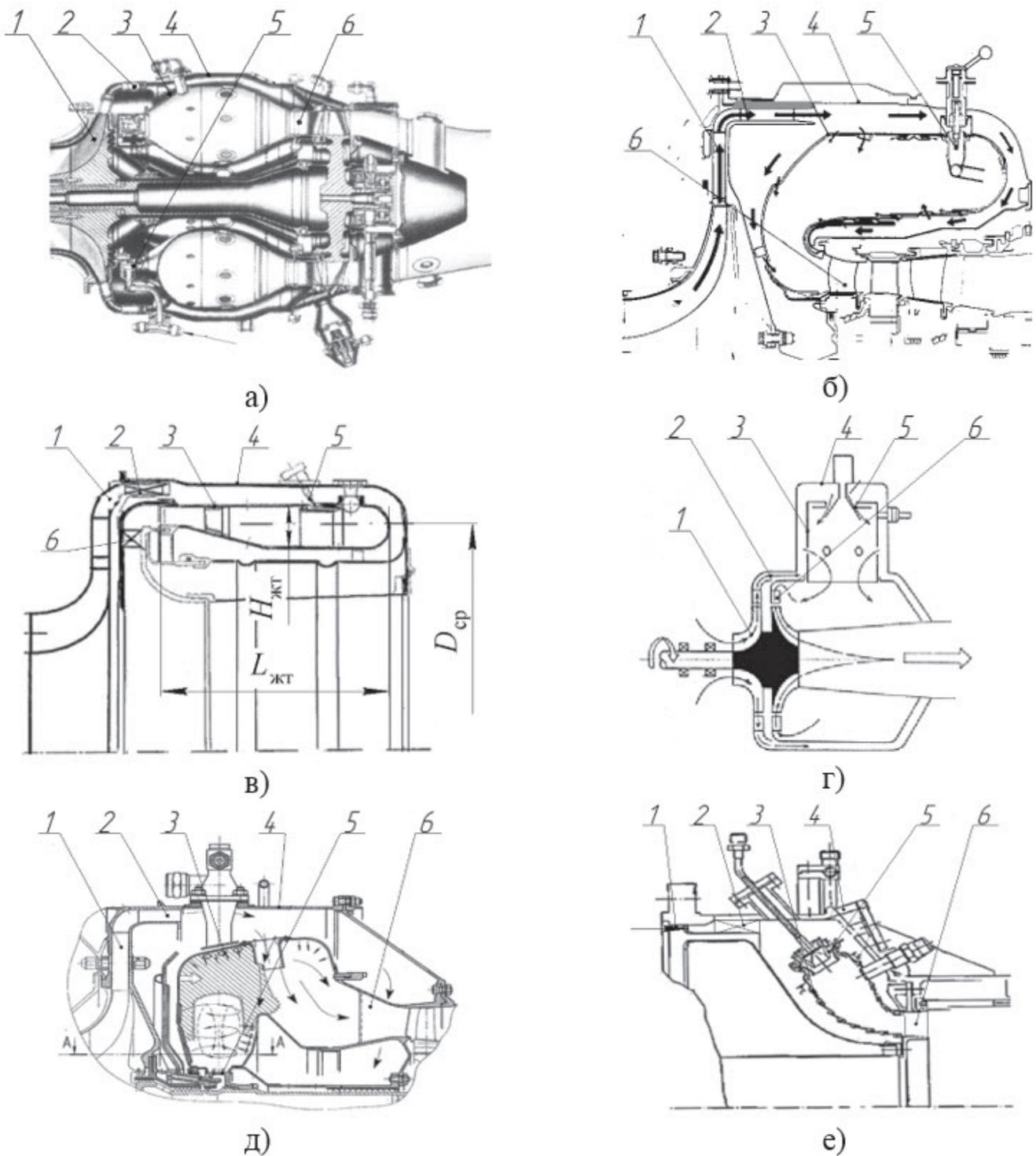


Рис. 1. Схемы камер сгорания МГТД: а — прамоточная камера сгорания; б — противоточная камера сгорания с осевой турбиной; в — противоточная камера сгорания с радиальной турбиной; г — радиально-кольцевая камера сгорания; д — индивидуальная камера сгорания; е — диагональная камера сгорания; 1 — основной поток воздуха; 2 — спрямляющий аппарат компрессора; 3 — жаровая труба; 4 — корпус; 5 — форсунки; 6 — сопловой аппарат

$$V_{\text{жт}} = \frac{3600 G_{\text{в}} c_p (\beta T_{\text{г}}^* - T_{\text{к}}^*)}{Q_{\text{вр}} p_{\text{к}}}; \quad (1)$$

$$V_{\text{жт}} = \frac{3600 G_{\text{т}} H_u \eta_{\text{т}}}{Q_{\text{вр}} p_{\text{к}}}; \quad (2)$$

$$V_{\text{жт}} = \pi D_{\text{ср}} L_{\text{жт}} H_{\text{жт}}; \quad (3)$$

$$V_{\text{жт}} = Q_{\text{в}} \tau_{\text{п}}; \quad (4)$$

где $V_{\text{жт}}$ — объём жаровой трубы КС; c_p — удельная теплоёмкость рабочего тела; $\beta = \frac{G_{\text{т}}}{G_{\text{в}}}$ — отношение

расхода газа на выходе из КС к расходу воздуха за компрессором; T_{Γ}^* и $T_{\text{к}}^*$ — температуры газа на выходе из КС и из компрессора; $p_{\text{к}}^*$ — давление воздуха на выходе из компрессора; $Q_{\text{вр}}$ — удельная теплонпряжённость; $H_{\text{и}}$ — низшая удельная теплота сгорания топлива; η_{Γ} — коэффициент полноты сгорания топлива; $D_{\text{ср}}$ — средний диаметр жаровой трубы; $H_{\text{жт}}$, $L_{\text{жт}}$ — высота и длина жаровой трубы КС; $Q_{\text{в}}$ — объёмный расход воздуха за компрессором.

Зависимости (1)–(4), как правило, используются в конструкторском гидравлическом расчёте камер сгорания ГТД, когда выполнены термодинамические расчёты и профилирование проточной части двигателя.

На этапе эскизного проектирования, при отсутствии прототипа, целесообразно использовать статистические зависимости для выполненных ГТД и их камер сгорания, одна из которых, для объёма жаровой трубы КС, представлена на рис. 2.

Выражение для $V_{\text{жт}}$ от расходного комплекса

$G_{\text{рк}} = (G_{\text{в}} \sqrt{T_{\text{к}}^*}) / p_{\text{к}}^*$ в логарифмических координатах имеет линейную зависимость, которую можно представить в следующем виде:

$$V_{\text{жт}} = 0,08 G_{\text{рк}}^{1,16}. \quad (5)$$

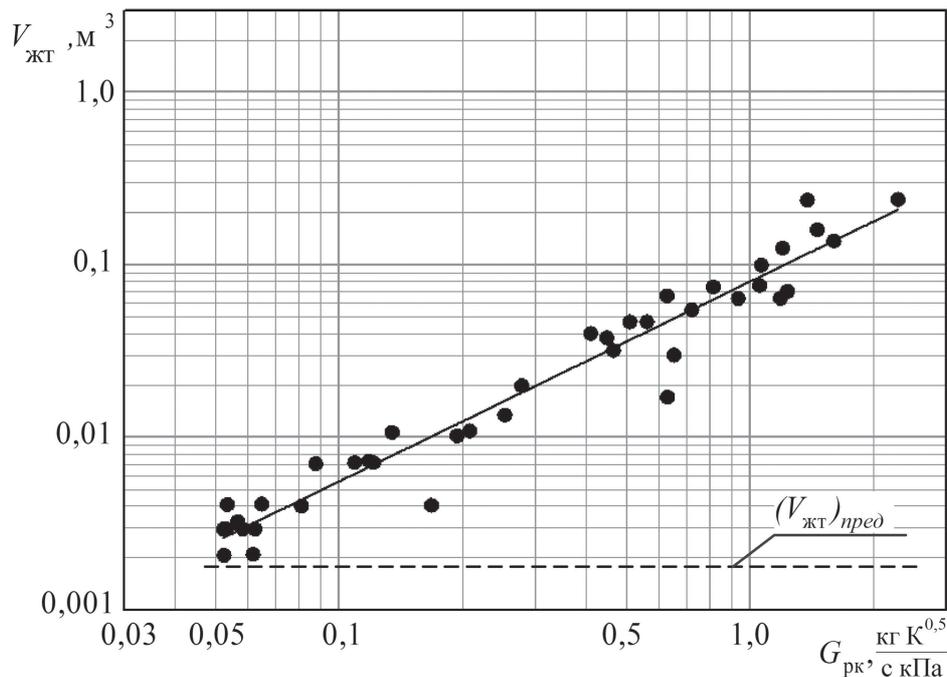


Рис. 2. Зависимость объёма жаровой трубы КС ($V_{\text{жт}}$) от расходного комплекса ($G_{\text{рк}}$)

Здесь же, на рис. 2, показана линия $(V_{\text{жт}})_{\text{пред}}$, соответствующая предельному значению $Q_{\text{вр}}^{\text{пред}}$, характерному для камер сгорания ГТД кратковременного действия.

Как следует из (3), объём жаровой трубы КС функционально связан с $H_{\text{жт}}$ и $L_{\text{жт}}$. На рис. 3 представлены статистические данные изменения $(L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}})$ от расходного комплекса $G_{\text{рк}}$ для различных жаровых труб КС. Их можно описать следующей корреляционно-регрессионной зависимостью:

$$\frac{L_{\text{жт}}}{H_{\text{жт}}} = 3,26 G_{\text{рк}}^{0,1}. \quad (6)$$

Из графика видно, что с изменением $G_{\text{рк}}$ в широком диапазоне $L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}}$ изменяется незначительно и в проектных расчётах можно использовать значение $L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}} = 2,5$. В ряде случаев, для камер сгорания ГТД, когда этому не препятствуют габаритные ограничения, $L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}}$ может достигать значений $L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}} = 4...5$. Как правило, это объясняется необходимостью обеспечения высокого коэффициента полноты сгорания топлива.

Режимные параметры первичной зоны и характерные геометрические размеры фронтального устройства

Режим работы первичной зоны жаровой трубы КС определяется коэффициентом избытка воздуха во фронтальном устройстве $\alpha_{\text{фр}}$, от которого зависят выгорание топлива по длине жаровой трубы КС,

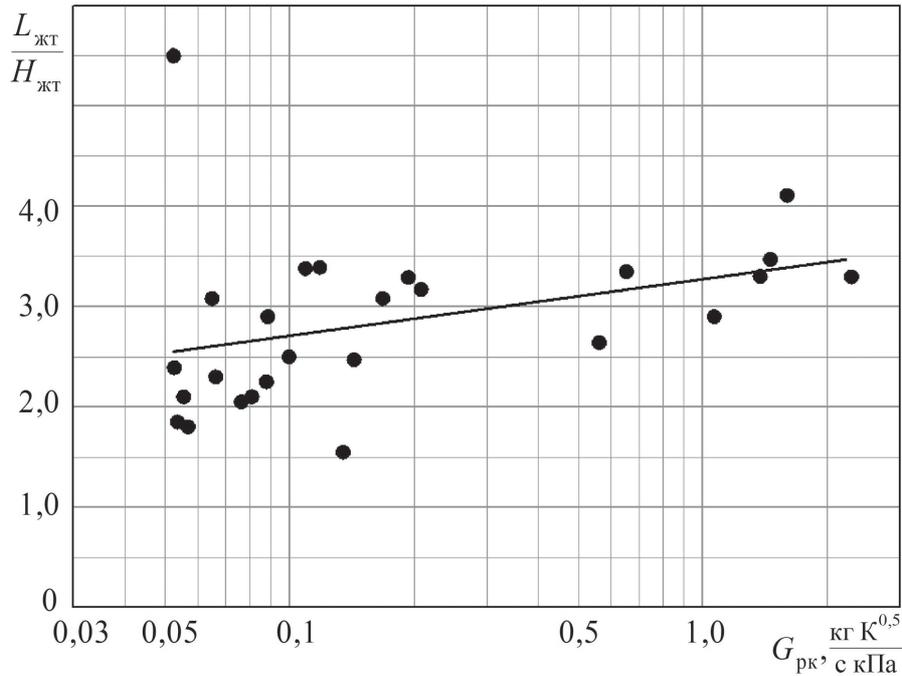


Рис. 3. Зависимость относительной длины жаровой трубы КС ($L_{жт}/H_{жт}$) от расходного комплекса ($G_{рк}$)

стабилизация пламени, запуск камеры сгорания и её эмиссионные характеристики. Для большинства выполненных камер сгорания ГТД $\alpha_{фр}$ изменяется в пределах $\alpha_{фр} = 0,5 \dots 1$ (рис. 4). Представленные статистические данные были аппроксимированы в виде следующей зависимости:

$$\alpha_{фр} = 0,8 G_{рк}^{0,1}.$$

К характерным геометрическим размерам фронтального устройства жаровой трубы КС относится

диаметр горелки (завихрителя) D_r и относительный шаг между топливными форсунками \bar{t}_ϕ :

$$\bar{t}_\phi = \frac{t_\phi}{H_{жт}^{mid}} = \frac{\pi D_{ср}}{n_\phi H_{жт}},$$

где t_ϕ — шаг между топливными форсунками; $H_{жт}^{mid}$ — высота жаровой трубы КС в миделевом сечении; n_ϕ — количество топливных форсунок.

Диаметр горелки (завихрителя) по мере уменьшения $G_{рк}$ монотонно снижается (рис. 5). В ряде

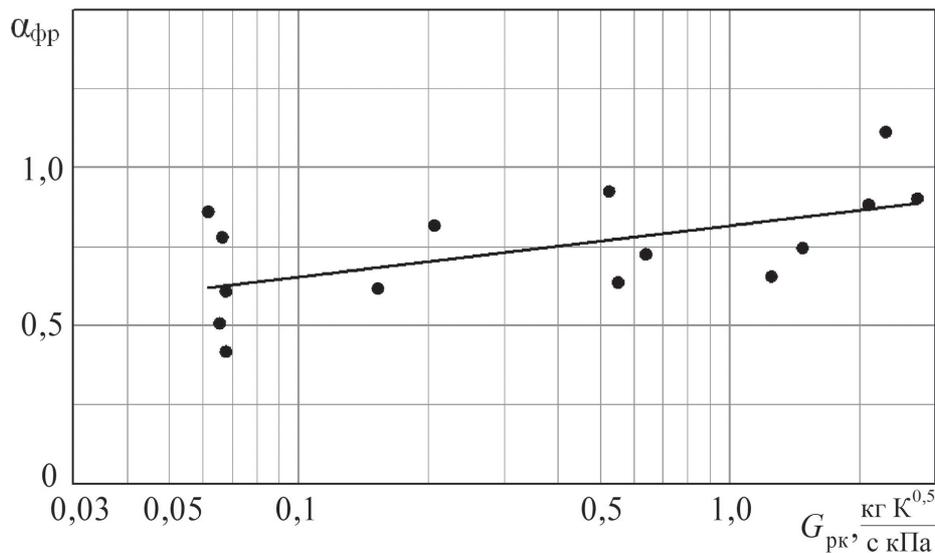


Рис. 4. Зависимость коэффициента избытка воздуха во фронтальном устройстве жаровой трубы КС $\alpha_{фр}$ от расходного комплекса $G_{рк}$

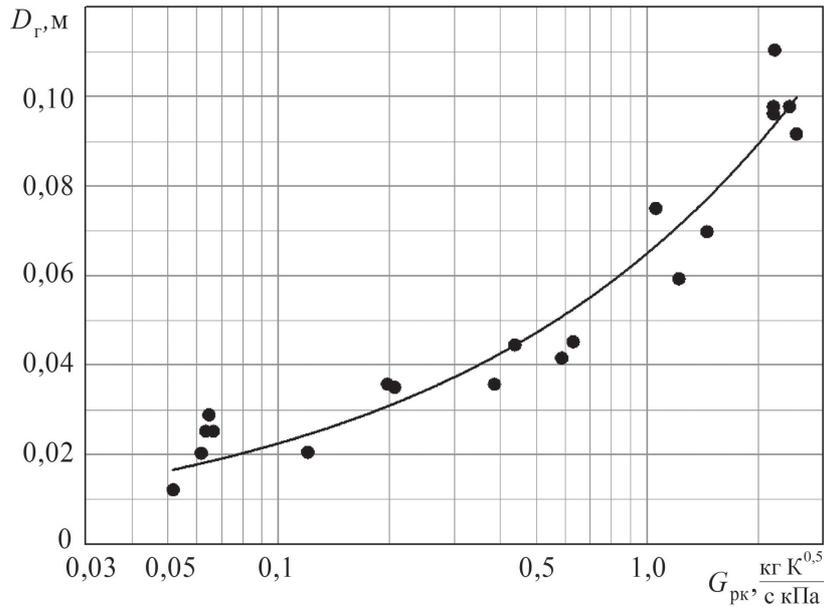


Рис. 5. Зависимость диаметра горелки D_r от расходного комплекса G_{rk}

исследований [4, 7] показано, что предельное значение $D_r^{пред}$, исходя из обеспечения надёжной стабилизации пламени, соответствует 0,015 м, зависимость же D_r от G_{rk} можно представить в следующем виде:

$$D_r = 0,065 G_{rk}^{0,46}.$$

Шаг между топливными форсунками определяет начальную неравномерность распределения топлива в первичной зоне жаровой трубы КС и, как следствие, неравномерность распределения температуры в выходном сечении камеры сгорания [8, 9].

Обобщение статических данных (рис. 6) показало, что для камер сгорания ГТД с $G_{rk} > 0,4$ значение \bar{t}_ϕ примерно постоянно и равно $\bar{t}_\phi = 2...3$.

Это соответствует рекомендациям, полученным в работах [4, 9], где установлено, что $\bar{t}_\phi^{пред} \approx 0,8$.

При переходе же в область камер сгорания МГТД ($G_b < 2,5$ кг/с) значения относительного шага между топливными форсунками возрастают и, как следствие, увеличивается неравномерность поля температуры газа на выходе из камеры сгорания [4].

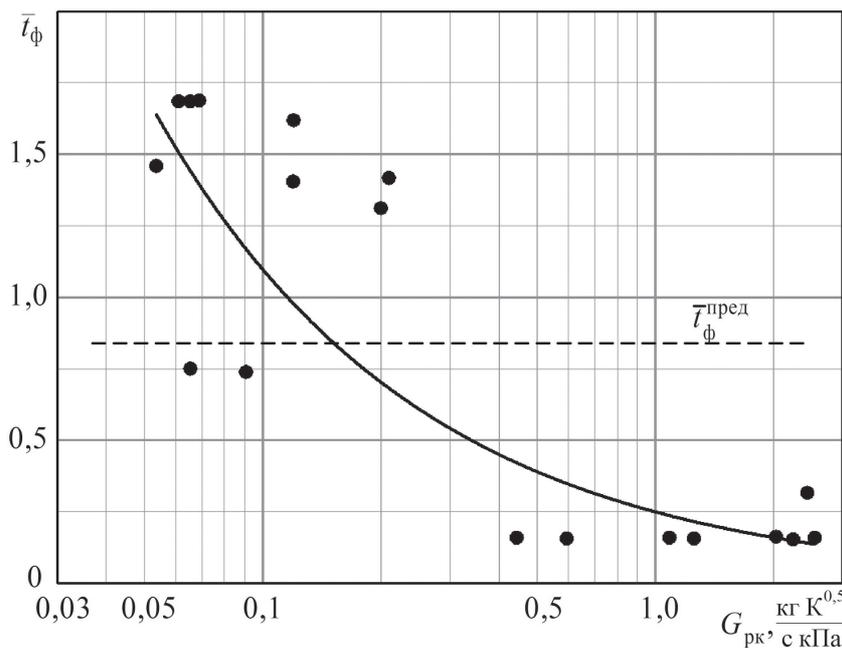


Рис. 6. Зависимость относительного шага между форсунками \bar{t}_ϕ от расходного комплекса G_{rk}

Корреляционно-регрессионная зависимость для \bar{i}_ϕ можно представить в виде

$$\bar{i}_\phi = 0,25 G_{\text{рк}}^{-0,64}.$$

Значение и тенденции изменения характерных площадей и их соотношений в зависимости от размеров двигателя играют важную роль при эскизном проектировании. Это объясняется тем, что интегральные параметры и характеристики камер сгорания ГТД функционально зависят от них и могут быть представлены в виде [4–7]:

$$\xi_{\text{кк}} = f\left(\frac{\sum F_o}{F_{\text{жт}}}, \frac{\sum F_{\text{кк}}}{\sum F_o}, \frac{F_{\text{фр}}}{\sum F_o}, \alpha_{\text{к}}, \dots\right);$$

$$\eta_{\text{г}}, EI_i = f\left(\frac{\sum F_o}{F_{\text{жт}}}, \frac{F_{\text{фр}}}{\sum F_o}, \alpha_{\text{к}}, \dots\right);$$

$$\alpha_{\text{ср}}, \alpha_{\text{зап}} = f\left(\frac{F_{\text{фр}}}{\sum F_o}, T_{\text{к}}^*, p_{\text{к}}^*, \dots\right);$$

$$\theta_{\text{ф}}^{\text{max}}, \theta_{\text{h}}^{\text{max}} = f\left(\frac{\sum F_o}{F_{\text{жт}}}, \frac{\sum F_{\text{кк}}}{\sum F_o}, \alpha_{\text{фр}}, l_{\text{г}}, \lambda_{\text{к}}, T_{\text{к}}^*\right),$$

где $\xi_{\text{кк}}$ — коэффициент гидравлических потерь в КС; $\eta_{\text{г}}$ — коэффициент полноты сгорания топлива; EI_i — эмиссия продуктов сгорания; $\alpha_{\text{ср}}$ и $\alpha_{\text{зап}}$ — коэффициенты избытка воздуха на границах срыва пламени и запуска КС; $\theta_{\text{ф}}^{\text{max}}$ и $\theta_{\text{h}}^{\text{max}}$ — максимальные окружная и радиальная неравномерности поля температуры газа на выходе из КС; $\sum F_o, F_{\text{жт}}, F_{\text{фр}}, \sum F_{\text{кк}}$ — суммарная площадь отверстий в жаровой трубе КС, площадь жаровой трубы КС в миделевом сечении, площадь фронтного устройства жаровой трубы КС, суммарная площадь наружного и внутреннего кольцевых каналов КС; $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициент избытка воздуха в КС; $l_{\text{г}}$ — длина газосборника жаровой трубы КС; $\lambda_{\text{к}}$ — приведенная скорость потока воздуха на выходе из компрессора.

На рис. 7 и 8 представлены тенденции изменения ряда характерных площадей в зависимости от расходного комплекса $G_{\text{рк}}$.

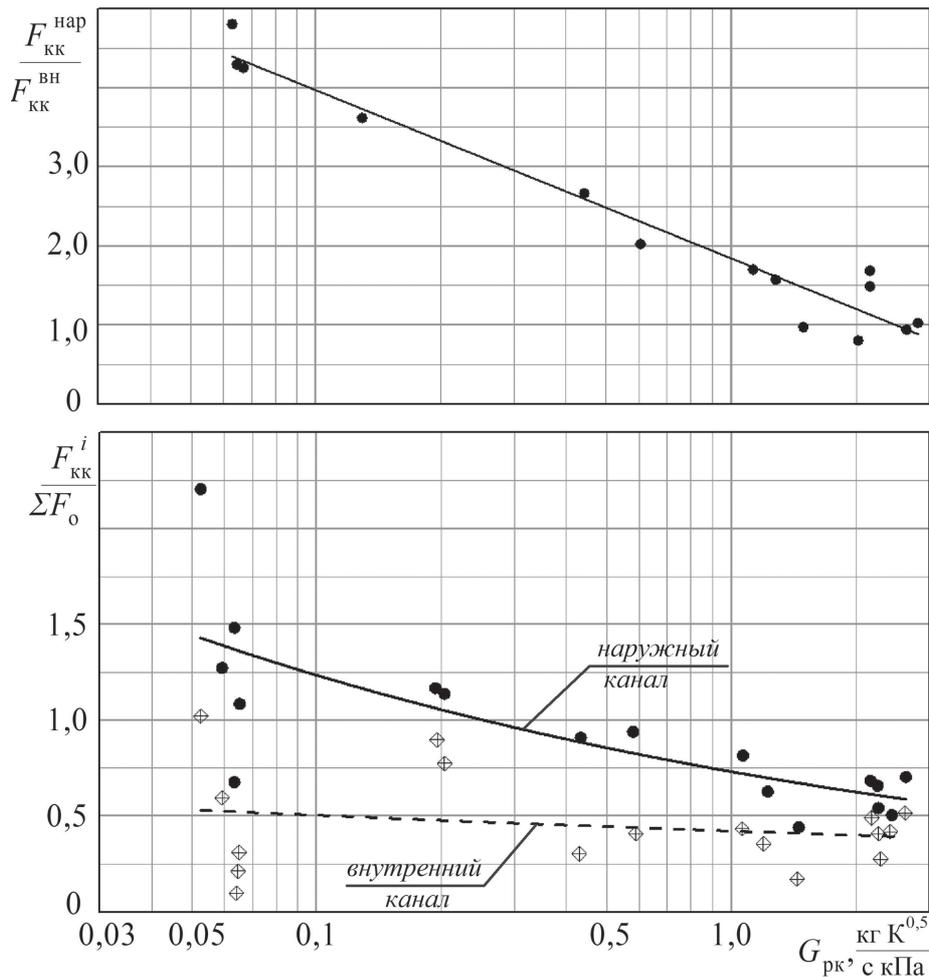


Рис. 7. Зависимость $F_{\text{кк}}^{\text{нар}}/F_{\text{кк}}^{\text{вн}}$ и $F_{\text{кк}}^i/\Sigma F_o$ от расходного комплекса $G_{\text{рк}}$

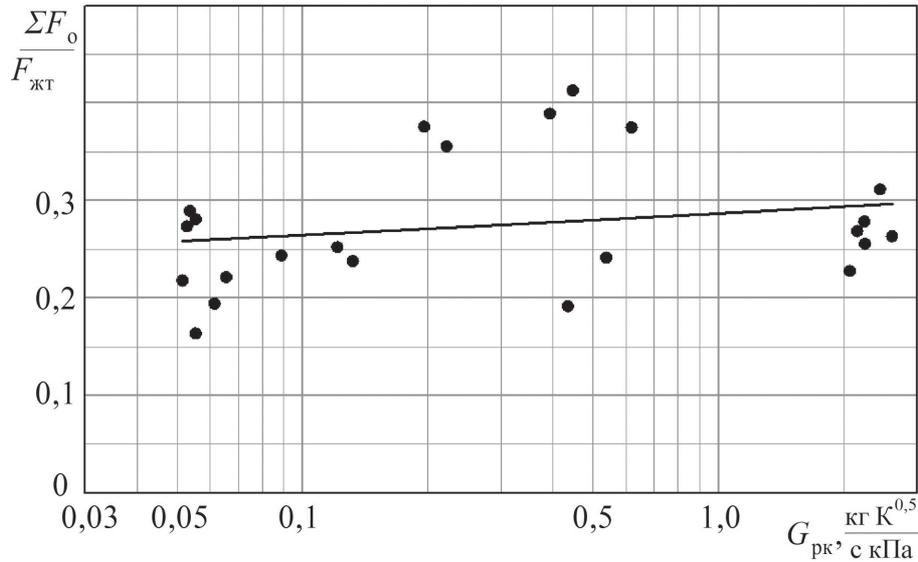


Рис. 8. Зависимость $\Sigma F_0/F_{жт}$ от расходного комплекса $G_{рк}$

Анализ приведённых статистических данных показал, что с уменьшением размеров увеличивается отношение $F_{кк}^{нар} / F_{кк}^{вн}$, что свидетельствует о преобладающем влиянии аэродинамики наружного канала камер сгорания МГТД в обеспечении её характеристик.

Интегральные параметры камеры сгорания

На этапе эскизного проектирования камеры сгорания необходимо оценить важнейшие её интегральные параметры: время пребывания в ней продуктов сгорания $\tau_{п}$, коэффициент форсирования

$K_V = G_v / (p_k^{*1,25} T_k V_{жт}^*)$ и удельную теплонапряжён-

ность Q_{vp} . На рис. 9—11 представлено изменение этих параметров в зависимости от $G_{рк}$.

Видно, что с уменьшением размеров двигателя Q_{vp} и K_V увеличиваются, а $\tau_{п}$ уменьшается. Данные тенденции можно описать следующими зависимостями:

$$K_V = 1,05 G_{рк}^{-0,46};$$

$$\tau_{п} = 0,00969 G_{рк}^{0,185};$$

$$Q_{vp} = 0,39 G_{рк}^{-0,29}.$$

Для оценки адекватности полученных корреляционно-регрессионных зависимостей использована

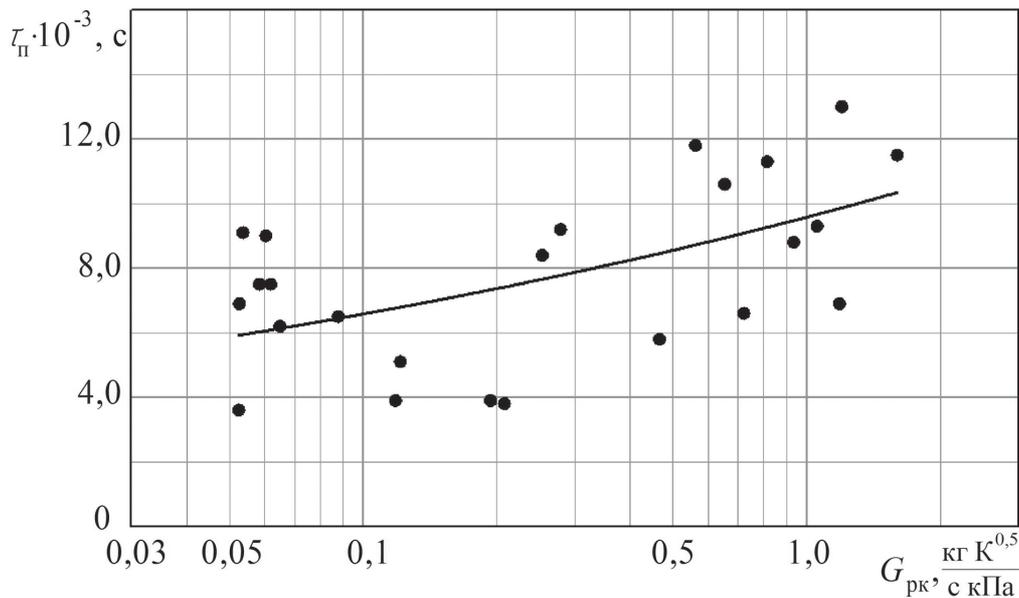


Рис. 9. Зависимость времени пребывания газа в КС $\tau_{п}$ от расходного комплекса $G_{рк}$

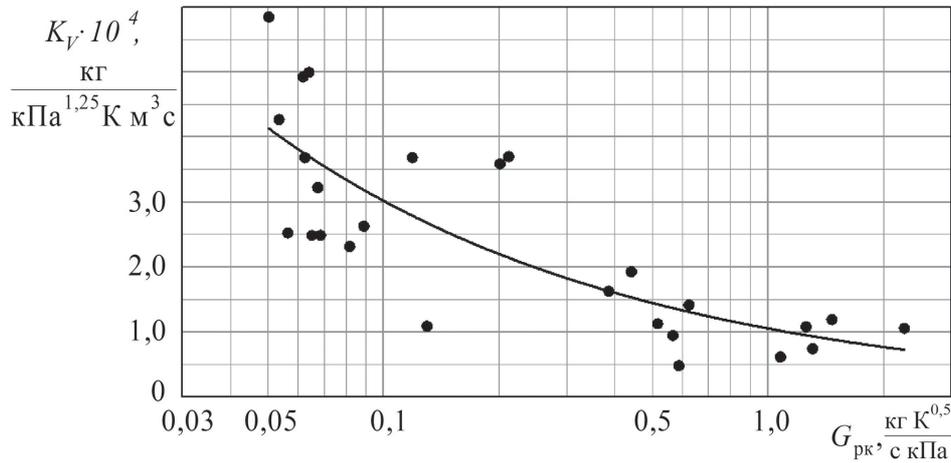


Рис. 10. Зависимость коэффициента форсирования K_V от расходного комплекса $G_{рк}$

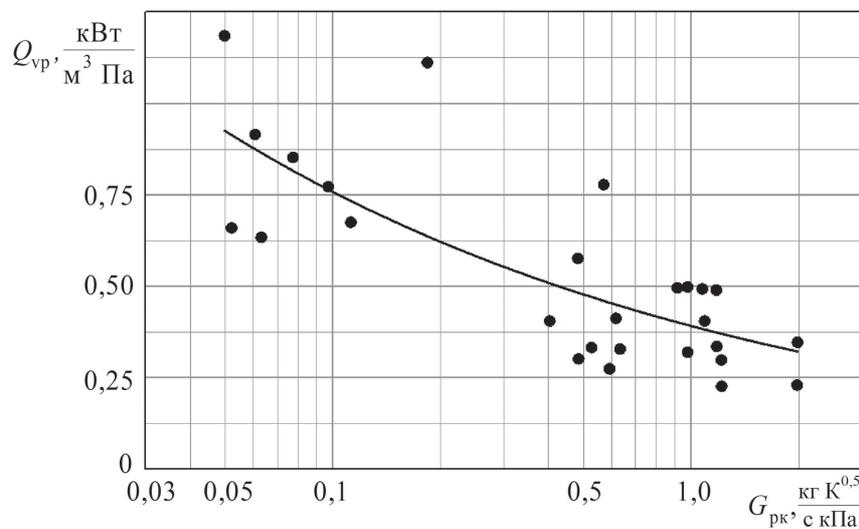


Рис. 11. Зависимость удельной теплonaпряжённости КС $Q_{вр}$ от расходного комплекса $G_{рк}$

лись коэффициент детерминации R^2 и критерий Фишера F . Коэффициент R^2 применяется для определения меры качества регрессионной модели, а критерий F — для характеристики доли вариаций исследуемой в модели переменной y и влияющих на неё факторов [10]. В качестве нормативного значения коэффициента детерминации принимается значение $R^2 \geq 0,7$, в этом случае зависимость, описывающая статистические данные, считается адекватной. Значение коэффициента R^2 рассчитывалось по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где y_i — значения наблюдаемой переменной; \bar{y} — среднее значение наблюдаемой переменной; \hat{y}_i — модельные значения, построенные по наблюдаемым параметрам.

Однако по величине коэффициента R^2 возможно только предварительно оценить качество уравнения регрессии, поэтому его статистическая значимость определяется с помощью критерия Фишера, который определяется с использованием следующей зависимости:

$$F = \frac{R^2(n - m - 1)}{(1 - R^2)m},$$

где n — число наблюдений; m — число параметров при факторе x .

Путём сравнения фактического значения F и табличного $F_{табл}$ оценивают адекватность полученной зависимости.

Сводные результаты обработки статистических данных представлены в таблице. Видно, что большинство значений коэффициента детерминации находятся в пределах от 0,06 до 0,7. Однако по критерию Фишера ряд зависимостей $\Sigma F_0 / F_{жт}$,

Корреляционно-регрессионные зависимости конструктивно-геометрических размеров и интегральных параметров камер сгорания ГТД

Наименование параметра	Функция	Коэффициент детерминации R^2	Критерий Фишера	
			F	$F_{\text{табл}}$
$V_{\text{жт}}, \text{м}^3$	$V_{\text{жт}} = 0,08G_{\text{рк}}^{1,16}$	0,95	228,00	4,08
$\frac{L_{\text{жт}}}{H_{\text{жт}}}$	$\frac{L_{\text{жт}}}{H_{\text{жт}}} = 3,256G_{\text{рк}}^{0,1}$	0,19	1,72	4,23
$\bar{t}_{\text{ф}}$	$\bar{t}_{\text{ф}} = 0,25G_{\text{рк}}^{0,64}$	0,77	15,62	4,41
$D_{\text{г}}, \text{м}$	$D_{\text{г}} = 0,065G_{\text{рк}}^{0,46}$	0,91	53,93	4,35
$\alpha_{\text{фр}}$	$\alpha_{\text{фр}} = 0,8G_{\text{рк}}^{0,1}$	0,35	1,62	4,67
$\frac{\sum F_0}{F_{\text{жт}}}$	$\frac{\sum F_0}{F_{\text{жт}}} = 0,288G_{\text{рк}}^{0,035}$	0,058	0,39	4,28
$\frac{F_{\text{кк}}^{\text{нар}}}{\sum F_0}$	$\frac{F_{\text{кк}}^{\text{нар}}}{\sum F_0} = 0,73G_{\text{рк}}^{-0,23}$	0,63	7,38	4,45
$\frac{F_{\text{кк}}^{\text{вн}}}{\sum F_0}$	$\frac{F_{\text{кк}}^{\text{вн}}}{\sum F_0} = 0,052G_{\text{рк}} + 0,5$	0,043	0,19	4,45
$K_V, \frac{\text{кг}}{\text{кПа}^{1,25} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}}$	$K_V = 1,05G_{\text{рк}}^{-0,46}$	0,66	14,24	4,23
$\tau_{\text{п}}, \text{с}$	$\tau_{\text{п}} = 0,00969G_{\text{рк}}^{0,185}$	0,26	2,58	4,23
$Q_{\text{вп}}, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}$	$Q_{\text{вп}} = 0,39G_{\text{рк}}^{-0,29}$	0,6	11,50	4,21

$F_{\text{кк}}^{\text{вн}}/\sum F_0$, $L_{\text{жт}}/H_{\text{жт}}$, $\alpha_{\text{фр}}$, $\tau_{\text{п}}$ не в полной мере отвечают качеству корреляции, что можно объяснить недостаточным количеством статистических данных. Это не исключает возможности их использования при предварительной оценке конструктивных и интегральных параметров камер сгорания ГТД.

Выводы

Приведены статистические данные и корреляционно-регрессионные зависимости, которые описывают изменение конструктивно-геометрических размеров и интегральных параметров КС. Полученные зависимости являются важным инструментом для эскизного проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. Горбунов Г.М. Выбор параметров и расчет основных камер сгорания ГТД. — М.: Изд-во МАИ, 1972. — 231 с.
2. Шляхтенко С.М., Акимов В.М., Бакулев В.И., Горбунов Г.М. Теория воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1975. — 568 с.
3. Мингазов Б.Г. Внутрикамерные процессы и автоматизированная доводка камер сгорания ГТД. — Казань: КГТУ, 2000. — 168 с.
4. Ланский А.М., Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД: Монография. — Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2009. — 335 с.
5. Григорьев А.В., Митрофанов В.А., Русаков О.А. Теория камер сгорания. — СПб.: Наука, 2010. — 328 с.
6. Рудаков О.А., Саркисов А.А., Силивон Н.Д. Конструкция, теория и расчет камер сгорания газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1993. — 170 с.
7. Лукачев В.П., Ланский А.М., Абрашкин В.Ю., Диденко А.А., Зубков П.Г., Ковылов Ю.Л., Матвеев С.Г., Цыганов А.М., Шамбан М.А., Яковлев В.А. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева. Серия: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. 1998. Вып. 1. С. 11-39.
8. Полякова М.В. Связь неравномерности поля температуры газа на выходе из кольцевых камер сгорания

- ГТД с потерями полного давления в них // Труды ЦИАМ: Сборник трудов. 1982. № 987. С. 10-15.
9. Полякова М.В. Статистический анализ и обобщенные зависимости неравномерности полей температуры газа перед турбиной от основных параметров камер сгорания ГТД // Труды ЦИАМ. 1980. № 891. С. 44-51.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.
11. Агульник А.Б., Онищик И.И., Хмай Т.М. Эффективность работы камеры сгорания в составе турбореактивного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. №2. С. 65-71.

SMALL GAS TURBINE ENGINES COMBUSTION CHAMBERS GEOMETRIC RESIZING AND INTEGRAL PARAMETERS CHANGING TRENDS

Lanskii A.M. *, Lukachev S.V. **, Kolomzarov O.V. ***

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev
(National Research University),
SSAU, 34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

* e-mail: amlansky@mail.com

** e-mail: lukachev@mail.com

*** e-mail: kolomzarov@gmail.com

Abstract

The article considers the development of small gas turbine engine combustion chamber draft design. Though it occupies relatively short period of time, it is an extremely important element in reference to the engine lifecycle period. The draft design results allow obtain all necessary information about both the combustion chamber as a whole and its constituent parts.

The small-sized gas turbine engine combustion chamber draft design allows determine its shape and the features of its embodiment. Geometry selection and integrated parameters evaluation with account for turbocharger components composite action is important due to incomplete information on these matters.

The paper presents the results of the statistical data processing of geometric parameters and integral characteristics of the GTE combustion chambers. Complex correlation functions were obtained by methods of mathematical statistics. Correlation functions describe the structure and geometry: primary zone operating parameters and combustion chamber integral characteristics such as: flame tube volume (VFT), relative length of flame tube (LFT/VFT), nozzles relative pitch, combustion efficiency, residence time, forcing coefficient (K_V), thermal factor (Q_{VP}) and relative areas of internal and external channels. Changing of the abovementioned values depends on consumable complex (G_{CC}). Table below presents results of the statistical data processing. Most coefficient of determination values lay within the range of 0.06 to 0.7.

Not all of the dependencies have high coefficients of determination. However, this does not exclude the possibility of their use in the preliminary assessment of

the gas turbine engine combustion chambers structural and integral parameters.

Keywords: small-sized gas turbine engine, combustion chamber, construction and geometric sizes, integral parameters, correlation and regression dependencies, draft design.

References

1. Gorbunov G.M. *Vybor parametrov i raschet osnovnykh kamer sgoraniya GTD* (The main turbine engine combustion chambers parameters selection and computation), Moscow, MAI, 1972, 231 p.
2. Shlyakhtenko S.M., Akimov V.M., Bakulev V.I., Gorbunov G.M. *Teoriya vozdushno-reaktivnykh dvigatelei* (Theory of jet engines), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 568 p.
3. Mingazov B.G. *Vnutrikamernye protsessy i avtomatizirovannaya dovodka kamer sgoraniya GTD* (Intra-chamber processes and automated engineering follow-up of GTE combustion chambers), Kazan, KGTU, 2000, 168 p.
4. Lanskii A.M., Lukachev S.V., Matveev S.G. *Rabochii protsess kamer sgoraniya malorazmernykh GTD* (The workflow of small gas turbine engine combustion chambers), 2009, Samara, SNTs RAN, 335 p.
5. Grigor'ev A.V., Mitrofanov V.A., Rusakov O.A. *Teoriya kamer sgoraniya* (The theory of combustion chambers), Sankt-Peterburg, Nauka, 2010, 328 p.
6. Rudakov O.A., Sarkisov A.A., Silivon N.D. *Konstruktsiya, teoriya i raschet kamer sgoraniya gazoturbinykh dvigatelei* (Design, theory and calculation of gas turbine engines combustion chambers), Sankt-Peterburg, SPbGTU, 1993, 170 p.

Regression dependence of the constructive dimensions and integral parameters of GTE combustion chambers

Parameter	Function	The coefficient of determination, R^2	Fisher's criterion	
			F	F_{tab}
V_{FT}, m^3	$V_{FT} = 0,08G_{cc}^{1,16}$	0,95	228,00	4,08
$\frac{L_{FT}}{H_{FT}}$	$\frac{L_{FT}}{H_{FT}} = 3,256G_{cc}^{0,1}$	0,19	1,72	4,23
\bar{t}_{noz}	$\bar{t}_{noz} = 0,25G_{cc}^{-0,64}$	0,77	15,62	4,41
D_{burn}, m	$D_{burn} = 0,065G_{cc}^{0,46}$	0,91	53,93	4,35
α_{fr}	$\alpha_{fr} = 0,8G_{cc}^{0,1}$	0,35	1,62	4,67
$\frac{\sum F_{hole}}{F_{FT}}$	$\frac{\sum F_{hole}}{F_{FT}} = 0,288G_{cc}^{0,035}$	0,058	0,39	4,28
$\frac{F_{chan}^{out}}{\sum F_{hole}}$	$\frac{F_{chan}^{out}}{\sum F_{hole}} = 0,73G_{cc}^{-0,23}$	0,63	7,38	4,45
$\frac{F_{chan}^{int}}{\sum F_{hole}}$	$\frac{F_{chan}^{int}}{\sum F_{hole}} = 0,052G_{cc} + 0,5$	0,043	0,19	4,45
$K_V, \frac{kg}{kPa^{1,25} \cdot K \cdot m^3 \cdot s}$	$K_V = 1,05G_{cc}^{-0,46}$	0,66	14,24	4,23
τ_{stay}, s	$\tau_{stay} = 0,00969G_{cc}^{0,185}$	0,26	2,58	4,23
$Q_{vp}, \frac{kW}{m^3 \cdot Pa}$	$Q_{vp} = 0,39G_{cc}^{-0,29}$	0,6	11,50	4,21

7. Lukachev V.P., Lanskii A.M., Abrashkin V.Yu., Didenko A.A., Zubkov P.G., Kovylov Yu.L., Matveev S.G., Tsyganov A.M., Shamban M.A., Yakovlev V.A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva. Seriya: Protssesy gorennya, teploobmena i ekologii teplovykh dvigatelei*, 1998, no. 1, pp. 11-39.
8. Polyakova M.V. *Trudy TsIAM*, 1982, no. 987, pp.10-15.
9. Polyakova M.V. *Trudy TsIAM*, 1980, no. 891, pp. 44-51.
10. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied mathematical statistics), Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p.
11. Agul'nik A.B., Onishchik I.I., Khtai T.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 65-71.