

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛНОТНЫХ И СРЫВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Алексей Борисович АГУЛЬНИК родился в 1956 г. в городе Москве. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области интеграции самолетов и двигателей, математического моделирования работы двигателей и их узлов. Автор более 40 научных работ. E-mail: agulnik@mai.ru

Alexei B. AGOULNIK, D.Sci., was born in 1956. in Moscow. He is a Head of a department at the MAI. His research interests are in integration of airplanes and engines, mathematical model of working process of engines and their components. He has published more than 40 technical papers. E-mail: agulnik@mai.ru

Иван Иванович ОНИЩИК родился в 1934 г. в городе Бресте Белорусской ССР. Профессор МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы — в области газотурбинных двигателей, камер сгорания. Автор более 70 научных работ. E-mail: agulnik@mai.ru

Ivan I. ONISHCHIK, Ph.D., was born in 1934, in Brest, Belorussia. He is a Professor at the MAI. His research interests are in gas-turbine engines, combustion chamber. He has published more than 70 technical papers. E-mail: agulnik@mai.ru

Тин Маунг ХТАЙ родился в 1978 г. в городе Мона, Мьянма. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области газотурбинных двигателей, камер сгорания. Автор трех научных работ. E-mail: tinmaunghtay377@gmail.com

Tin Maung HTAY was born in 1978, in Monywa, Myanmar. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in gas-turbine engines, combustion chamber. He has published 3 technical papers. E-mail: tinmaunghtay377@gmail.com

Приводятся полуэмпирические алгоритмы расчета полнотных и срывных характеристик типичной камеры сгорания ТРД (рис. 1), базирующиеся на обобщении экспериментальных данных, приведенных в научно-технической литературе. В алгоритмах используются относительные параметры камеры сгорания, не связанные с ее абсолютными размерами. Даны результаты расчетного анализа влияния некоторых конструктивных параметров камеры и режимов работы на ее характеристики.

This is the result of semi-empirical algorithms calculation of combustion efficiency and stalling characteristics of the typical combustion chamber of Jet engine (pic. 1), based on generalization of the experimental data resulted in the scientific and technical literature. In algorithms use relative parameters of combustion chamber which have been not connected with its absolute sizes are used. This results of the settlement analysis of influence of some design data of the chamber and operating modes on its characteristics.

Ключевые слова: камера сгорания, характеристики, полнота сгорания, диапазон устойчивого горения, коэффициент избытка воздуха, полуэмпирическая модель.

Key words: combustion chamber, characteristics, combustion efficiency, range of steady-state combustion, excess air factor, semi-elliptical model.

Условные обозначения

h, L — высота сечения, продольный размер, м;
 D — диаметр, м;
 F_i — площадь отверстий в стенках части i жаровой трубы, м²;
 V — объем, м³;
 G — массовый расход, кг/с;
 Q — объемный расход, м³/с;
 T — температура торможения, К;
 p — давление торможения, Па;

F_k, h_k — площадь сечения на входе в камеру сгорания (на выходе из компрессора), м², и его высота, м;
 F_o — суммарная площадь отверстий в стенках жаровой трубы, м²;
 $F_{ж}$ — площадь поперечного сечения жаровой трубы, м²;
 $F_{3н}$ — суммарная площадь, рассчитанная по наружным диаметрам завихрителей $D_{3н}$, м²;
 V_k — объем жаровой трубы, м³;

α_K — коэффициент избытка воздуха в камере сгорания;

λ_K — приведенная скорость на входе в диффузор камеры сгорания;

$Q_{вр}, K_V$ — удельная теплонапряженность и параметр форсирования камеры сгорания;

$\Delta\theta_\Gamma$ — максимальная неравномерность поля температур газа в выходном сечении камеры сгорания;

τ_K — условное время пребывания газа в камере сгорания;

η_Γ — коэффициент полноты сгорания топлива;

$\bar{F}_{охл.т}$ — относительный расход воздуха на охлаждение турбины;

$\alpha_{max}, \alpha_{min}$ — коэффициенты избытка воздуха при срыве горения при обеднении и обогащении смеси соответственно;

$\alpha_{K0} = 1,7$ — значение коэффициента избытка воздуха в сечении камеры, где заканчивается горение;

$L_0 = 14,8$ — стехиометрический коэффициент;

$R = 287$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная;

$k = 1,4$ — показатель адиабаты;

$c_{пр} = 1,1$ кДж/(кг·К) — средняя теплоемкость газа;

$H_u = 43000$ кДж/кг — удельная теплота сгорания топлива;

$\eta_{г.и} = 0,98$ коэффициент полноты сгорания, принятый при расчетах «идеальной» температуры;

$\mu = 0,75$ — коэффициент расхода отверстий.

Относительные параметры

$$\bar{V}_K = V_K / F_K; \bar{F}_o = F_o / F_K; \bar{V}_1 = V_1 / V_K; \bar{F}_ж = F_ж / F_K;$$

$$\bar{h}_ж = h_ж / h_K; \bar{F}_{зн} = F_{зн} / F_ж; \bar{F}_1 = \bar{F}_{фр} + 0,5\bar{F}_{охл.г};$$

$$\bar{F}_{фр1} = \bar{F}_{фр} / \bar{F}_\Gamma; f = D_ж / D_K; \bar{F}_i = F_i / F_o;$$

$$\bar{L}_i = L_i / h_ж; \bar{F}_{зс} = 1 - \bar{F}_\Gamma - \bar{F}_{охл.гс}.$$

Индексы

к — камера сгорания, ее входное сечение;

гс — газосборник;

о — отверстия, расчетный режим;

охл — охлаждение;

ж — жаровая труба;

т — топливо, турбина;

1 — первичная зона камеры;

2 — вторичная зона камеры;

кр — критический;

пр — предельный;

г — зона горения, газ;

фр — фронтное устройство;

зс — зона смешения;

и — «идеальный»;

Введение

Работа камеры сгорания описывается целым рядом характеристик, среди которых важнейшими являются полнотные и срывные характеристики, так как они непосредственно влияют на работоспособность и экономичность двигателя. Эти характеристики, как правило, определяются экспериментально. Имеются попытки их расчета исходя из детального анализа рабочих процессов, происходящих в камере [1], однако это приводит к весьма сложным алгоритмам, базирующимся на большом количестве экспериментальных данных, получаемых с ограниченной точностью. Весьма сложной является задача расчета характеристик камеры сгорания на базе моделей высокого уровня турбулентных течений. Поэтому, на наш взгляд, целесообразной является разработка полуэмпирических моделей характеристик камер сгорания, основанная на обобщении экспериментальных данных. В статье представлены полуэмпирические модели полнотных и срывных характеристик камеры сгорания, базирующиеся на обобщении результатов, полученных в Казанском техническом университете [1, 2], и в ЦИАМ [3]. Принципы обобщения представлены в работах [3, 4]. Естественно, что данные модели применимы только к кольцевым камерам сгорания, близким по конструкции к исследованным образцам (рис. 1). Фронтные устройства камер состоят из лопаточных завихрителей, 2-канальных центробежных форсунок и цилиндрических патрубков, в которых происходит подготовка топливовоздушной смеси. Вторичный и смесительный воздух подводится в жаровую трубу через два пояса отверстий, охлаждающий воздух — через систему щелей или выштамповок тангенциально стенкам.

С целью обеспечения большей общности результатов и удобства расчетов в алгоритмах используются, в основном, относительные величины. Так, относительный объем жаровой трубы \bar{V}_K может быть определен через величину удельной теплонапряженности камеры $Q_{вр}$ или условного времени пребывания смеси в жаровой трубе τ_K на расчетном (обычно взлетном) режиме двигателя:

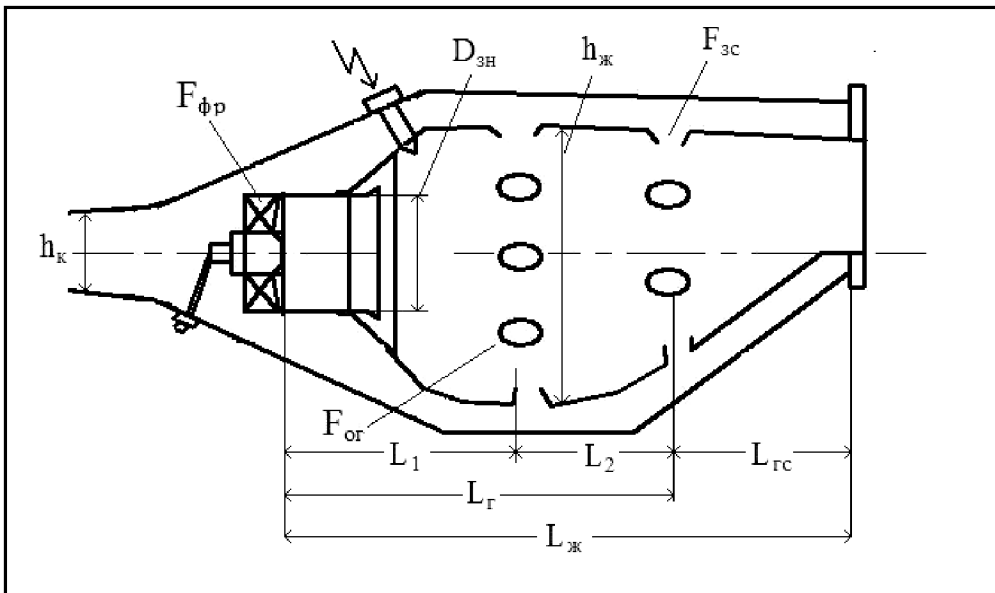


Рис. 1. Схема камеры сгорания ГТД

$$Q_{vp} = \frac{3600G_{т}H_u\eta_{г}}{V_{к}p_{к}}; \tau_{к} = V_{к} / Q_{к}.$$

В выполненных камерах сгорания эти величины изменяются в следующих пределах: $Q_{vp} = 1 \cdot 10^3 \div 6 \cdot 10^3$ кДж/(м³·ч·Па), $\tau_{к} = 0,005 \div 0,015$ с. Выразив расход топлива $G_{т}$ через коэффициент избытка воздуха $\alpha_{к}$ и его расход, а последний через площадь входа в диффузор камеры и параметры потока в нем получим:

$$\bar{V}_{к} = \frac{3600H_u\eta_{г}\lambda_{к}}{Q_{vp}\alpha_{к}L_0} \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_{к}} = \tau_{к}\lambda_{к}\sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_{к}}$$

$$\text{или } \bar{V}_{к} = 6,65 \cdot 10^5 \frac{\lambda_{к}\eta_{г}}{Q_{vp}\alpha_{к}\sqrt{T_{к}}} = 18,3\tau_{к}\lambda_{к}\sqrt{T_{к}}. \quad (1)$$

Параметр форсирования камеры сгорания может быть выражен следующим образом:

$$K_V = 1,735 \cdot 10^6 \frac{G_b}{p_{к}^{1,25}T_{к}V_{к}} =$$

$$= 1,735 \cdot 10^6 \frac{\lambda_{к}}{\bar{V}_{к}p_{к}^{0,25}T_{к}^{1,5}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}R}$$

$$\text{или } K_V = 1,1 \cdot 10^5 \frac{\lambda_{к}}{\bar{V}_{к}p_{к}^{0,25}T_{к}^{1,5}}.$$

По конструктивным параметрам исследованной камеры сгорания была получена приближенная формула, связывающая высоту сечения жаровой

трубы $h_{ж}$ с ее объемом и относительными продольными размерами характерных зон:

$$h_{ж} = \sqrt{\frac{V_{к}}{f \cdot \pi \cdot D_{к}(0,4\bar{L}_1 + \bar{L}_2 + 0,7\bar{L}_{гс})}}.$$

Умножив и разделив подкоренное выражение на $h_{к}$, получим:

$$\frac{h_{ж}}{\sqrt{h_{к}}} = \sqrt{\frac{\bar{V}_{к}}{f(0,4\bar{L}_1 + \bar{L}_2 + 0,7\bar{L}_{гс})}} = A.$$

Для нахождения относительной площади поперечного сечения жаровой трубы $\bar{F}_{ж}$ необходимо задать значение $h_{к}$, так как соотношение между линейным размером, площадью и объемом зависит от абсолютного размера камеры (обычно $h_{к} = 0,025 \div 0,05$ м). Тогда получим

$$\bar{h}_{ж} = A/\sqrt{h_{к}}; \bar{F}_{ж} = \bar{h}_{ж} \cdot f; \bar{V}_1 = \frac{0,4f\bar{h}_{ж}^2 \cdot \bar{L}_1 h_{к}}{\bar{V}_{к}}. \quad (2)$$

В остальном конструкция камеры сгорания определяется принятыми значениями относительных параметров.

1. Алгоритмы расчетов

Исходными данными являются: значения относительных параметров $\bar{V}_{к}, \bar{L}_1, \bar{L}_2, \bar{L}_{гс}, \bar{F}_{г}, \bar{F}_1, \bar{F}_{охл.гс}, f, \bar{F}_{ж}, \bar{F}_{охл.гт}, \bar{F}_{зс}, \bar{F}_{охл}, \bar{F}_{зн}, \bar{V}_1$ и величина $h_{к}$, параметры режима $p_{к}, T_{к}, \lambda_{к}, \alpha_{к}$.

Величины \bar{V}_k , $\bar{F}_ж$, \bar{V}_1 могут быть определены по формулам (1) и (2), если задать значения $Q_{вр}$ (или τ_k) и параметры расчетного режима двигателя (обычно взлетный режим) T_{k0} , λ_{k0} , α_{k0} , η_{k0} .

1.1 Коэффициент полноты сгорания топлива

Определяются:

а) характерные значения коэффициента избытка воздуха:

$$\alpha_{кг} = \alpha_{k0} / \bar{F}_Г; \quad \alpha_{к1} = \alpha_{k0} / \bar{F}_1; \quad \alpha_{k0} = 1,7;$$

$$a = 1,5(\alpha_{к1} - \alpha_{кг}) + \alpha_{кг};$$

если $\alpha_k > a$, то принять $\alpha_{ка} = a$, иначе $\alpha_{ка} = \alpha_k$;

$$\alpha_{отн} = (\alpha_{ка} - \alpha_{кг}) / (\alpha_{к1} - \alpha_{кг});$$

б) значение «идеальной» температуры газа на выходе из камеры сгорания:

$$T_{ги} = T_k + \frac{H_u \eta_{ги}}{(\alpha_{ка} L_0 + 1) c_{пр}} = T_k + \frac{3,82 \cdot 10^4}{14,8 \alpha_{ка} + 1};$$

в) значение относительного импульса воздуха в отверстиях зоны смешения:

$$I_{отв} = \frac{\bar{F}_{зс} \bar{F}_ж T_k}{(1 - \bar{F}_{охл.гс} - \bar{F}_{охл.т}) \mu \bar{F}_о T_{ги}};$$

г) величина максимальной неравномерности поля температур газа в выходном сечении:

$$\Delta\theta_\Gamma =$$

$$= \left[\frac{\bar{F}_{зс}}{(1 - \bar{F}_{зс} - \bar{F}_{охл.гс})} + 1 \right] \frac{1 - \bar{F}_{охл.т}}{1,05 - \bar{F}_{охл.гс} - \bar{F}_{охл.т}} f_1 - 1;$$

$$n = 1,67 + 0,1 \bar{L}_{гс};$$

если $\bar{F}_о > 1,7$, то $f_1 = 1 + 0,25(\bar{F}_о - 1,7)$, иначе $f_1 = 1$.

Поскольку формула для $\Delta\theta_\Gamma$ получена в результате обобщения экспериментальных данных по камерам сгорания, то целесообразно ввести ограничения: если $\Delta\theta_\Gamma > 1$, то принять $\Delta\theta_\Gamma = 1$; если $\Delta\theta_\Gamma < 0,2$, то принять $\Delta\theta_\Gamma = 0,2$;

д) максимальное и минимальное значения «идеальной» температуры:

$$T_{max} = T_{ги} + \Delta\theta_\Gamma (T_{ги} - T_k);$$

$$T_{min} = T_{ги} - \Delta\theta_\Gamma (T_{ги} - T_k);$$

е) значения критической температуры:

$$T_{кр} = \theta_{отн} (T_{кг} - T_{кф}) + T_{кф};$$

$$T_{кг} = T_{кр0} \bar{F}_Г + T_k (1 - \bar{F}_Г); \quad T_{кф} = T_{кр0} \bar{F}_1 + T_k (1 - \bar{F}_1);$$

$$T_{кр0} = 1,4 \cdot 10^8 / p_k^{0,04};$$

$$\theta_{отн} = 0,4655 \alpha_{отн}^4 - 1,9069 \alpha_{отн}^3 + 3,1369 \alpha_{отн}^2 - 2,7377 \alpha_{отн} + 1,1913;$$

если $T_{кр} > T_{кр0}$, то $T_{кр} = T_{кр0}$;

ж) значение предельной температуры:

$$T_{пр} = T_k + \frac{H_u \eta_{ги}}{c_{пр} (1,1 L_0 + 1)} = T_k + 2220;$$

з) значение коэффициента неравномерности η_d :

$$\eta_d = (\bar{G}_{пр}^2 - \bar{G}_{кр}^2) \cdot \Delta\theta_\Gamma + (\bar{G}_{пр} - \bar{G}_{кр}) (1 - \Delta\theta_\Gamma) + (1 - \bar{G}_{пр}) \frac{T_{пр} - T_k}{T_{ги} - T_k};$$

если $T_{пр} \geq T_{max}$, то $\bar{G}_{пр} = 1$, иначе

$$\bar{G}_{пр} = (T_{пр} - T_{min}) / (T_{max} - T_{min});$$

если $T_{кр} \leq T_{min}$, то $\bar{G}_{кр} = 0$, иначе

$$\bar{G}_{кр} = (T_{кр} - T_{min}) / (T_{max} - T_{min});$$

и) значение коэффициента объема η_V :

$$\eta_V = 1 - 0,8 K_V^2;$$

$$K_V = 1,1 \cdot 10^5 \frac{\lambda_k}{\bar{V}_{кр0,25} T_k^{1,5}};$$

к) значение коэффициент полноты сгорания топлива:

$$\eta_\Gamma = \eta_V \cdot \eta_d.$$

1.2 Коэффициенты избытка воздуха при «срыве» горения в камере

Определяются:

а) значение средней скорости воздуха в зоне горения при холодной продувке:

$$C_{жх} = \frac{\lambda_k \bar{F}_Г}{\bar{F}_ж} \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_k} = 18,3 \frac{\lambda_k \bar{F}_Г \sqrt{T_k}}{\bar{F}_ж};$$

б) значение коэффициента смесеобразования k_T :

$$b = 14 - 2,35((T_K/100) - 3,5);$$

если $C_{жх} \geq b$, то $k_T = 1$, иначе

$$k_T = (0,07 + 0,017((T_K/100) - 3,5))C_{жх};$$

в) значение логарифма коэффициента стабилизации k_c :

$$\log k_c = 1,046 - 4,482 \bar{F}_{фр1};$$

г) значение логарифма параметра форсирования зоны стабилизации k_p :

$$\log k_p = \log \left(\frac{\bar{F}_{фр} 10^{10} \lambda_k}{29 \bar{V}_1 \bar{V}_k \bar{F}_{зн} p_k} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT_k}} \right) + \log k_c =$$

$$= \log \left(2,19 \cdot 10^7 \frac{\bar{F}_{фр} \lambda_k}{\bar{V}_1 \bar{V}_k \bar{F}_{зн} p_k T_k^{0,5}} \right) + \log k_c;$$

д) значение коэффициента избытка воздуха в зоне стабилизации при «бедном» срыве горения:

$$\alpha_{\max ф} = 1,8 - 2[0,47 + 0,06(T_K/100) - 2] \times$$

$$\times [\log k_p - 1,4(0,2 + 0,275((T_K/100) - 2))];$$

е) значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания при «бедном» срыве горения:

$$\alpha_{\max к} = \frac{\alpha_{\max ф} k_T}{\bar{F}_{фр}};$$

ж) значение коэффициента избытка воздуха в камере сгорания при «богатом» срыве горения:

$$\alpha_{\min к} = 128 \frac{\lambda_k}{f h_{ж}^{-1,5} h_k^{0,5} T_k^{0,5}}.$$

2. Влияние параметров камеры сгорания на ее характеристики

Изложенные алгоритмы расчета позволяют проанализировать влияние изменения отдельных параметров камеры сгорания на полноту сгорания топлива и диапазон устойчивого горения при сохранении остальных параметров неизменными. На практике при экспериментальных исследованиях осуществить это не просто, так как для этого необходимо, как правило, многократно изменять конструкцию всей жаровой трубы. Например, при изменении площади отверстий зоны смешения (при частичном их перекрытии или рассверливании) одно-

временно изменяются суммарная площадь отверстий, распределение воздуха между зонами горения и смешения, относительный расход воздуха через фронтное устройство и другие параметры. Поэтому для обеспечения «чистоты» эксперимента потребовалось бы вносить изменения и в другие элементы камеры сгорания. Анализ влияния отдельных параметров может представлять интерес как при выборе конструктивных параметров камеры при ее проектировании, так и при анализе влияния характеристик камеры на рабочий процесс двигателя в целом.

При расчетах предполагалось:

— продольные размеры первичной и вторичной зон горения одинаковы, поэтому

$$\bar{L}_1 = \bar{L}_2 = \bar{L}_r / 2 = \frac{\bar{L}_ж - \bar{L}_{гс}}{2};$$

— охлаждающий воздух распределен равномерно по длине жаровой трубы, так что

$$\bar{F}_{охл гс} = \frac{\bar{F}_{охл} \bar{L}_{гс}}{\bar{L}_ж}; \quad \bar{F}_1 = \bar{F}_{фр} + \frac{1}{4} \frac{\bar{F}_{охл} (\bar{L}_ж - \bar{L}_{гс})}{\bar{L}_ж}.$$

Параметры исследованных вариантов камер сгорания представлены в таблице. Варьирование их производилось в пределах, характерных для современных двигателей. Параметры близки к параметрам камер, на обобщении результатов исследования которых базируются представленные алгоритмы расчетов [1–4].

№ вар.	\bar{F}_r	$\bar{F}_{фр}$	$\bar{L}_{гс}$	$\bar{L}_ж$	$\bar{F}_{охл}$	\bar{F}_o
1	0,6	0,1	0,7	2	0,25	1,5
2	0,5	-	-	-	-	-
3	0,4	-	-	-	-	-
4	0,7	-	-	-	-	-
5	0,6	0,08	-	-	-	-
6	-	0,12	-	-	-	-
7	-	0,15	-	-	-	-
8	-	0,1	0,4	1,7	-	-
9	-	-	1	2,3	-	-
10	-	-	0,7	2	0,2	-
11	-	-	-	-	0,3	-
12	-	-	-	-	0,25	1
13	-	-	-	-	-	2
14	-	-	-	-	-	1,5

Расчетный режим, для которого по принятой величине удельной теплонапряженности Q_{vp} определялся относительный объем жаровой трубы, характеризовался следующими параметрами: $T_{к0} = 528 \text{ K}$; $\lambda_{к0} = 0,27$; $\alpha_{к0} = 3$; $\eta_{г0} = 0,98$. Высота h_k была принята равной 0,03 м.

Расчеты проводились, главным образом, при пониженных значениях p_k и T_k (приблизительно соответствующих режимам малого газа ТРД), так как в этом случае более отчетливо проявляется влияние отдельных параметров камеры сгорания на ее характеристики.

На рис. 2 представлены результаты расчетов, полученные при изменении относительной площади отверстий \bar{F}_r зоны горения при сохранении неизменными остальных параметров камеры сгорания (см. таблицу, варианты 1—4). Как видно, с увеличением \bar{F}_r (увеличением подвода воздуха в зону горения за счет увеличения площади основных отверстий) повышается полнота сгорания топлива на богатых смесях ($\alpha_k \leq 2,5$) и снижается — на бедных ($\alpha_k \geq 4$). Это объясняется тем, что наиболее благоприятные для горения составы смеси ($\alpha = 1,2 \div 1,5$) с увеличением подачи воздуха в зону горения реализуются в ней при все большем общем обогащении смеси в камере сгорания.

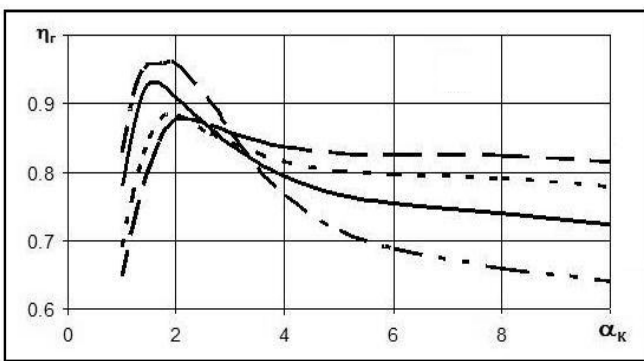


Рис. 2. Изменение значения η_r в зависимости от α_k :
 $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,1$; $T_k = 500$ К; $p_k = 100$ кПа;
 - - - - $\bar{F}_r = 0,4$; - - - - $\bar{F}_r = 0,5$;
 ——— $\bar{F}_r = 0,6$; - - - - $\bar{F}_r = 0,7$

С увеличением \bar{F}_r несколько снижается диапазон устойчивого горения при обеднении смеси (уменьшаются значения α_{max} с 22 при $\bar{F}_r = 0,4$ до 16 при $\bar{F}_r = 0,7$). Вызывается это тем, что с увеличением подачи воздуха через основные отверстия зоны горения уменьшаются размеры циркуляционной зоны и интенсифицируются в ней процессы массообмена (увеличивается форсировка зоны стабилизации).

Значения α_{min} сохраняются неизменными ($\alpha_{\text{min}} \approx 1$), так как при «богатом» срыве горение

происходит во всем объеме камеры сгорания и перераспределение воздуха в ней практически не влияет на процесс стабилизации.

Увеличение расхода воздуха через фронтное устройство (увеличение $\bar{F}_{\text{фр}}$, таблица, вар. 1, 5—7) оказывает на характеристики камеры сгорания приблизительно такое же влияние, как и увеличение \bar{F}_r (рис. 3): полнота сгорания на бедных смесях снижается, так как смесь в первичной зоне обедняется и интенсивность ее сгорания на струях вторичного воздуха уменьшается. Однако на богатых смесях значения η_r изменяются незначительно, так как состав смеси во всей зоне горения изменяется слабо.

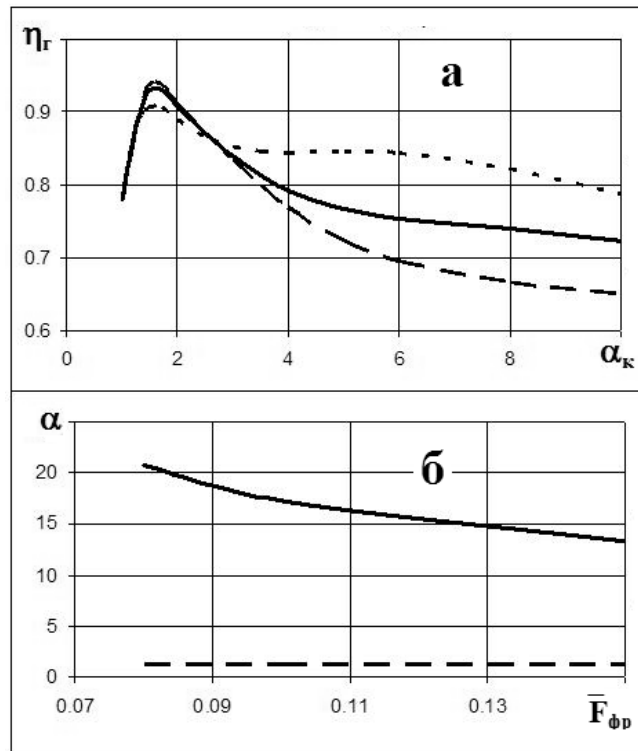


Рис. 3. Изменение η_r в зависимости от α_k (а);

α_{max} и α_{min} в зависимости от $\bar{F}_{\text{фр}}$ (б)
 ($\bar{F}_r = 0,6$; $T_k = 500$ К; $p_k = 100$ кПа):
 а - - - - $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,15$; ——— $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,1$;
 - - - - $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,08$;
 б ——— α_{max} ; - - - - α_{min}

При увеличении $\bar{F}_{\text{фр}}$ заметно ухудшается характеристика по «бедному» срыву. Это объясняется увеличением расхода воздуха в циркуляционную зону и, следовательно, разбавлением смеси в ней. Значения α_{min} практически не изменяются.

Снижение удельной теплонапряженности камеры сгорания (вар. 1) приводит к росту полноты сгорания топлива (рис. 4), так как при этом увеличи-

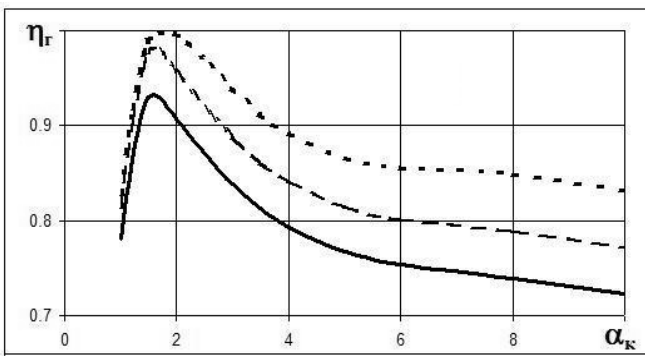


Рис. 4. Изменение $\eta_{\text{г}}$ в зависимости от $\alpha_{\text{к}}$ ($\bar{F}_{\text{г}} = 0,6$; $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,1$; $T_{\text{к}} = 500 \text{ К}$; $p_{\text{к}} = 100 \text{ кПа}$):
 - - - - - $Q_{\text{вп}} = 1000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$;
 - - - - - $Q_{\text{вп}} = 2000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$;
 ——— $Q_{\text{вп}} = 4000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$

валяется время пребывания смеси в камере: значения $\tau_{\text{к}}$ увеличиваются от 0,0056 до 0,0225 с при уменьшении $Q_{\text{вп}}$ от 4000 до 1000 кДж/(м³·Па·ч). Это способствует более полному завершению химических реакций горения.

Значения α_{max} изменяются слабо. Они достигают максимальных значений при $Q_{\text{вп}} \approx 2000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$ ($\alpha_{\text{max}} \approx 22$) и снижаются до значений 17–20 при увеличении $Q_{\text{вп}}$ из-за роста форсирования циркуляционной зоны вследствие увеличения скоростей в камере, а при уменьшении величин $Q_{\text{вп}}$ — из-за ухудшения по этой же причине смесиобразования.

Значения α_{min} с уменьшением $Q_{\text{вп}}$ понижаются, так как снижение скоростей способствует лучшей стабилизации горения.

Увеличение температуры $T_{\text{к}}$ и давления $p_{\text{к}}$ на входе в камеру сгорания (вар. 1) способствует существенному ускорению химических реакций горения, что приводит к росту коэффициента полноты сгорания топлива и расширению диапазона устойчивого горения в камере сгорания (рис. 5 и 6).

Изменение длины газосборника ($\bar{L}_{\text{гс}} = 0,4 \div 1,0$, таблица, вар. 1, 8, 9), площади отверстий системы охлаждения ($\bar{F}_{\text{охл}} = 0,2 \div 0,3$, таблица, вар. 1, 10, 11), суммарной площади отверстий в стенках жаровой трубы ($\bar{F}_{\text{о}} = 1 \div 2$, таблица, вар. 1, 13, 14) не оказывает заметного влияния ни на полноту сгорания топлива, ни на диапазон устойчивого горения.

Приведенные данные согласуются с известными из практики разработки и испытаний тенденциями влияния конструктивных параметров камер сгорания на их характеристики, что свидетельствует

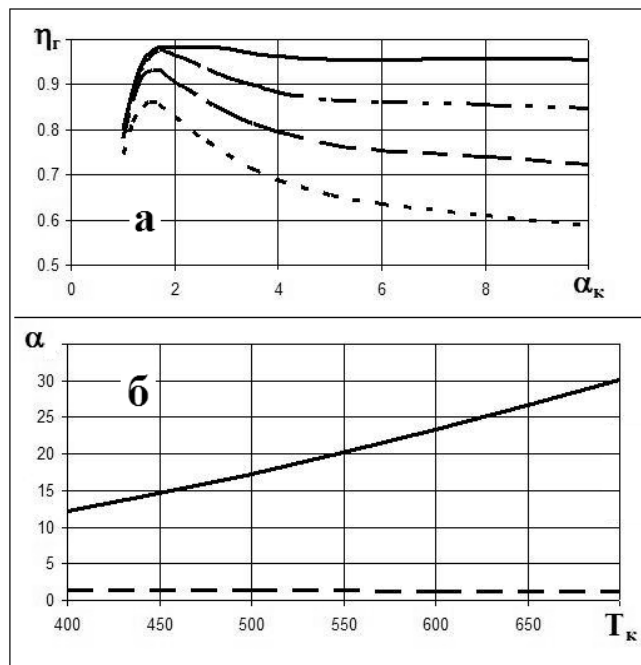


Рис. 5. Изменение $\eta_{\text{г}}$ в зависимости от $\alpha_{\text{к}}$ (а); α_{max} и α_{min} — в зависимости от $T_{\text{к}}$ (б) ($\bar{F}_{\text{г}} = 0,6$; $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,1$; $Q_{\text{вп}} = 4000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$; $p_{\text{к}} = 100 \text{ кПа}$):
 а - - - - $T_{\text{к}} = 400 \text{ К}$; - - - - $T_{\text{к}} = 500$;
 - - - - $T_{\text{к}} = 600$; ——— $T_{\text{к}} = 700$;
 б ——— α_{max} ; - - - - α_{min}

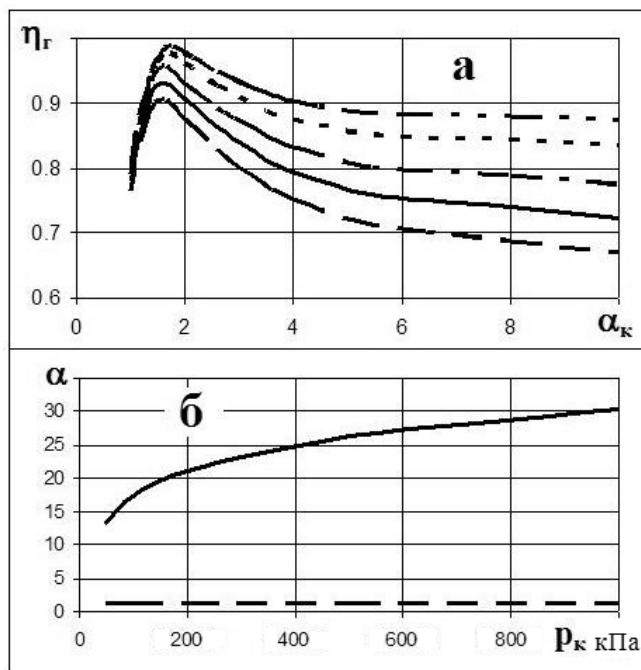


Рис. 6. Изменение $\eta_{\text{г}}$ в зависимости от $\alpha_{\text{к}}$ (а); α_{max} и α_{min} — в зависимости от $p_{\text{к}}$ (б) ($\bar{F}_{\text{г}} = 0,6$; $\bar{F}_{\text{фр}} = 0,1$; $Q_{\text{вп}} = 4000 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{ч})$; $T_{\text{к}} = 500 \text{ К}$):
 а - - - - $p_{\text{к}} = 1000 \text{ кПа}$; - - - - $p_{\text{к}} = 500$;
 - - - - $p_{\text{к}} = 200$; ——— $p_{\text{к}} = 100$; - - - - $p_{\text{к}} = 50$
 б ——— α_{max} ; - - - - α_{min}

о достаточно адекватном отображении в разработанных алгоритмах основных особенностей рабочего процесса камер сгорания, исследованной конструкции и о возможности применения данных алгоритмов для предварительной оценки полнотных и срывных характеристик при проектировании и исследовании камер сгорания и двигателей.

Выводы

1. На основе обобщения экспериментально определенных полнотных и срывных характеристик камеры сгорания ТРД разработаны полуэмпирические математические модели указанных характеристик для камер сгорания исследованного типа.

2. В данных моделях использованы относительные параметры, практически не связанные с абсолютными размерами камеры, что делает удобным применение моделей к камерам сгорания различной размерности.

3. Проведенный с использованием разработанных математических моделей расчетный анализ показал, что модели адекватно отражают влияние конструктивных и режимных параметров камер сгорания на их характеристики.

Библиографический список

1. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004.

2. Варфоломеев В.С., Мингазов Б.Г., Дехтяренко А.Д., Дятлов И.Н. Экспериментальное исследование стабилизации пламени в камере сгорания ГТД // Процессы в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей: Межвузовский сборник. Казань, 1986.

3. Бортников М.Т. Стабилизация процесса горения в камерах сгорания // Труды ЦИАМ. 1974. №613.

4. Агульник А.Б., Онищик И.И., Тин Маунг Хтай. Учет неравномерности температур газа в выходном сечении камер сгорания ГТД при обобщении их характеристик по полноте сгорания топлива // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. №1. С. 36—39.

5. Тин Маунг Тхей. Обобщение срывных характеристик камеры сгорания ГТД // Тезисы докладов XIII Всероссийской Межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». Москва, 2008. С.112-113.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 16.11.2009