

Ю. М. Пчелкин, В. П. Лебедев,
Е. Е. Гончаренко, Н. М. Елисеева,
Г. И. Живов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ ПЕРВИЧНОМ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ПОДОГРЕВЕ ГАЗОВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ И МИКРОФАКЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Задача корректной оценки теплового совершенства микрофакельных топливосжигающих систем требует учета возможных продуктов недожога топлива. Широко используемые в теплотехнике уравнения теплового баланса камер сгорания в части, касающейся расчетной оценки энтальпии продуктов сгорания, априорно формировались в предположении 100 %-ного выгорания топлива. Это обстоятельство вызывает необходимость более строгого составления балансовых уравнений. Поэтому в данной работе приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований полноты выгорания топлива в зависимости от режимных и конструктивных параметров апробированной системы основной и дополнительной газотурбинных камер сгорания с микрофакельными элементами.

В комплексе мероприятий, совершенствующих простейший термодинамический цикл газотурбинных установок и двигателей (ГТУ и ГТД), используется промежуточный подогрев газов [1].

В любом случае анализ качества горения топлива во втором после основной камеры сгорания (ОКС) топливосжигающем устройстве (ТСУ) требует особого рассмотрения [2]. В частности, оценка полноты горения топлива в камере сгорания промежуточного (дополнительного) подогрева газов (КСППГ), или микрофакельной системе (МФС) сжигания топлива в проточной части газовой турбины, должна проводиться с учетом недожога топлива в первом основном ТСУ.

В реальных условиях коэффициент полноты сгорания топлива в ОКС $\eta_r < 1$ и, следовательно, несгоревшее здесь топливо может частично или полностью догорать в КСППГ (МФС), что в значительной степени зависит от конструкции камеры, распределения газозвдушной смеси по отдельным каналам, характера рассредоточения топлива по рабочему объему камеры горения, стабилизирующего устройства, физико-химического состояния и свойств горючей смеси и др.

Рассматривая случай чисто механического недожога топлива¹ в ОКС и учитывая энтальпию продуктов недожога в уходящих газах, уравнение теплового баланса КСППГ² можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma}} I_{\text{т}}^* \left| \frac{T_{\text{т}}}{T_0} \right| + (1 + L_0) \eta_{\text{г}} I_{\text{ч.п}}^* \left| \frac{T_{\text{г}}}{T_0} \right| + (\alpha_{\Sigma} - \eta_{\text{г}}) L_0 I_{\text{в}}^* \left| \frac{T_{\text{г}}}{T_0} \right| + \\
 & + (1 - \eta_{\text{г}}) I_{\text{п.н}}^* \left| \frac{T_{\text{г}}}{T_0} \right| + \left[K (1 - \eta_{\text{г}}) \eta_{\text{г1}}^1 + \eta_{\text{г1}}^1 \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma1}} \right] Q_{\text{н}}^{\text{п}} = \\
 & = \left[\eta_{\text{г}} + K (1 - \eta_{\text{г}}) \eta_{\text{г1}}^1 + \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma}} \eta_{\text{г1}}^1 \right] (1 + L_0) I_{\text{ч.н}}^* \left| \frac{T_{\text{г1}}}{T_0} \right| + \\
 & + \left[(\alpha_{\Sigma} - \eta_{\text{г}}) - K (1 - \eta_{\text{г1}}) \eta_{\text{г1}}^1 - \eta_{\text{г1}}^1 \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma}} \right] L_0 I_{\text{в}}^* \left| \frac{T_{\text{г1}}}{T_0} \right| + \\
 & + \left[K (1 - \eta_{\text{г}}) (1 - \eta_{\text{г1}}^1) + (1 - K) (1 - \eta_{\text{г}}) + (1 - \eta_{\text{г1}}^1) \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma1}} \right] \times \\
 & \times I_{\text{п.н1}}^* \left| \frac{T_{\text{г1}}}{T_0} \right|. \quad (1)
 \end{aligned}$$

Здесь α_{Σ} и $\alpha_{\Sigma1}$ — суммарный коэффициент избытка воздуха и газовой смеси (окислителя) соответственно на выходе из ОКС и КСППГ; $I_{\text{т}}^*$, $I_{\text{ч.п}}^*$, $I_{\text{в}}^*$ и $I_{\text{п.н(1)}}^*$ — теплосодержание 1 кг топлива, “чистых” продуктов сгорания, воздуха и продуктов недожога, рассчитываемое по интегралу указанных температур (согласно принятому определению теплосодержаний величина $I_{\text{п.н}}^* \left| \frac{T_{\text{г}}}{T_0} \right|$, например, подсчитывается как разность $C_{\text{п.н}} I_{\text{г}} - C_{\text{п.н}} I_0$, где $C_{\text{п.н}}$ — средняя удельная массовая теплоемкость продуктов недожога, а T_0 — стандартная температура калориметрирования); $\eta_{\text{г1}}^1$ — искомый коэффициент полноты сгорания топлива в КСППГ; L_0 — стехиометрический коэффициент; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ — низшая теплота сгорания топлива; индексы “г” и “г1” соответствуют состоянию газа на входе и выходе КСППГ; индексы “п.н” и “п.н1” означают продукты недожога, выходящие соответственно из ОКС и КСППГ; K — степень догорания несгоревшего топлива в КСППГ.

Гипотетически для КСППГ доля догорающего топлива $0 \leq K \leq 1$, и сам этот параметр может рассматриваться как отношение количества газа, входящего непосредственно в зону горения, к суммарному его количеству, проходящему через КСППГ. Для КСППГ, конструктивно выполненных по схеме ОКС (с традиционной жаровой трубой и последовательным вводом газа в ее рабочий объем), параметр K приближенно

¹Этот случай наиболее вероятен для низкотемпературной области горения, характерной, например для МФС, когда процесс сгорания топлива идет при больших коэффициентах избытка воздуха α_{Σ} .

²Для случая сжигания в ОКС массы топлива $G_{\text{т}}$, равной 1 кг, и соответственно в КСППГ — $G_{\text{т1}} = G_{\text{т}} \frac{\alpha_{\Sigma} - 1}{\alpha_{\Sigma}}$ кг.

можно оценить в виде отношения суммы площадей отверстий, выполненных в жаровой трубе на участке зоны горения, к суммарной площади отверстий:

$$K \cong \frac{\Sigma F_{\text{оз.г}}}{\Sigma F_{\text{ОКС}}},$$

часто $K \approx 0,2 \dots 0,5$. В случае же специального конструктивного оформления КСППГ, когда учтены особенности рабочего процесса промежуточного подогрева газов в ГТУ и ГТД, параметр K должен быть, как правило, больше. В частности, для среднетемпературных вариантов КСППГ ($T_r^* = 900 \dots 1000$ К), где экраны (жаровая труба в таких ТСУ отсутствует) охлаждаются “вторичным” потоком газа, изолированным от зоны горения, в количестве до $20 \dots 25\%$ суммарного расхода газа через КСППГ, наибольшее значение $K = 0,75 \dots 0,8$. В высокотемпературных вариантах КСППГ ($T_r^* > 1150$ К), спроектированных по типу авиационных форсажных камер сгорания, с системой собственного охлаждения экранов цикловым воздухом параметр K может быть максимальным, т. е. порядка единицы ($0,9 \dots 0,95$).

Погрешности обычных расчетов полноты сгорания топлива в КСППГ возможны при использовании двух экстремальных значений коэффициента η_{r1}^1 , а именно: $(\eta_{r1}^1)_{k=0}$ — коэффициента полноты сгорания, определяемого без учета горения продуктов недожога, поступающих из ОКС в КСППГ, и $(\eta_{r1}^1)_{k=1}$ — коэффициента полноты сгорания, определяемого с учетом полного догорания продуктов недожога, идущих из ОКС. Соответствующие выражения для расчета этих коэффициентов можно представить в следующем виде³:

$$\begin{aligned} (\eta_{r1}^1)_{k=0} = & \left\{ \frac{\alpha_{\Sigma 1}}{\alpha_{\Sigma - 1}} \left[(1 + L_0) \eta_r I_{\text{н.п}}^* \Big|_{T_r}^{T_{r1}} + L_0 (\alpha_{\Sigma} - \eta_r) I_{\text{в}}^* \Big|_{T_r}^{T_{r1}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + (1 + \eta_r) I_{\text{п.н}}^* \Big|_{T_r}^{T_{r1}} \right] + I_{\text{п.н}}^* \Big|_{T_0}^{T_{r1}} - I_{\text{т}}^* \Big|_{T_0}^{T_{r1}} \right\} / \left[Q_{\text{н}}^p - (1 + L_0) I_{\text{н.п}}^* \Big|_{T_0}^{T_{r1}} + \right. \\ & \left. + L_0 I_{\text{в}}^* \Big|_{T_0}^{T_{r1}} + I_{\text{п.н}}^* \Big|_{T_0}^{T_{r1}} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

$$(\eta_{r1}^*)_{k=1} = \left\{ \frac{\alpha_{\Sigma 1}}{\alpha_{\Sigma - 1}} \left[(1 + L_0) \eta_r I_{\text{ч.п}}^* \Big|_{T_r}^{T_{r1}} + L_0 (\alpha_{\Sigma} - \eta_r) I_{\text{ч.п}}^* \Big|_{T_r}^{T_{r1}} + \right. \right.$$

³При выводе итоговых выражений для $(\eta_{r1}^1)_{k=0}$ и $(\eta_{r1}^1)_{k=1}$ из уравнения (1) принимается однотипный состав продуктов недожога в газах, идущих из ОКС и КСППГ ($C_{\text{п.н}} = C_{\text{п.н1}}$).

$$+ L_0(\alpha_{\Sigma} - \eta_r) I_B^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_r \end{matrix} \right] + \left. \left. + I_{п.н}^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. - I_T^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. \right\} / \left\{ \left[1 + \frac{\alpha_{\Sigma 1}(1 - \eta_r)}{\alpha_{\Sigma - 1}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[Q_H^p - (1 + L_0) I_{ч.п}^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. + L_0 I_B^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. + I_{п.н}^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. \right] \right\}. \quad (3)$$

Для сравнения, согласно данным работы [3], полнота сгорания топлива в КСППГ определяется по следующему выражению:

$$\eta_{r1} = \left[\frac{\alpha_{\Sigma 1}}{\alpha_{\Sigma - 1}} (1 + L_0) I_{ч.п}^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_r \end{matrix} \right. + (1 + L_0) I_{ч.п}^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_r \end{matrix} \right. + \right. \\ \left. + \alpha_{\Sigma 1} L_0 I_B^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_r \end{matrix} \right. - L_0 I_B^* \left| \begin{matrix} T_{r1} \\ T_0 \end{matrix} \right. - I_T^* \left| \begin{matrix} T_r \\ T_0 \end{matrix} \right. \right] / Q_H^p. \quad (4)$$

Сопоставляя уравнения (2) и (3) с выражением (4), два крайних значения вероятной погрешности при традиционном определении полноты сгорания топлива в КСППГ в общем случае можно определить как $(\Delta \eta_{r1})_{\min} = \frac{\eta_{r1} - (\eta_{r1}^1)_{k=0}}{\eta_{r1}} \cdot 100\%$ и $(\Delta \eta_{r1})_{\max} = \frac{\eta_{r1} - (\eta_{r1}^1)_{k=1}}{\eta_{r1}} \cdot 100\%$.

В качестве примера в табл. 1 и на рис. 1 приведены результаты расчета $(\Delta \eta_{r1})_{\min}$ и $(\Delta \eta_{r1})_{\max}$ для случая работы двухкамерной системы, в том числе и в условиях, близких к натурным в ГТУ и ГТД. В этих

Таблица 1

Минимальные погрешности при традиционном определении полноты выгорания топлива в КСППГ в зависимости от режимных параметров работы системы “ОКС+КСППГ”

α_{Σ}	$T_{r1} - T_r, \text{ К}$	η_r			
		0,98	0,95	0,90	0,80
		$\Delta \eta_{r1 \min}, \%$			
2	50	-0,09	-0,25	-0,53	-1,08
	100	—	-0,13	-0,08	-0,19
	200	0,05	0,09	0,14	0,25
	400	0,09	0,15	0,27	0,49
4	50	-0,03	-0,17	-0,26	-0,53
	100	0,01	—	-0,03	-0,08
	200	0,04	0,06	0,09	0,14
	400	0,07	0,10	0,16	0,28
6	50	-0,01	-0,07	-0,016	-0,35
	100	0,02	—	-0,01	-0,05
	200	0,04	0,05	0,07	0,11
	400	0,06	0,08	0,12	0,20

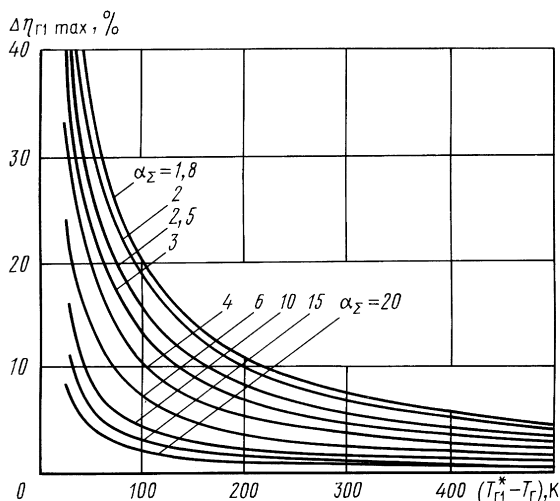


Рис. 1. Зависимость величины максимальной относительной погрешности $\Delta\eta_{г1\max}$ от относительного подогрева газа $(T_{г1}^* - T_{г1})$ в КСППГ при различных значениях суммарного коэффициента избытка воздуха за ОКС

расчетах рассматривались режимы работы ОКС с $\eta_{г1} = 0,93$ при этом расходы топлива (типа керосина с $Q_H^p = 43960$ кДж/кг; $L_0 = 14,7$ кг/кг) в обеих камерах балансировались таким образом, чтобы при заданных подогревах газа в КСППГ $(T_{г1}^* - T_{г1}^*)$ можно было обеспечить расчетное (по традиционному уравнению (4)) значение $\eta_{г1}$, равное 0,98; параметры $T_{г1}^* = 1030$ К; $T_{г1}^* = 300$ К; $T_0 = 288$ К; $C_{pT} = C_{pн} = 2,1$ кДж/(кг·К) считались постоянными.

Сравнивая два крайних значения вероятной погрешности $(\Delta\eta_{г1})_{\min}$ и $(\Delta\eta_{г1})_{\max}$, выявили, что расчет $\eta_{г1}$, согласно данным работы [3], для реальных конструкций КСППГ, в том числе и микрофакельных (с параметром $K \approx 1$), и в реальных диапазонах как первичного, так и вторичного подогрева газов, как правило, будет сопровождаться существенным завышением результата (см. рис. 1), так как не учтена возможность догорания в КСППГ продуктов недожога топлива, идущих из ОКС. Это подтверждают данные, приведенные на рис. 2 и полученные при экспериментальных исследованиях полноты сгорания топлива в модели КСППГ, работающей с предвключенным генератором горючих газов — ОКС, при механическом недожоге топлива в обеих камерах.

Если предположить, что двухкамерное ТСУ работает при $\eta_{г1} = 0,98$ и $K \sim 0$, то учет энтальпии продуктов недожога по состоянию газа перед и за КСППГ практически не отразится на погрешности подсчета коэффициентов $\eta_{г1}$ или $\eta_{г1}^1$. Аналогичный вывод можно сделать и для случая работы системы при более низкой полноте сгорания топлива в ОКС (см. табл. 1).

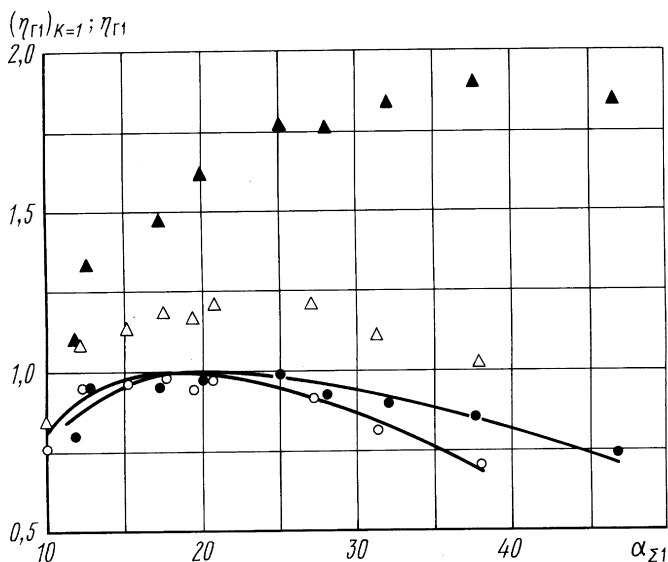


Рис. 2. Экспериментальные значения коэффициента полноты сгорания топлива в модели высокотемпературной КСППГ:

Δ , \blacktriangle — данные традиционного расчета $\eta_{\Gamma 1}$; \circ , \bullet — данные расчета $(\eta_{\Gamma 1})_{K=1}$, полученные с использованием уточненного уравнения (3); \square , \circ — массовый расход воздуха $G_B = 3,05$ кг/с, $\alpha_{\Sigma} = 5,25$, $T = 303 \dots 304$ К, $\eta_{\Gamma} = 0,98$ (максимальный недожог керосина $C_{p_{н.н}} = 2,1$ кДж/кг·К); \blacktriangle , \bullet — $G_B = 2,4$ кг/с; $\alpha_{\Sigma} = 3,32$, $T_{\Gamma}^* = 1072 \dots 1074$ К, $\eta_{\Gamma} = 0,925$ (топливо и недожог — те же)

В целом же из таких показателей рабочего тела и работы системы “ОКС+КСППГ”, как $C_{p_{н.н}}$, T_{Γ}^* и η_{Γ} , наибольшее влияние на относительную погрешность в традиционных расчетах $\eta_{\Gamma 1}$ при реальных значениях коэффициента K оказывает величина полноты выгорания топлива в ОКС (рис. 3). При этом становится существенным и фактор учета степени догорания топлива в КСППГ (табл. 2). Поэтому необходимо учитывать перечисленные факторы и при общих расчетах ТСУ или МФУ вторичного подогрева, когда по аналогии со схемой расчета ОКС определяется исходный параметр $\alpha_{\Sigma 1}$. В таком случае для подсчета этого параметра может быть рекомендовано следующее выражение:

$$\alpha_{\Sigma 1} = \alpha_{\Sigma - 1} \left(I_{\Gamma}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma}} + \eta_{\Gamma 1}^1 Q_{\text{н}}^p - \eta_{\Gamma 1}^1 (1 + L_0) I_{\text{ч.п}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} - (1 - \eta_{\Gamma 1}^1) I_{\text{п.н}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} \right) /$$

$$/ \left\{ \eta_{\Gamma 1}^1 (1 + L_0) I_{\text{ч.п}}^* \Big|_{T_{\Gamma}}^{T_{\Gamma 1}} + (\alpha_{\Sigma} - \eta_{\Gamma}) L_0 I_{\text{в}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} + K (1 - \eta_{\Gamma}) \eta_{\Gamma 1}^1 \left[(1 + L_0) I_{\text{ч.п}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} - \right.$$

$$\left. - L_0 I_{\text{в}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} - Q_{\text{н}}^p - I_{\text{п.н}1}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} \right] + (1 - \eta_{\Gamma}) I_{\text{п.н}1}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} - I_{\text{п.н}}^* \Big|_{T_0}^{T_{\Gamma 1}} \Big\}^{-1}.$$

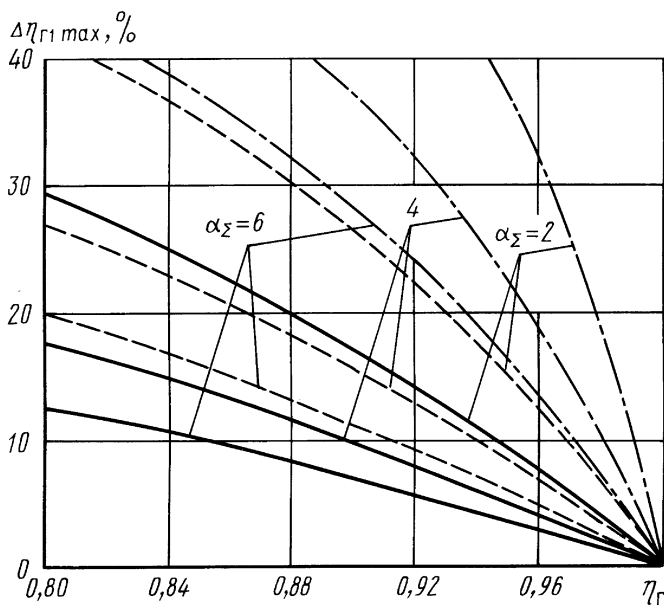


Рис. 3. Графики зависимости полноты выгорания топлива в камере первичного подогрева $\eta_г$ на величину максимальной относительной погрешности в традиционном расчете полноты сгорания топлива в КСППГ:

..... — $\Delta T_г^* = T_{г1}^* - T_г^* = 100$ К; — $\Delta T_г = 300$ К; — $\Delta T_г = 500$ К; ($\eta_{г1} = 0,93$; $C_{p_{н.н}} = 2,1$ кДж/кг·К; $T_г^* = 1000$ К; топливо — керосин)

Таблица 2

Погрешности при традиционном определении полноты сгорания топлива в КСППГ в зависимости от степени догорания топлива и относительного подогрева газа в КСППГ и состава газа за ОКС

α_Σ	$(T_{г1}^* - T_г^*),$ К	К				
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
		$\Delta\eta_{г1}, \%$				
2	100	4,25	8,23	12,10	15,49	18,54
	300	1,01	2,84	4,11	5,45	6,72
	500	0,86	1,75	2,47	3,19	4,63
4	100	1,75	3	4,56	8,57	10,52
	300	0,75	1,37	2,16	2,78	3,63
	500	0,45	0,93	1,27	1,61	2,06
6	100	1,68	3,19	4,18	5,90	7,30
	300	0,72	1,63	1,47	1,54	2,42
	500	0,27	0,57	0,75	1,65	1,34

Примечание. $\eta_г = 0,98$; $\eta_{г1} = 0,93$; $C_{p_{н.н}} = 2,1$ кДж/(кг·К); $T_г^* = 1000$ К; топливо — керосин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 01-02-17024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пчелкин Ю. М., Лебедев В. П., Голуб Н. Н. Направления и методы совершенствования организации рабочего процесса топливосжигающих устройств газотурбинных двигателей и комбинированных установок // Изв. вузов. Машиностроение. – 1994. – № 1–3. – С. 59–65.
2. Пчелкин Ю. М., Лебедев В. П. К исследованию основ организации процесса горения топлива в газотурбинных двигателях на базе микрофакельных систем // Изв. вузов. Машиностроение. – 1995. – № 1–3. – С. 58–65.
3. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1997. – 203 с.

Статья поступила в редакцию 15.04.2003

Юрий Михайлович Пчелкин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ и учебника “Камеры сгорания ГТД”.

Yu.M. Pchylolkin — D. Sc. (Eng.), professor of “Gas-turbine and Non-traditional Power Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications and a textbook “Combustion Chambers of Gas-turbine Engines”.

Валентин Павлович Лебедев — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НУК “Энергетическое машиностроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ, авторских свидетельств и патентов в области топливосжигающих устройств.

V.P. Lebedev — Ph. D. (Eng.), leading researcher of Scientific and Educational Unit “Power Engineering” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 80 publications, author’s certificate and patents in the field of fuel-burning devices.



Евгения Евгеньевна Гончаренко — канд. хим. наук, доцент кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 90 научных работ в области физической химии.

Ye.Ye. Goncharenko — Ph. D. (Chemistry), assoc. professor of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 publications in the field of physical chemistry.



Нелли Михайловна Елисеева — старший преподаватель кафедры “Химия” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 8 научных работ в области физической химии.

N.M. Yeliseeva — senior teacher of “Chemistry” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 8 publications in the field of physical chemistry.

Геннадий Иванович Живов — канд. техн. наук, заведующий лабораторией кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 28 научных работ в области теории автоматического регулирования газотурбинных двигателей.

G.I. Zhivov — Ph. D. (Eng.), head of laboratory of “Gas-turbine and Non-traditional Power Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 28 publications in the field of theory of automatic adjustment of gas-turbine engines.

