

УДК 62-97

**О.А. Зуева, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

**А.М. Клещевников**

ОАО «Протон-ПМ», г. Пермь

## **ТЕПЛООБМЕН В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА**

Представлены результаты теплового расчета конструктивных элементов многозонной камеры сгорания (КС), предназначенной для утилизации попутного нефтяного газа. Температура жаровой трубы (ЖТ) определяется методом последовательных приближений из уравнения теплового баланса, составленного для установившегося режима работы. ЖТ нагревается за счет конвективного и лучистого тепловых потоков от продуктов сгорания. При этом часть тепла от ЖТ расходуется на нагрев вторичного воздуха в кольцевом зазоре между ЖТ и кожухом (конвективный теплообмен) и на нагрев кожуха (лучистый теплообмен). В свою очередь, тепло от кожуха расходуется также на нагрев вторичного воздуха и на потери в окружающую среду, которые являются незначительными. Нагрев вторичного воздуха в кольцевом зазоре является незначительным и составляет 1–2 % от тепловосприятости ЖТ. Конвективные тепловые потоки определяются по известным критериальным соотношениям, а при расчете лучистых тепловых потоков используются новые эмпирические зависимости, полученные в результате стендовых испытаний в ЦИАМ. Максимальная температура ЖТ наблюдается в области ее примыкания к горелочному камню зоны горения, а максимальная температура кожуха – на выходе из КС. Анализ результатов тепловых расчетов, проведенных отдельно для каждой зоны КС, позволил дать рекомендации по использованию конструкционных материалов.

**Ключевые слова:** многозонная камера сгорания, жаровая труба, кожух, конвективный и лучистый тепловые потоки, эффективная температура излучения, коэффициенты ослабления, степень черноты, приведенная степень черноты, эффективная длина пути луча, коэффициенты микро- и макронеравномерности.

**O.A. Zueva, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich**

Perm National Research Polytechnic University

**A.M. Kleshchevnikov**

“Proton-PM” JSC, Perm

## **HEAT EXCHANGE IN COMBUSTION CHAMBER FOR UTILIZATION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS**

Results of thermal design of construction elements of the multizone combustion chamber intended for utilization of associated petroleum gas are presented. The temperature of flame tube is defined by method of successive approximations of heat-balance equation when operating the steady-

state conditions. Flame tube is heated by reason of convective and radiant heat fluxes from combustion products. Thus the part of heat from flame tube is spent for heating of secondary air in annular gap between flame tube and casing (convective heat exchange) and for casing heating (radiant heat exchange). In turn heat from a casing is spent also for heating of secondary air and for losses in environment which are insignificant. Heating of secondary air in annular gap is insignificant and makes 1–2 % from heat exchange of flame tube. Convective heat fluxes are determined by known criteria ratios. Calculation of radiant heat fluxes is executed by new empirical dependences obtained in development test at Central Institute of Aviation Motorbuilding. The maximum temperature of flame tube is observed in the field of its adjunction to a burner block at zone of burning. The maximum temperature of casing is observed at exit of combustion chamber. The analysis of results of the thermal calculations which have been carried out separately for each zone of combustion chamber allow to make recommendations about use of constructional materials.

**Keywords:** multizone combustion chamber, flame tube, casing, convective and radiant heat fluxes, effective radiation temperature, attenuation coefficient, blackness degree, reduced blackness degree, effective ray length, coefficients of micro- and macrounevenness.

Одной из важнейших характеристик, определяющих надежность и ресурс КС, является тепловое состояние стенок ЖТ и кожуха. Определение температуры элементов КС следует за определением режимных и геометрических параметров [1]. При оценке температурного режима конструкционного материала конструктора в первую очередь интересуется максимальная температура ЖТ. Местоположение и значение этой температуры определяются характером распределения тепловых потоков по длине КС.

Локальное значение температуры ЖТ может быть найдено решением уравнения теплового баланса, составленного для элемента ЖТ в установившемся режиме работы:

$$(q_k)_{\Gamma-CT} + (q_l)_{\Gamma-CT} = (q_k)_{CT-B} + (q_l)_{CT-K}. \quad (1)$$

Конвективный тепловой поток от продуктов сгорания (ПС) в ЖТ [2]

$$(q_k)_{\Gamma-CT} = \alpha_{\Gamma-CT} \cdot (T_{\Gamma} - T_{CT}), \quad (2)$$

где  $T_{\Gamma}$ ,  $T_{CT}$  – температуры ПС и ЖТ;  $\alpha_{\Gamma-CT}$  – коэффициент теплообмена между ПС и ЖТ.

Лучистый тепловой поток от ПС в ЖТ [3, 4]

$$(q_l)_{\Gamma-CT} = \sigma \varepsilon_{CT} \varepsilon_{\Gamma} \left[ (T_{\Gamma}^4)_{\text{эф}} - (T_{CT}^4) \right], \quad (3)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\varepsilon_{CT}$  – степень черноты стенки;  $\varepsilon_{\Gamma}$  – степень черноты ПС;  $(T_{\Gamma}^4)_{\text{эф}}$  – эффективная температура излучения ПС.

Конвективный тепловой поток от ЖТ в охлаждающий воздух в кольцевом зазоре между ЖТ и кожухом

$$(q_k)_{\text{ст-в}} = \alpha_{\text{ст-в}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}), \quad (4)$$

где  $T_{\text{в}}$  – температура охлаждающего воздуха;  $\alpha_{\text{ст-в}}$  – коэффициент теплообмена между ЖТ и охлаждающим воздухом.

Лучистый тепловой поток от ЖТ в кожух [4]

$$(q_l)_{\text{ст-к}} = \sigma \varepsilon_{\text{пр}}(T_{\text{ст}}^4 - T_{\text{к}}^4), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты поверхностей ЖТ и кожуха.

Тогда уравнение теплового баланса (1) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{г-ст}}(T_{\text{г}} - T_{\text{ст}}) + \sigma \varepsilon_{\text{ст}} \varepsilon_{\text{г}} \left[ (T_{\text{г}}^4)_{\text{эф}} - (T_{\text{ст}}^4) \right] = \\ = \alpha_{\text{ст-в}}(T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}) + \sigma \varepsilon_{\text{пр}}(T_{\text{ст}}^4 - T_{\text{к}}^4). \end{aligned} \quad (6)$$

При составлении уравнения (6) не учтены перетечки теплоты вдоль стенки за счет теплопроводности, а температура внутренней и наружной поверхностей ЖТ принята одинаковой. Вследствие малой толщины стенки (3–5 мм) оба допущения не вносят значительных погрешностей в выполняемый расчет [5].

Уравнение (6), составленное для каждого из поперечных сечений, на которые разбивается КС, решается относительно температуры ЖТ. Выбор поперечных сечений производится в соответствии с принятой схемой конструкции КС.

Ниже приведены пояснения и последовательность определения величин, входящих в уравнение (6).

Большая часть воспринятого корпусом лучистого теплового потока  $(q_l)_{\text{ст-к}}$  снимается охлаждающим воздухом в кольцевом зазоре. Оценочные расчеты показали, что потери теплоты в окружающую среду составляют менее 1 % от тепловосприятия ЖТ. Пренебрегая потерями теплоты в окружающую среду и составляя тепловой баланс внутренней поверхности кожуха, получим

$$\sigma \varepsilon_{\text{пр}} (T_{\text{ст}}^4 - T_{\text{к}}^4) = \alpha_{\text{к-в}} (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}), \quad (7)$$

где  $\alpha_{\text{к-в}}$  – коэффициент теплообмена между кожухом и охлаждающим воздухом в кольцевом зазоре.

На основании опытных данных [1, 5] температуру кожуха  $T_{\text{к}}$  можно выразить через температуру  $T_{\text{в}}$  и массовую скорость  $\rho_{\text{в}} W_{\text{в}}$  охлаждающего воздуха и температуру ЖТ  $T_{\text{ст}}$ :

$$T_{\text{к}} = T_{\text{в}} + \frac{T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}}{1 + 0,04(\rho_{\text{в}} W_{\text{в}})^{0,8}}. \quad (8)$$

Подогрев охлаждающего воздуха в кольцевом зазоре между ЖТ и кожухом на участке  $dl$  описывается уравнением баланса [6]

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{ст-в}} (T_{\text{ст}} - T_{\text{в}}) \pi (d_{\text{ЖТ}} + \delta_{\text{ЖТ}}) dl + \alpha_{\text{к-в}} (T_{\text{к}} - T_{\text{в}}) \pi d_{\text{к}} dl = \\ = g_{\text{в}} C_{\rho\text{в}} [T_{\text{в}} - (T_{\text{в}})_{\text{вх}}], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $d_{\text{ЖТ}}$ ,  $\delta_{\text{ЖТ}}$  – внутренний диаметр и толщина ЖТ;  $d_{\text{к}}$  – внутренний диаметр кожуха;  $g_{\text{в}}$  – расход охлаждающего воздуха, омывающего участок  $dl$ ;  $C_{\rho\text{в}}$  – изобарная теплоемкость воздуха;  $(T_{\text{в}})_{\text{вх}}$  – температура воздуха перед КС.

Коэффициент теплообмена между ПС и ЖТ вычисляется по критериальному уравнению [2]

$$\frac{\alpha_{\text{г-ст}} d_{\text{ЖТ}}}{\alpha_{\text{г}}} = 0,023 \left( \frac{4g_{\text{г}}}{\pi d_{\text{ЖТ}} \mu_{\text{г}}} \right)^{0,8} \left( \frac{\mu_{\text{г}} C_{\rho\text{г}}}{\lambda_{\text{г}}} \right)^{0,4}, \quad (10)$$

где  $g_{\text{г}}$  – расход ПС;  $\mu_{\text{г}}$ ,  $\lambda_{\text{г}}$ ,  $C_{\rho\text{г}}$  – коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности и изобарная теплоемкость ПС;  $d_{\text{ЖТ}}$  – диаметр ЖТ.

Коэффициент теплообмена между ЖТ и охлаждающим воздухом вычисляется по критериальному уравнению

$$\frac{\alpha_{\text{ст-в}} (d_{\text{к}} - d_{\text{ЖТ}})}{\lambda_{\text{в}}} = 0,023 \left[ \frac{4g_{\text{в}}}{\pi (d_{\text{к}} + d_{\text{ЖТ}}) \mu_{\text{в}}} \right]^{0,8} \left( \frac{\mu_{\text{в}} C_{\rho\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} \right)^{0,4}, \quad (11)$$

где  $\mu_v$ ,  $\lambda_v$  – коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности воздуха;  $d_k$  – внутренний диаметр кожуха.

Полусферическая интегральная степень черноты ПС в рассматриваемом сечении  $\varepsilon_r$  на некоторой эффективной длине пути луча  $S_{эф}$  может быть определена по формуле [1]

$$\varepsilon_r = 1 - \exp\left[-(K_c + K_r)S_{эф}\right]. \quad (12)$$

Эффективная длина пути луча может быть определена как

$$S_{эф} = 3,6 \frac{V}{F}, \quad (13)$$

где  $V$ ,  $F$  – внутренний объем и площадь внутренней поверхности ЖТ.

Коэффициент ослабления излучения  $K_r$  трехатомных газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) в рассматриваемом сечении может быть определен по формуле [7]

$$K_r = \frac{8 + 16,3r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{S_{эф}}} \left(1 - 0,38 \frac{T_r}{1000}\right) \sqrt{p_{\text{КС}}(r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{CO}_2})}, \quad (14)$$

где  $r_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $r_{\text{CO}_2}$  – объемные доли водяного пара и углекислого газа в составе ПС;  $T_r$  – среднemasсовая температура ПС, К;  $p_{\text{КС}}$  – давление в КС, МПа.

Коэффициент ослабления излучения сажистыми частицами в рассматриваемом сечении [8]

$$K_c = 7,75 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T_r^{0,09} \bar{p}_{\text{КС}} \left(\frac{\text{C}}{\text{H}}\right)^2}{\alpha K_{m0}} [4,88(1 - \eta_r) + 0,2\bar{l}], \quad (15)$$

где  $K_{m0}$  – стехиометрическое соотношение воздуха и топливного газа;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $\bar{p}_{\text{КС}} = \frac{p_{\text{КС}}}{p_0}$  – относительное давление в КС;

$\eta_r$  – коэффициент полноты сгорания топливного газа;  $\bar{l} = \frac{x}{l}$  – относительная длина;

$\text{C}$ ,  $\text{H}$  – массовое содержание углерода и водорода в составе топливного газа.

При газодинамических расчетах КС используется среднemasсовая температура ПС, одинаковая по всему сечению ЖТ. В действительности температура ПС  $T_{\Gamma}$  очень неравномерна. При расчете лучистого теплового потока  $(q_{\text{л}})_{\Gamma-\text{ст}}$  целесообразно пользоваться эффективной температурой излучения ПС [9]

$$(T_{\Gamma})_{\text{эф}} = \theta \xi T_{\Gamma}. \quad (16)$$

Коэффициент макронеравномерности  $\theta$  учитывает неравномерную структуру течения в ЖТ (снижение температуры возле стенок ЖТ и в местах, где сохраняется закрученность потока, а горение не завершено) и определяется по формуле, полученной на основании стендовых испытаний [7, 8]:

$$\theta = \frac{10}{9 + \left( \chi \frac{T_{\Gamma}}{(T_{\text{в}})_{\text{вх}}} \right)^{0,1}}. \quad (17)$$

Оптическая толщина (плотность) излучающей среды [4]

$$\chi = (K_{\text{с}} + K_{\Gamma}) S_{\text{эф}}. \quad (18)$$

Коэффициент микронеравномерности  $\xi$  учитывает неравномерное распределение топливного газа в объеме ЖТ и собственно горения (микрзоны с нерасчетными  $\alpha$ ) и вычисляется по формуле, полученной из экспериментальных исследований [7, 8]:

$$\xi = 1 + K(1 - \eta_{\Gamma}) \frac{T_{\Gamma}^{\alpha-1} - T_{\Gamma}}{T_{\Gamma}}, \quad (19)$$

где  $T_{\Gamma}^{\alpha-1}$  – среднemasсовая температура газа при стехиометрическом соотношении  $K_{m0}$ ;  $K$  – эмпирический коэффициент ( $K=0,4$  при  $\alpha \leq 1$ ;  $K=0,25$  при  $\alpha > 1$ ).

Приведенная степень черноты поверхностей кожуха и ЖТ [4]

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left( \frac{1}{\varepsilon_{\text{св}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{кв}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (20)$$

где  $\varepsilon_{\text{св}}$  – степень черноты наружной поверхности ЖТ;  $\varepsilon_{\text{кв}}$  – степень черноты внутренней поверхности кожуха.

Таким образом, подставив в уравнение баланса (6) выбранные указанным образом входящие в него величины и решив его относительно  $T_{\text{ст}}$ , определяем температуру ЖТ в данном сечении. Повторяя эти операции в разных сечениях, находим изменение  $T_{\text{ст}}$  по длине ЖТ.

В газотурбинных установках для выработки электрической и тепловой энергии температура газа перед турбиной обычно принимается равной 700–950 °С по условию работоспособности конструктивных элементов турбины. При таких условиях невозможна организация процесса устойчивого горения разнородных по составу, неочищенных и влажных попутных нефтяных газов. Поэтому конструкция КС предусматривает наличие зоны горения с применением серийной диффузионной горелки (устойчивость горения) и зон разбавления (обеспечение заданного уровня температуры газа перед турбиной). Поскольку диффузионная горелка поставляется в комплекте с горелочным камнем, то приведенные ниже результаты теплового расчета относятся к зонам разбавления. Кроме того, в разработанной конструкции длина жаровой трубы на 2 % меньше длины кожуха.

Ниже приведены режимные, геометрические и тепловые параметры, использованные при проведении теплового расчета по предложенной методике.

#### Режимные, геометрические и тепловые параметры КС:

Суммарный массовый расход воздуха, кг/с	2,539
Массовый расход воздуха в зону горения, кг/с	0,386
Массовый расход воздуха в зоны разбавления, кг/с	2,153
Массовый расход топливного газа, кг/с	0,024
Стехиометрическое соотношение	14,9
Относительное давление в КС	3,238
Температура ПС при $\alpha=1$ , К	2442
°С	2169
Температура воздуха на входе в КС, К	443
°С	170
Полнота сгорания топливного газа	0,98
Длина ЖТ, м	0,953
Внутренний диаметр ЖТ, м	0,460
Толщина ЖТ, м	0,003
Внутренний диаметр кожуха, м	0,549
Массовая доля углерода в составе топливного газа	0,83
Массовая доля водорода в составе топливного газа	0,16

Степень черноты ЖТ (внутренняя сторона)	0,85
Степень черноты ЖТ (наружная сторона)	0,67
Степень черноты кожуха (внутренняя сторона)	0,63
Приведенная степень черноты поверхностей ЖТ и кожуха	0,48

Распределение конвективных тепловых потоков по длине КС показано на рис. 1. Уменьшение  $(q_k)_{г-ст}$  по длине КС обусловлено главным образом существенным уменьшением температуры ПС (увеличением коэффициента избытка воздуха). Уменьшение  $(q_k)_{ст-в}$  и  $(q_k)_{к-в}$  объясняется значительным уменьшением коэффициентов теплообмена между воздухом и ЖТ, а также воздухом и кожухом, так как часть расхода вторичного воздуха тратится на подвод в соответствующие зоны разбавления.

Распределение лучистых тепловых потоков по длине КС показано на рис. 2. Уменьшение  $(q_l)_{г-ст}$  по длине КС связано со значительным уменьшением температуры ПС. Градиент увеличения температуры кожуха по длине КС превосходит градиент уменьшения температуры ЖТ, поэтому  $(q_l)_{ст-к}$  также уменьшается по длине КС.

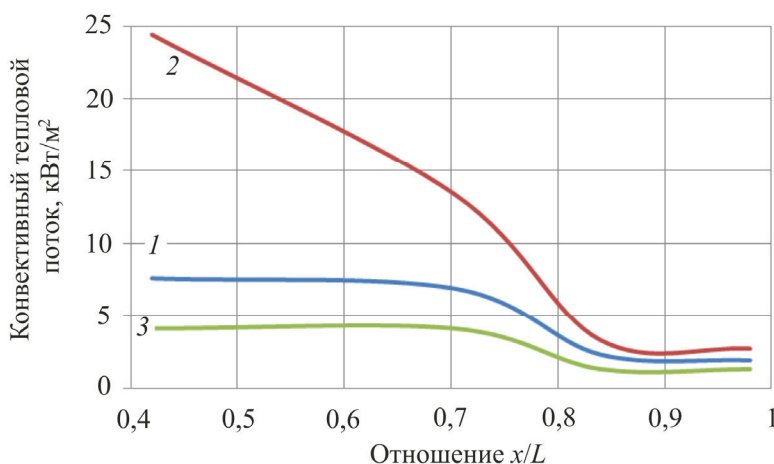


Рис. 1. Распределение конвективных тепловых потоков по длине КС:  
1 – от ПС в ЖТ; 2 – от ЖТ во вторичный воздух; 3 – от кожуха в воздух

На рис. 3 приведены зависимости температуры ПС, ЖТ, кожуха и воздуха в кольцевом зазоре по длине КС. При выборе конструкционных материалов с целью обеспечения высокой надежности и длитель-



ного ресурса необходимо ориентироваться на максимальные температуры ЖТ и кожуха. Максимальная температура ЖТ  $T_{ст} = 707$  °С достигается в области примыкания с горелочным камнем диффузионной горелки, а затем уменьшается по длине КС на 7 %. Температура кожуха, наоборот, увеличивается по длине на 12 % и достигает максимального значения  $T_k = 645$  °С на выходе из КС, так как для принятой конструкции расход охлаждающего воздуха по длине уменьшается. ЖТ работает в высокотемпературной агрессивной среде, и для ее изготовления рекомендуется жаростойкий хромоникелевый сплав ХН60ВТ6 с рабочей температурой 1100 °С [10]. Для изготовления кожуха, работающего в высокотемпературном режиме, можно рекомендовать сравнительно недорогой материал 12Х18Н10Т [10].

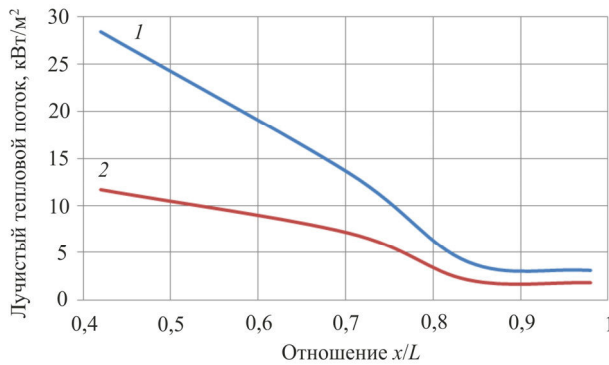


Рис. 2. Распределение лучистых тепловых потоков по длине КС: 1 – от ПС в ЖТ; 2 – от ЖТ в кожух

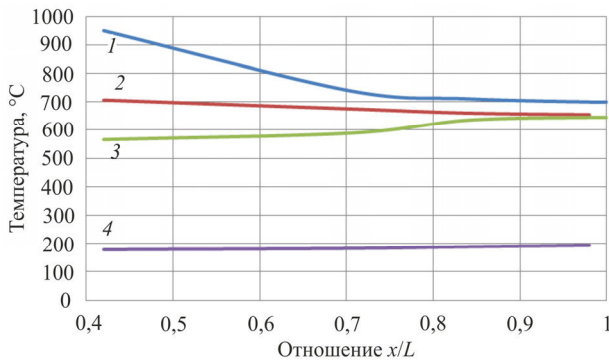


Рис. 3. Распределение температур по длине КС: 1 – температура ПС; 2 – температура ЖТ; 3 – температура кожуха; 4 – температура воздуха в кольцевом зазоре

На основании проведенных расчетов по предложенной методике получены параметры теплового состояния конструктивных элементов многозонной КС для утилизации разнородных по составу, неочищенных и влажных попутных нефтяных газов и даны рекомендации по применению материалов для их изготовления.

### Библиографический список

1. Сударев А.В., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок. Теплообмен. – Л.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
2. Кошкин В.К. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. – М.: Машиностроение, 1975. – 624 с.
3. Андрианов В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
4. Блох А.Г. Тепловые излучения в котельных установках. – Л.: Энергия, 1967. – 325 с.
5. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. – 280 с.
6. Дрегалин А.Ф., Черенков А.С. Общие методы теории высокотемпературных процессов в тепловых двигателях. – М.: Янус-К, 1997. – 328 с.
7. Антоновский В.И., Акулов В.А., Шведков В.Н. Результаты стендовых испытаний камеры сгорания ГТЭ-150 при среднемассовой температуре продуктов сгорания 1100 °С // Труды Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ). – 1990. – Вып. 261. – С. 151–156.
8. Камера сгорания ГТЭ-150. Испытания на стенде ЦКТИ / В.И. Антоновский, В.А. Асосков, С.М. Пеков [и др.] // Труды Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ). – 2002. – Вып. 284. – С. 54–71.
9. Антоновский В.И. Расчет теплового излучения пламени в камерах сгорания газотурбинных установок // Первый межведомств. науч.-техн. семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок. – 2004. – С. 1–9.
10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

## References

1. Sudarev A.V., Antonovskiy V.I. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh ustanovok. Teploobmen* [Combustion chambers of gas-turbine units. Heat exchange]. Leningrad: Mashinostroenie, 1985, 272 p.

2. Koshkin V.K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket-space equipment]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 624 p.

3. Andrianov V.N. *Osnovy radiatsionnogo i slozhnogo teploobmena* [Fundamentals of radiation and complex heat exchange]. Moscow: Energiya, 1972, 464 p.

4. Blokh A.G. *Teplovye izlucheniya v kotelnnykh ustanovkakh* [Thermal radiations in boiler plants]. Leningrad: Energiya, 1967, 325 p.

5. Pchelkin Yu.M. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley* [Combustion chambers of gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 280 p.

6. Dregalin A.F., Cherenkov A.S. *Obshchie metody teorii vysokotemperaturnykh protsessov v teplovykh dvigatelyakh* [The general methods of the theory of high-temperature processes in thermal engines]. Moscow: Yanus-K, 1997, 328 p.

7. Antonovskiy V.I., Akulov V.A., Shvedkov V.N. *Rezultaty stendovyykh ispytaniy kamery sgoraniya GTE-150 pri srednemasovoy temperature produktov sgoraniya 1100 °C* [Results of bench tests of the GTE-150 combustion chamber by average temperature of combustion products 1100 °C]. *Trudy Nauchno-proizvodstvennogo obединeniya po issledovaniyu i proektirovaniyu energeticheskogo oborudovaniya imeni I.I. Polzunova*, 1990, no. 261, pp. 151-156.

8. Antonovskiy V.I., Asoskov V.A., Pekov S.M. [and others]. *Kamera sgoraniya GTE-150. Ispytaniya na stende TsKTI* [GTE-150 combustion chamber. Bench tests at NPO CKTI]. *Trudy Nauchno-proizvodstvennogo obединeniya po issledovaniyu i proektirovaniyu energeticheskogo oborudovaniya imeni I.I. Polzunova*, 2002, no. 284, pp. 54-71.

9. Antonovskiy V.I. *Raschet teplovogo izlucheniya plameni v kamerakh sgoraniya gazoturbinnnykh ustanovok* [Calculation of thermal radiation of a flame in combustion chambers of gas-turbine units]. *Pervyy mezhdome-stvennyy nauchno-tekhnicheskyy seminar po problemam nizkoemissionnykh kamer sgoraniya gazoturbinnnykh ustanovok*, 2004, pp. 1-9.

10. Goldshteyn M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Spetsialnye stali* [Special steels]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p.

### Об авторах

**Зуева Оксана Андреевна** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: oksanochka\_zueva@mail.ru).

**Бачев Николай Леонидович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: bnl54@yandex.ru).

**Бульбович Роман Васильевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические установки» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: dekan\_akf@pstu.ru).

**Клещевников Алексей Михайлович** (Пермь, Россия) – начальник отдела ОАО «Протон-ПМ» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: bnl54@yandex.ru).

### About the authors

**Zueva Oksana Andreevna** (Perm, Russian Federation) – postgraduate student, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: oksanochka\_zueva@mail.ru).

**Bachev Nikolay Leonidovich** (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

**Bulbovich Roman Vasilevich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Technology, Generating Units, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan\_akf@pstu.ru).

**Kleshchevnikov Aleksey Mikhaylovich** (Perm, Russian Federation) – head of department, “Proton-PM” JSC (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: bnl54@yandex.ru).

Получено 12.03.2013