

ФОРМУЛЫ ПРИВЕДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОЛОГИЧНОСТИ И ГОРЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ К СТАНДАРТНЫМ АТМОСФЕРНЫМ УСЛОВИЯМ

© 2017

- А. В. Григорьев** генеральный конструктор;
АО «Климов», г. Санкт-Петербург;
klimov@klimov.ru
- А. А. Косматов** студент магистратуры;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(национальный исследовательский университет);
a.kosmatov94@gmail.com
- О. А. Рудаков** кандидат технических наук, научный консультант;
АО «Климов», г. Санкт-Петербург;
klimov@klimov.ru
- А. В. Соловьёва** заместитель главного конструктора по перспективным НИР;
АО «Климов», г. Санкт-Петербург;
anastasia.v.soloveva@yandex.ru

Представлены формулы приведения характеристик экологичности и горения топлива в газотурбинном двигателе и его термодинамических параметров к стандартным атмосферным условиям, когда высота полёта $H=0$ и число Маха $M=0$: $p_o=760$ мм. рт. ст. (101,325 кПа), $T_o=288,15$ К (+15°C), при которых задаётся техническое задание на газотурбинную установку. Атмосферные условия, определяемые температурой, давлением и влажностью воздуха, изменяются в широких пределах в зависимости от времени года, географической высоты и широты местности. Поэтому приведение характеристик двигателя к стандартным атмосферным условиям является необходимым и базируется на теории подобия, то есть на сохранении постоянными газодинамических и геометрических критериев камеры сгорания. Теоретической основой настоящего метода приведения характеристик является интегральная математическая модель камеры сгорания как результат решения системы дифференциальных уравнений переноса теплоты, массы (концентрации) и количества движения, что определяется теорией камеры сгорания. В работе показано существенное влияние на характеристики эмиссии и горения топлива температуры окружающей среды в отличие от влияния остальных атмосферных условий.

Формулы приведения; стандартные атмосферные условия; камера сгорания; эмиссия.

Цитирование: Григорьев А.В., Косматов А.А., Рудаков О.А., Соловьёва А.В. Формулы приведения характеристик экологичности и горения двигателя к стандартным атмосферным условиям // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 1. С. 18-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-18-22

В теории воздушно-реактивных двигателей отсутствует метод приведения параметров экологичности и горения двигателя к стандартным атмосферным условиям (САУ).

Следовательно, создание теоретического метода приведения указанных параметров к САУ для обеспечения доводки двигателя по выполнению технического задания на его проектирование и для контроля значений этих параметров в серийном производстве является актуальным.

Для решения задачи используем математические выражения, связывающие параметры эмиссии и горения с геометрическими и гидродинамическими критериями и параметрами потока камеры сгорания, которые представлены в теории камеры сгорания [1].

Интегральная математическая модель камеры сгорания создана на основе преобразования и решения системы дифференциальных уравнений переноса материи с использованием экспериментальных материалов по доводке двигателей.

Запишем искомые математические зависимости.

Для индексов эмиссии оксидов азота EI_{NOx} , оксида углерода EI_{CO} , несгоревших углеводородов EI_{HC} , бенз (а) пирена $EI_{БП}$ в граммах вещества на килограмм топлива:

$$EI_{NOx} = A_1 p_k^{1,5} G_6^{-1} \frac{T_z}{T_k} \exp\left(\frac{T_k}{288}\right), \quad (1)$$

$$EI_{CO} = A_2 p_k^{-1,8} G_6 T_z^{-1} \exp\left(-\frac{T_k}{288}\right), \quad (2)$$

$$EI_{HC} = A_3 p_k^{-1,8} G_6 T_z^{-1} \exp\left(-\frac{T_k}{288}\right), \quad (3)$$

$$EI_{БП} = A_4 EI_{HC}, \quad (4)$$

где A – постоянные числа, связанные с геометрией камеры сгорания; p_k , МПа – полное давление воздуха на выходе из компрессора; T_k и T_z , К – полная температура воздуха за компрессором и газа за камерой сгорания соответственно; G_6 , кг/с – массовый расход воздуха за компрессором.

Для числа дымности SN , %:

$$SN = A_5 p_k^{0,027} G_6^{0,135} T_z^{0,131} T_k^{0,135} \exp\left(-0,036 \frac{T_k}{288}\right). \quad (5)$$

Для коэффициента полноты сгорания топлива η :

$$\eta = 1 - A_6 G_6 p_k^{-1,8} T_z^{-1} \exp\left(-\frac{T_k}{288}\right). \quad (6)$$

Для коэффициентов избытка воздуха при «бедном» и «богатом» срыве горения α^{\max} и α^{\min} :

$$\alpha^{\max} = A_7 p_k^{0,62} \exp(0,002 T_k), \quad (7)$$

$$\alpha^{\min} = A_8 p_k^{0,3}. \quad (8)$$

Из условия подобия потоков при постоянстве приведённой скорости потока $\lambda = \text{const}$ и критерия молекулярного подобия $K = \frac{C_p}{C_v} = \text{const}$ получим формулы приведения к САУ температуры давления газа и расхода воздуха:

$$\frac{T_{np}}{T} = \frac{T_o}{T_n}, \quad \frac{p_{np}}{p} = \frac{p_o}{p_n} \quad \text{и} \quad \frac{G_{\kappa np}}{G_{\kappa}} = \frac{p_o}{p_n} \sqrt{\frac{T_n}{T_o}}, \quad (9)$$

где T_o и p_o соответствуют стандартной атмосфере; T_n и p_n являются текущими значениями параметров атмосферы; индекс «np» означает приведение параметра потока к стандартным атмосферным условиям.

Формулы приведения параметров экологичности и горения получены следующим образом: каждая из зависимостей (1) – (8) записывается для условий стандартной атмосферы и для текущих значений её параметров. Полученные соотношения делятся друг на друга. С учётом формул приведения параметров потока газа (9) после подстановки и преобразования искомые формулы приведения к САУ примут следующий вид:

$$\frac{EI_{NOx np}}{EI_{NOx}} = \left(\frac{p_o}{p_n}\right)^{0,5} \left(\frac{T_o}{T_n}\right)^{0,5} e^{T_{\kappa np} \frac{1}{288} \left(1 - \frac{T_n}{T_o}\right)};$$

$$\frac{EI_{CO np}}{EI_{CO}} = \frac{EI_{HC np}}{EI_{HC}} = \frac{EI_{БП np}}{EI_{БП}} = \left(\frac{p_n}{p_o}\right)^{0,8} \left(\frac{T_n}{T_o}\right)^{1,5} e^{T_{\kappa np} \frac{1}{288} \left(\frac{T_n}{T_o} - 1\right)};$$

$$\frac{SN_{np}}{SN} = \left(\frac{p_o}{p_n}\right)^{0,162} \left(\frac{T_o}{T_n}\right)^{0,198} e^{0,036 \frac{T_{\kappa np}}{288} \left(\frac{T_n}{T_o} - 1\right)};$$

$$\frac{(1-\eta)_{np}}{1-\eta} = \left(\frac{p_o}{p_n}\right)^{-0,8} \left(\frac{T_o}{T_n}\right)^{1,5} e^{T_{\kappa np} \frac{1}{288} \left(\frac{T_n}{T_o} - 1\right)};$$

$$\frac{\alpha_{np}^{\max}}{\alpha^{\max}} = \left(\frac{p_o}{p_n}\right)^{0,62} e^{0,002 \cdot T_{\kappa np} \left(1 - \frac{T_n}{T_o}\right)};$$

$$\frac{\alpha_{np}^{\min}}{\alpha^{\min}} = \left(\frac{p_o}{p_n}\right)^{0,3},$$

где $T_{\kappa np}$ – полная приведённая к САУ температура воздуха за компрессором (на входе в камеру сгорания), расчётная температура воздуха.

Для определения диапазона изменения параметров эмиссии и горения двигателя в зависимости от атмосферных условий выполнен расчёт по полученным формулам приведения. Расчётные, приведённые к САУ значения параметров двигателя ТРДДФ IV поколения взяты следующими:

$$\begin{aligned} T_{\kappa np} &= 760 \text{ К}; & EI_{HC np} &= 1 \frac{\text{г}}{\text{кг}}; & \eta_{np} &= 0,99, \\ EI_{NOx np} &= 21 \frac{\text{г}}{\text{кг}}; & EI_{БП np} &= 2,51 \cdot 10^{-5} \frac{\text{г}}{\text{кг}}; & \alpha_{np}^{\max} &= 20; \\ EI_{CO np} &= 17 \frac{\text{г}}{\text{кг}}; & SN_{np} &= 40\%; & \alpha_{np}^{\min} &= 1,1. \end{aligned}$$

Изменения параметров экологичности и горения двигателя при изменении наружной температуры на земле $T_n = 313, 288$ и 233 К, $p_n = p_o$, $T_{кпр} = 760$ К приведены в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон изменения параметров эмиссии и горения двигателя в зависимости от температуры окружающей среды

Параметр $T_n, \text{К}$	$EI_{\text{NOx}}, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	$EI_{\text{CO}}, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	$EI_{\text{HC}}, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	$EI_{\text{БП}}, \frac{\text{г}}{\text{кг}}$	$SN, \%$	η	α^{max}	α^{min}
313	27,89	11,69	0,69	$1,73 \cdot 10^{-5}$	40,50	0,993	23,19	1,09
288	21,00	17,00	1,00	$2,51 \cdot 10^{-5}$	40,00	0,99	20,00	1,10
233	11,26	39,50	2,32	$5,83 \cdot 10^{-5}$	38,89	0,977	14,72	1,11
Изменение в %	+32,80 -46,38	+132,35 -31,23	+132,40 -31,30	+132,39 -31,23	+1,25 -2,77	+0,30 -1,31	+15,95 -26,42	+0,909 -0,909

Из табл. 1 следует, что влияние атмосферных условий существенно и, следовательно, приведение характеристик экологичности и горения двигателя к САУ необходимо, причём наиболее сильным фактором является отрицательное значение температуры окружающей среды.

Влияние влажности воздуха может быть учтено в формуле приведения эмиссии оксидов азота функцией $e^{0,0188(\alpha_o - \alpha)}$, где $\alpha_o, \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{кг воздуха}}$ для САУ равно нулю; $\alpha, \frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{кг воздуха}}$ – текущее значение абсолютной влажности воздуха.

Для указанных в табл. 1 значений параметров влияние влажности невелико и составляет $\pm 0,2\%$ от приведённой влажности индекса эмиссии оксидов азота.

Таким образом, на основании интегральной математической модели камеры сгорания выведены теоретические формулы приведения характеристик экологичности и горения газотурбинного двигателя к САУ. Показано, что основным фактором влияния атмосферы на параметры двигателя является температура наружного воздуха.

Библиографический список

1. Григорьев А.В, Митрофанов В.А., Рудаков О.А., Саливон Н.Д. Теория камеры сгорания. СПб.: Наука, 2010. 227 с.

FORMULAS OF REDUCING ENGINE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS TO STANDARD ATMOSPHERIC CONDITIONS

© 2017

- A. V. Grigoriev** General Designer;
Klimov JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation; klimov@klimov.ru
- A. A. Kosmatov** Master Student;
Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport, Saint-Petersburg, Russian Federation;
a.kosmatov94@gmail.com
- O. A. Rudakov** Candidate of Science (Engineering), scientific consultant;
Klimov JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation;
klimov@klimov.ru
- A. V. Solovieva** Deputy Chief Designer (advanced research projects);
Klimov JSC, Saint-Petersburg, Russian Federation;
anastasia.v.soloveva@yandex.ru

The article specifies formulas of reducing environmental performance and combustion characteristics of a gas turbine engine, as well as its thermodynamic parameters to the standard atmospheric conditions, with flight altitude $H = 0$ and Mach number $M = 0$: $p_o = 760$ mm Hg. (101.325 kPa), $T_o = 288.15$ K (+15°C), for which the engine technical assignment is specified. The atmospheric conditions determined by the air temperature, pressure and humidity vary over a wide range depending on the season, terrain elevation, and latitude. Therefore, reduction of engine characteristics to the standard atmospheric conditions is necessary and it is based on the similarity theory, i.e. on maintaining constant gas dynamic and geometrical criteria of the combustion chamber. An integral mathematical model of the combustion chamber forms the theoretical basis of the presented reduction method. It is grounded on the results of solving a system of differential equations describing heat, mass (concentration) and momentum transfer specified by the combustion chamber theory. The article shows a significant influence of the ambient air temperature on emission and fuel combustion characteristics as distinct from the influence of other atmospheric parameters.

Formulas of reduction; standard atmospheric conditions; combustion chamber; emission.

Citation: Grigoriev A.V., Kosmatov A.A., Rudakov O.A., Solovieva A.V. Formulas of reducing engine environmental performance and combustion characteristics to standard atmospheric conditions. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 1. P. 18-22. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-18-22

References

1. Grigor'ev A.V, Mitrofanov V.A., Rudakov O.A., Salivon N.D. *Teoriya kamery sgoraniya* [Theory of the combustion chamber]. SPb.: Nauka Publ., 2010. 227 p.