

УДК 621.438

КОРРЕЛЯЦИОННО-РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОКРУЖНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД

© 2013 С. В. Лукачев, В. Ю. Абрашкин, А. М. Ланский, С. Г. Матвеев

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрены вопросы моделирования окружной неравномерности поля температуры газа (ПТГ) на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД. Получена корреляционно-регрессионная зависимость для оценки окружной неравномерности ПТГ с учётом размерности, определены диапазоны её применения.

Корреляционно-регрессионная модель, конструктивные и режимные параметры, неравномерность поля ПТГ, камера сгорания (КС), малоразмерные ГТД.

Как следует из ранее проведённых исследований, форма поля температуры газа в выходном сечении камеры сгорания (КС) определяется геометрическими и режимными параметрами ГТД. К их числу относятся: распределение воздуха и топлива по объёму жаровой трубы, остаточная закрутка потока воздуха на выходе из спрямляющего аппарата центробежного компрессора, относительная длина газосборника и режимные параметры (коэффициент избытка воздуха a_k , температура T_k^* , давление P_k^* за компрессором и приведённая скорость воздуха на выходе из компрессора λ_k) [1-4].

Вышеотмеченные обстоятельства позволили сформулировать следующие условия для статистического анализа:

– для КС малоразмерных ГТД (МГТД) отверстия на наружной обечайке жаровой трубы расположены с учётом величины остаточной закрутки потока воздуха $\varphi_{ост}$ на выходе из спрямляющего аппарата центробежного компрессора;

– режим течения в диффузоре безотрывный;

– относительный шаг между форсунками $t_\phi \leq 1,7$;

– относительный шаг между отверстиями $t_o / h_{ж} = 0,8 \dots 1,0$ (t_o – шаг; $h_{ж}$ – высота жаровой трубы);

– коэффициент избытка воздуха в КС $a_k > 2,5$.

С учётом вышесказанного для Q_j^{max} на выходе из КС можно представить в следующем виде

$$Q_j^{max} = f \left(\frac{F_{kk}}{\sum F_o}; \frac{\sum F_o}{F_{жс}}; a_{\phi p}; l_2; l_k; T_k^* \right), \quad (1)$$

где F_{kk} , $F_{жс}$, $\sum F_o$ – площади кольцевых каналов, жаровой трубы и отверстий, $a_{\phi p}$ – коэффициент избытка воздуха во фронтовом устройстве.

Три первых параметра определяют глубину проникновения струй воздуха в сносящий поток, а величина l_2 – длину, на которой происходит перемешивание.

Результаты исследований по формированию полей температуры в КС МГТД рассматриваемых схем на выходе из неё целесообразно представить в виде следующих зависимостей (рис. 1 и 2):

$$Q_j^{max} = f(F_{kk} / S F_o) \text{ при } F_o / F_{жс} \approx const, \quad (2)$$

$$Q_j^{max} = f(a_{\phi p}) \text{ при } l_r \approx const. \quad (3)$$

Анализ показывает, что для каждого значения $\sum F_o / F_{ж}$ существует соотношение $F_{кк} / \sum F_o$, при котором величина Q_j^{max} минимальна. По мере увеличения отношения $\sum F_o / F_{ж}$ минимум кривой $Q_j^{max} = f(\sum F_o / F_{ж})$ смещается в сторону больших значений $F_{кк} / \sum F_o$.

Величины Q_j^{max} в точках экстремума различаются незначительно (0,16...0,20). При отношениях $F_{кк} / \sum F_o < 1,3$ уровень Q_j^{max} тем выше, чем больше степень «раскрытия» жаровых труб. При $F_{кк} / \sum F_o > 1,3$ (что характерно для КС МГТД) окружная неравномерность Q_j^{max} изменяется незначительно.

Таким образом, для улучшения процесса смешения струй вторичного воздуха и сносящего потока, а следовательно, для выравнивания поля температуры газа при $F_{кк} / \sum F_o < 1,3$ следует увеличивать глубину проникновения струй, выбирая меньшие значения $\sum F_o / F_{ж}$. Отношение $\sum F_o / F_{ж}$ является основным параметром, определяющим потери полного давления и поле температур в КС. Существует оптимальное значение этой величины, при котором окружная неравномерность Q_j^{max} минимальна.

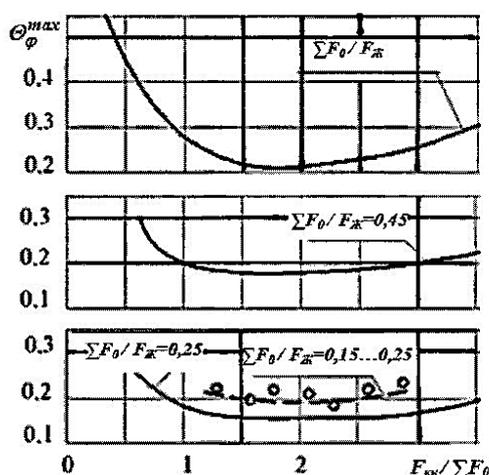


Рис.1. Зависимость Q_j^{max} от $F_{кк} / \sum F_o$ для КС различной размерности: расчёт — ПКС, эксперимент — КС МГТД [1]

При относительно широких кольцевых каналах ($F_{кк} / \sum F_o < 1,3$) уменьшение $\sum F_o / F_{ж}$ приводит к небольшому уменьшению неравномерности поля температуры газа.

Скоростной напор сносящего потока в жаровой трубе зависит от степени подогрева газа в первичной зоне, которая определяется коэффициентом избытка воздуха $a_{фр}$ и полнотой сгорания топлива в ней. Таким образом, глубина проникновения струй воздуха в жаровую трубу, определяющая качество смешения, в первом приближении зависит не только от $\sum F_o / F_{ж}$ и $F_{кк} / \sum F_o$, но и от величины $a_{фр}$.

В действительности, коэффициент избытка воздуха во фронтном устройстве непропорционален коэффициенту избытка воздуха в первичной зоне ($a_{пз}$), так как часть воздуха попадает в зону обратных токов от струй первого пояса отверстий.

На рис. 2 приведены зависимости $Q_j^{max} = f(a_{фр})$ для камер сгорания различных конструктивных схем и размерностей при

$$\frac{F_{кк}}{\sum F_o} = 1,20...3,0;$$

$$\frac{F_o}{F_{ж}} = 0,12...0,35; \frac{I_{жс}}{h_{жс}} \geq 1,8. \quad (4)$$

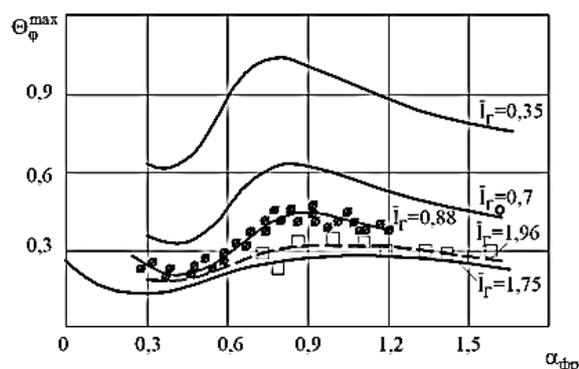


Рис. 2. Зависимость Q_j^{max} от $a_{фр}$ для камер сгорания различной размерности: — полноразмерные камеры сгорания (ПКС), — КС МГТД [1]

Анализ результатов параметрических исследований показывает, что зависимость

$$Q_j^{max} = f\left(\frac{F_{KK}}{\sum F_o}; \frac{\sum F_o}{F_{Ж}}; a_{\phi p}; l_2\right) f(I_K; T_K^*) \quad (5)$$

является нелинейной. Поэтому с целью возможности использования известных методов регрессионного анализа целесообразно её представить в виде

$$Q_j^{max} = Q + DQ, \quad (6)$$

где Q – минимальное значение величины Q_j^{max} , наблюдаемое в КС при $\alpha_{\phi p} = 0,3 \dots 0,5$, а DQ – её приращение, зависящее от $a_{\phi p}$. Первое слагаемое при заданном значении l_2 определяется параметрами $F_{KK}/\sum F_o$ и $\sum F_o/F_{Ж}$, второе – при каждом значении $a_{\phi p}$ тем больше, чем короче газосборник камеры сгорания.

Каждое из слагаемых зависимости может быть преобразовано к линейному виду относительно коэффициентов регрессии, что позволяет использовать метод наименьших квадратов при определении эмпирических коэффициентов. Минимальное значение величины $Q_j^{max} = Q$ определяется тремя безразмерными геометрическими параметрами:

$$F_{KK}/\sum F_o, \quad \sum F_o/F_{Ж} \quad \text{и} \quad \bar{l}_2.$$

Величину Q можно представить в виде произведения функций этих определяющих критериев:

$$Q_j^{max} = f\left(\frac{\sum F_o}{F_{Ж}}\right) \cdot f\left(\frac{F_{KK}}{\sum F_o}\right) \cdot f(l_2). \quad (7)$$

Выполнив соответствующие преобразования, были получены следующие зависимости:

$$f\left(\frac{\sum F_o}{F_{Ж}}\right) = 0,0368 \left[\left(\frac{\sum F_o}{F_{Ж}}\right)^{0,25} - 0,18 \right], \quad (8)$$

$$f\left(\frac{F_{KK}}{\sum F_o}\right) = \left(\frac{F_{KK}}{\sum F_o}\right)^{-2} \exp\left(3,02 \sqrt{\frac{F_{KK}}{\sum F_o}}\right), \quad (9)$$

$$f(\bar{l}_2) = \frac{0,35}{\bar{l}_2^{0,25} - 0,633}. \quad (10)$$

Проведя необходимые преобразования, получим выражение первого слагаемого:

$$Q = \frac{0,0129 \left[\left(\frac{\sum F_o}{F_{Ж}}\right)^{0,25} - 0,18 \right] \cdot \exp\left(3,02 \sqrt{\frac{F_{KK}}{\sum F_o}}\right)}{\left(\frac{F_{KK}}{\sum F_o}\right)^2 (\bar{l}_2^{0,25} - 0,633)}. \quad (11)$$

Предварительная оценка результатов параметрических исследований показала, что величина DQ может быть представлена в виде

$$DQ = b \cdot \exp\left[-c \left(\frac{1}{a_{\phi p}} - \frac{1}{a_0}\right)^2\right], \quad (12)$$

где b , c и a_0 – величины, зависящие от относительной длины газосборника \bar{l}_2 .

Значения коэффициентов, входящих в формулу (12), приведены в табл.1. Они удовлетворительно аппроксимируются следующими зависимостями:

$$b = (1,2 + 0,9\bar{l}_2)^{-2}, \quad (13)$$

$$c = 7,6\bar{l}_2 \cdot \exp(-0,9\bar{l}_2^2), \quad (14)$$

$$a_0 = 0,78 + 0,168\bar{l}_2^{2,18}. \quad (15)$$

Таблица 1. Рассчитанные значения коэффициентов b, c, a_0

I_r	0,875	1,1...1,25	1,96
b	0,256	0,197	0,114
c	3,34	2,59	0,496
A_0	0,906	1,017	1,508
Θ	0,26	0,23	0,19

С их учётом математическую модель определения величины Q_j^{max} , характеризующей максимальную неравномерность поля температуры газа в окружающем

направлении, в диапазоне изменения параметров

$$a_{\phi p} = 0,3...1,5, \quad \bar{I}_2 \geq 0,85;$$

$$\bar{t}_\phi \leq 1,7, \quad \frac{F_{KK}}{SF_0} = 1,2...3, \quad (16)$$

$$\frac{SF_0}{F_{жс}} = 0,12...0,35$$

можно представить в следующем виде:

$$Q_f^{max} = \frac{0,0129 \left[\left(\frac{SF_0}{F_{жс}} \right)^{0,25} - 0,18 \right] \cdot \exp \left(3,02 \sqrt{\frac{F_{KK}}{SF_0}} \right)}{\left(\frac{F_{KK}}{SF_0} \right) (\bar{I}_2^{0,25} - 0,633)} + \frac{\exp \left[-C \left(\frac{1}{a_{\phi p}} - \frac{1}{a_0} \right)^2 \right]}{(1,2 + 0,9\bar{I}_2)^2} + 0,21 \exp(-10a_{\phi p}) \cdot f(T_K^*, I_K) \quad (17)$$

где

$$C = 7,6 \bar{I}_2 \cdot \exp(-0,9 \cdot \bar{I}_2^2), \quad a_0 = 0,78 + 0,168 \bar{I}_2^{2,18}.$$

Влияние режимных параметров T_K^* и I_K можно определить следующим образом:

$$f(T_K^*, I_K) = f(T_K^*) \cdot f(I_K), \quad (18)$$

если представить эти зависимости в безразмерном виде, где

$$f(\bar{T}_K^*) = \frac{(Q_j^{max}) T_K^*}{(Q_j^{max}) T_{K=460}^*}; \quad \bar{T}_K^* = \frac{T_K^*}{460}; \quad (19)$$

$$a) \quad f(\bar{I}_K) = \frac{(Q_j^{max}) I_K}{(Q_j^{max}) I_{Kном}}; \quad \bar{I}_K = \frac{I_K}{I_{Kном}}. \quad (20)$$

Влияние T_K^* и I_K можно представить в следующем виде:

$$f(\bar{T}_K^*) = [5(\bar{T}_K^* - 0,826)^2 + 2,037] \exp(-0,7474 \cdot \bar{T}_K^*) \quad (21)$$

$$f(\bar{I}_K) = [2,864(\bar{I}_K - 1)^2 + 0,124(\bar{I}_K - 1) + 1,0085]. \quad (22)$$

Приведенные зависимости получены при изменении определяющих параметров в диапазонах:

$$\bar{T}_K^* = 0,63...1; \quad \bar{I}_K = 0,6...1,4; \quad G_{впр} = 0,05...0,1.$$

При этом необходимо соблюдать следующие условия:

1) отсутствие неконтролируемых утечек воздуха через щели для установки форсунок, горелок, свечей зажигания и т.д.;

2) камера сгорания выполнена в пределах допусков на изготовление изделия;

3) время наработки КС

$$t_{раб} \leq 40ч;$$

4) коэффициент неравномерности распределения топлива по форсункам $K_m \leq 0,2$.

Влияние T_K^* и I_K можно объяснить следующим образом. Увеличение темпе-

ратуры T_k^* приводит к монотонному уменьшению величины Q_j^{max} в диапазоне $T_k^* = 288...470 K$, что объясняется улучшением качества подготовки топливно-воздушной смеси и уменьшением неравномерности сносящего потока. При дальнейшем увеличении T_k^* влиянием температуры воздуха на входе в камеру, по-видимому, можно пренебречь.

С изменением I_k величина Q_j^{max} достигает минимального значения (при $I_k = I_k^{расч}$). Отклонение от расчетного значения λ_k в 1,6...1,7 раза приводит к увеличению Q_j^{max} в 1,5...1,8 раза, что объясняется перераспределением расходов воздуха по кольцевым каналам. Для полно-размерных камер сгорания в первом приближении принимается $f(\bar{T}_k^*) \approx 1$, $f(\bar{I}_k) \approx 1$.

Таблица 2. Диапазоны применимости разработанной модели расчета Q_j^{max}

Параметр	Размерность	Разработанная модель для КС МГТД	Аналог (ПКС)
\bar{l}_Φ	—	$\leq 1,7$	$\leq 0,8..1,0$
$G_{впр}$	$\frac{\text{кг} \cdot \text{К}^{0,5}}{\text{с} \cdot \text{кПа}}$	0,05...0,1	не указано
K_V	$\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{кПа}^{1,25} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^3}$	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	$\leq 4 \cdot 10^{-4}$
$F_o / F_{жс}$	—	0,12...0,35	0,25...0,4
$F_{кк} / SF_o$	—	1,2...3	0,5...2,5
\bar{l}_2	—	0,875...1,96	0,35...1,75
$\bar{I}_k = \frac{I_k}{I_{kном}}$	—	0,6...1,4	отсутствует
$\bar{T}_k^* = \frac{T_k^*}{460}$	—	0,63...1	отсутствует
$a_{фр}$	—	0,3...1,5	0,02...1,6

Таким образом, в результате проведенных исследований расширен диапазон применения корреляционно-регрессионной модели оценки окружной неравномерности поля температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД (табл.2), которая так же, как и аналог, определяется геометрией изделия и величиной $\alpha_{фр}$, но отличается степенью влияния относительных параметров ($SF_{кк}/F_o$, $SF_o/F_{жс}$, \bar{l}_2) на Q_j^{max} . Кроме того, данная модель позволяет учитывать влияние режимных параметров I_k и T_k^* .

Библиографический список

1. Безменов, В.Я. Исследование влияния конструктивных параметров зоны смещения кольцевой камеры сгорания ГТД на неравномерность полей температур в выходном сечении (на моделях) [Текст] / В.Я. Безменов, И.И. Онищик // Тр. ЦИАМ. – 1971. – № 488. – 18 с.
2. Безменов, В.Я. Исследование возможностей выравнивания полей температуры газа в модели зоны смещения камеры сгорания ГТД [Текст] / В.Я. Безменов, И.И. Онищик // Теплоэнергетика. – 1975. – № 2. – С. 46-49.

3. Полякова, М.В. Статистический анализ и обобщённые зависимости неравномерности полей температуры газа перед турбиной от основных параметров камер сгорания ГТД [Текст] / М.В. Полякова // Тр. ЦИАМ. – 1980. – № 891. – 44 с.

4. Полякова, М.В. Связь неравномерности поля температуры газа на выходе из кольцевых камер сгорания ГТД с потерями полного давления в них [Текст] / М.В. Полякова // Тр. ЦИАМ. – 1982. – № 987. – 10 с.

CORRELATION AND REGRESSION MODEL FOR THE ASSESSMENT OF CIRCULAR NON-UNIFORMITY OF THE GAS TEMPERATURE FIELD AT THE OUTLET OF SMALL GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2013 S. V. Lukachev, V. Y. Abrashkin, A. M. Lansky, S. G. Matveev

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The paper deals with the problems of modeling circular non-uniformity of the gas temperature field (GTF) at the outlet of small gas turbine engine combustion chambers.. Correlation and regression dependence for estimating circular non-uniformity of the GTF is obtained with regard for the dimensions, the range of its application is identified.

Correlation and regression model, design and operational parameters, non-uniform field of GTF, combustion chamber (CC); small gas turbine engines.

Информация об авторах

Лукачев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: lucachev@ssau.ru. Область научных интересов: физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Абрашкин Валерий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: walerisgau@mail.ru. Область научных интересов: физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Ланский Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: lansky@ssau.ru. Область научных интересов: физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Матвеев Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pfu@ssau.ru. Область научных интересов: физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

Lukachev Sergey Victorovitch, doctor of technical science, professor, Honored Worker of Higher Education, head of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research Uni-

versity). E-mail: lucachev@ssau.ru. Area of research: physics and modeling of the combustion process in combustion chambers of gas turbine engines.

Abrashkin Valery Yuryevitch, associate professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: walerisgau@mail.ru. Area of research: physics and modeling of the combustion process in combustion chambers of gas turbine engines.

Lansky Anatoly Mikhailovitch, candidate of technical science, assistant professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: lansky@ssau.ru. Area of research: physics and modeling of the combustion process in combustion chambers of gas turbine engines.

Matveev Sergey Gennadyevitch, candidate of technical science, assistant professor of the department of heat engineering and heat engines, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: pfu@ssau.ru. Area of research: physics and modeling of the combustion process in combustion chambers of gas turbine engines.