DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.01

УДК 621.454

В.М. Кофман

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ АВТОНОМНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА КАМЕРНОМ СТЕНДЕ

Рассмотрены основные этапы обработки результатов испытаний камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) на камерных стендах и используемые на этих этапах математические модели для расчета показателей эффективности работы камеры (коэффициентов восстановления полного давления и полноты сгорания). Описаны основные положения разработанной программы на ЭВМ, служащей для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков в каналах ГТД по 12 способам. Выполнена обработка результатов испытаний камеры сгорания ГТД на камерном стенде при наличии на входе в испытываемую камеру камеры подогрева. Проведена расчетная оценка величин коэффициентов восстановления полного давления и полноты сгорания при использовании для обработки результатов измерений параметров неравномерных потоков газа различных способов осреднения. Выполнена оценка влияния влажности воздуха, подаваемого на вход испытываемой камеры, на величину коэффициента полноты сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, неравномерный газовый поток, интегральные характеристики потока, способы осреднения, средние параметры, коэффициент восстановления полного давления, коэффициент полноты сгорания, влагосодержание.

V.M. Kofman

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL AND ESTEMATED DETERMINATION OF PERFORMANCE INDICATORS OF THE MAIN GTE COMBUSTION CHAMBERS BASED ON THE RESULTS OF THEIR AUTONOMOUS TESTS ON THE CHAMBER STANDS

The article describes the main stages of processing the results of the GTE combustion chamber tests on the chamber stands and mathematical models used in these stages for calculating chamber performance (total pressure recovery coefficient and combustion efficiency). The key elements of the

computer program averaging the parameters of non-uniform air and gas flows in GTE ducts using twelve methods was considered. It was processed the GTE combustion chamber test results on the chamber stand with a heating chamber at the inlet of the test chamber. The total pressure recovery coefficient and combustion efficiency were calculated with use of different ways of averaging measurement results of non-uniform gas flows. The estimation of influence of the humidity of the air supplied to the inlet of the test chamber on the combustion efficiency was performed.

Keywords: combustion chamber, non-uniform gas flow, integral flow characteristics, averaging means, average parameters, total pressure recovery coefficient, combustion efficiency coefficient, moisture content.

Постановка задачи

В процессе создания и доводки авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), в связи со сложностью физико-химических, газодинамических и тепловых процессов, имеющих место в основных камерах сгорания (КС) двигателя, выполняется большой объем их доводочных испытаний. К ним, в частности, относятся автономные испытания полноразмерных камер на камерных стендах.

В процессе автономных испытаний камер сгорания определяются их гидравлические характеристики $\sigma_{\text{КС}} = f(\lambda_{\text{к}})$, характеристики полноты сгорания $\eta_{\text{г}} = f(\alpha_{\text{КС}})$, коэффициенты радиальной и окружной неравномерности температуры торможения газа на выходе из камеры, эмиссия вредных веществ. По результатам испытаний выполняется оценка как достигнутого уровня показателей эффективности работы камеры сгорания, так и влияния на эти показатели вводимых конструктивных усовершенствований.

Поскольку в общем случае поля параметров рабочего тела во входном и выходном сечениях камеры являются неравномерными, то для определения коэффициентов восстановления полного давления $\sigma_{\text{КС}}$ и полноты сгорания $\eta_{\text{г}}$ используются средние величины параметров неравномерных воздушного и газового потоков, полученные при обработке результатов измерений путем применения того или иного способа осреднения.

Определение величин средних полных давлений неравномерных воздушного и газового потоков в сечениях на входе $p_{\text{к}}^*$ и выходе $p_{\text{КС}}^*$, необходимых для расчета коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$, и величин средних температур торможения неравномерных воздушных и газовых потоков в сечениях на входе $T_{\text{к}}^*$ и выходе $T_{\text{КС}}^*$ из камеры, необходимых для расчета коэффициента $\eta_{\text{г}}$, может быть выполнено на 1-м этапе обра-

ботки результатов автономных испытаний. На 2-м этапе обработки результатов автономных испытаний камеры сгорания рассчитываются величины коэффициентов $\sigma_{\text{КС}}$ и $\eta_{\text{Г}}$.

Как известно, при решении задачи осреднения и при переходе от действительного неравномерного потока к осредненному каноническому потоку возможны потери некоторых свойств действительного потока, что может приводить к погрешностям расчета величин средних полных давлений и температур торможения и, как следствие, к погрешности расчета, соответственно, коэффициентов $\sigma_{\text{КС}}$ и $\eta_{\text{Г}}$. В связи с этим при обработке результатов автономных испытаний камеры величины средних параметров неравномерных воздушных и газовых потоков на входе и выходе из камеры должны рассчитываться с применением обоснованного способа осреднения с помощью специализированных математических моделей (ММ) и программ на ЭВМ.

При расчете коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$ в качестве исходных данных используются величины средних полных давлений неравномерных воздушного и газового потоков в сечениях на входе $p_{\text{К}}^*$ и на выходе $p_{\text{КС}}^*$ из камеры сгорания.

При расчете коэффициента $\eta_{\text{Г}}$ в качестве исходных данных (кроме средних температур торможения на входе и выходе из камеры $T_{\text{К}}^*$ и $T_{\text{КС}}^*$) используются измеренные при испытаниях величины расхода топлива в камеру сгорания, расхода воздуха на входе в камеру, расхода воздуха, отбираемого из камеры для имитации охлаждения деталей турбины.

Воздух, подаваемый на вход испытываемой камеры, отбирается из компрессора газогенератора воздуха, которым может служить технологический ГТД. В случае если температура торможения воздуха на выходе из компрессора технологического ГТД не соответствует уровню температуры торможения воздуха на входе в камеру сгорания на выбранном режиме ее работы, на входе в испытываемую камеру устанавливается камера подогрева, в качестве которой может служить полноразмерная камера сгорания выполненного ГТД. В камере подогрева организуется процесс горения с подачей в нее топлива и сжатого воздуха из компрессора технологического ГТД. При этом варианте испытания камеры сгорания в сечении на выходе из камеры подогрева,

с помощью соответствующих приемников, измеряются статическое давление, поля температуры торможения и полного давления газа и, далее, с помощью ММ и программы осреднения параметров рассчитываются величины средних полных давлений и температур торможения смеси воздуха с продуктами сгорания на входе в испытываемую камеру (на выходе из камеры подогрева). В процессе испытаний измеряется расход топлива, подаваемый в камеру подогрева.

Следует отметить, что при осреднении параметров неравномерных воздушных и газовых потоков и при проведении расчетов коэффициентов $\sigma_{\text{КС}}$ и $\eta_{\text{Г}}$ должно учитываться изменение теплофизических свойств воздуха и газа в зависимости от температуры, состава смеси воздуха и газа, влажности воздуха на уровне струек газа и средних параметров.

Таким образом, для экспериментально-расчетного определения коэффициентов $\sigma_{\text{КС}}$ и $\eta_{\text{Г}}$ в камере сгорания при ее автономных испытаниях необходимы:

- специализированные ММ и программы на ЭВМ для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков на входе и выходе из камеры;
- специализированные ММ и программы для расчета коэффициента полноты сгорания $\eta_{\text{Г}}$ в камере сгорания как при наличии, так и при отсутствии на ее входе камеры подогрева.

Анализ работ, посвященных осреднению параметров дозвуковых неравномерных воздушных и газовых потоков при обработке результатов испытаний ГТД и их узлов, показал, что в большинстве случаев методики осреднения базируются на положениях, изложенных в работах Л.И. Седого и Г.Г. Черного [1]. В соответствии с этими положениями, в зависимости от решаемой задачи, выбирается способ осреднения, при котором в одномерном осредненном каноническом потоке сохраняются три важных для решаемой задачи интегральных характеристики потока из числа таких характеристик, как поток массы G , поток полного теплосодержания I^* , поток импульса Φ , поток энтропии S , поток теплосодержания I , поток кинетической энергии E .

Анализ работ по применению различных способов осреднения для обработки полей параметров неравномерных газовых потоков также показал, что:

– к настоящему времени отсутствуют универсальные ММ и программы на ЭВМ для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков в каналах ГТД по различным способам;

– не установлены обоснованные способы осреднения, при использовании которых в одномерном осредненном каноническом газовом потоке сохраняются величины всех шести интегральных характеристик (G, I, I^*, Φ, S, E) одномерного действительного неравномерного потока;

– отсутствуют программы расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания при ее автономных испытаниях при наличии на ее входе камеры подогрева и с учетом изменения теплофизических свойств воздуха и газа в зависимости от температуры, состава смеси газа и влажности воздуха, подаваемого на вход в камеру;

– отсутствуют расчетные оценки влияния влажности воздуха, подаваемого на вход в камеру сгорания ГТД, на величину коэффициента полноты сгорания [2].

Учитывая вышеуказанные результаты анализа существующего положения по применяемым при обработке результатов автономных испытаний камер способам осреднения, по ММ и программам осреднения неравномерных воздушных и газовых потоков, по ММ и программам для расчета коэффициента полноты сгорания, разработаны соответствующие ММ и программы, которые описаны ниже.

**ММ и программа на ЭВМ для осреднения параметров
неравномерных воздушных и газовых потоков
и установление обоснованного способа осреднения**

Для расчета по результатам измерений полей параметров на входе и выходе из камеры сгорания величин средних полных давлений и температур торможения разработана ММ [2] и универсальная программа для ЭВМ [3]. Программа позволяет выполнять осреднение параметров неравномерных газовых и воздушных потоков в каналах ГТД по 12 способам: по площади F , по массовому расходу G , а также с сохранением в осредненном каноническом потоке таких же, как и в действительном неравномерном потоке, величин трех интегральных характеристик потока: G, I, S ; G, I, Φ ; Φ, S, I ; E, G, I ; E, G, Φ ; E, G, S ; G, Φ, S ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ ; G, I^*, E , где G – массовый

расход; I – поток теплосодержания; I^* – поток полного теплосодержания; Φ – поток полного импульса; S – поток энтропии; E – поток кинетической энергии. При расчетах предполагается, что коэффициенты избытка воздуха в элементарных струйках в заданном сечении имеют одинаковое значение.

Учет теплофизических свойств воздуха и газа в программе [3] осуществляется на уровне струек и средних параметров согласно работе [4]. Программа составлена на языке программирования Compaq Visual Fortran Version 6.6. Осреднение параметров по каждому из способов осреднения производится по соответствующей подпрограмме.

Интегральные характеристики действительного неравномерного потока воздуха и газа (G, I, I^*, Φ, S, E) рассчитываются по формулам

$$G = \iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$I = \iint_D c_p(T) T(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$I^* = \iint_D c_p(T^*) T^*(r, \varphi) \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$\Phi = \iint_D \left(p(r, \varphi) + \rho(r, \varphi) W^2(r, \varphi) \right) r dr d\varphi,$$

$$S = R_r \iint_D \ln \left[\frac{T(r, \varphi)^{\frac{k(r, \varphi)}{k(r, \varphi)-1}}}{p(r, \varphi)} \right] \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi,$$

$$E = \iint_D \frac{1}{2} \rho(r, \varphi) W^3(r, \varphi) r dr d\varphi.$$

Величина показателя адиабаты $k(r, \varphi)$ в уравнении потока энтропии в каждой из струек потока определяется по средней температуре в струйке

$$T_{cp}(r, \varphi) = \frac{T^*(r, \varphi) + T(r, \varphi)}{2}.$$

Кроме интегральных характеристик неравномерного потока в программе рассчитываются среднемассовая скорость действительного потока

$$c_m = \frac{\iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi}{\iint_D \rho(r, \varphi) r dr d\varphi}$$

и коэффициент поля τ_r [5], величина которого характеризует степень неравномерности поля скоростей в потоке

$$\tau_r = \iint_D \rho(r, \varphi) r dr d\varphi \frac{\iint_D \rho(r, \varphi) W^2(r, \varphi) r dr d\varphi}{\left[\iint_D \rho(r, \varphi) W(r, \varphi) r dr d\varphi \right]^2},$$

где D – область на плоскости в полярной системе координат, $D = \{(\varphi, R) \mid \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_M, R_1 \leq R \leq R_N\}$; $\overline{\varphi}$, $\overline{R}$ – массивы углов и радиусов, на которых осуществляется измерение параметров p_i, p_i^*, T_i^* в элементарных струйках, $\overline{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M)$, $\overline{R} = (R_1, R_2, \dots, R_N)$; ρ, W – плотность и скорость воздуха, газа; φ, r – переменные интегрирования (угол и радиус).

В случае равномерного поля скоростей $\tau_r = 1$, в случае неравномерного – $\tau_r > 1$.

При осреднении параметров неравномерных газовых потоков по площади и по массовому расходу расчет средних статического, полного давлений и температуры торможения осуществляется с помощью известных интегральных соотношений [2].

Осесимметричный цилиндрический (незакрученный) поток газа имеет три степени свободы – p, W, T [1]. Следовательно, при осреднении таких потоков можно выдержать равенство величин только трех интегральных характеристик канонического осредненного потока величинам соответствующих интегральных характеристик действительного неравномерного потока. Таким образом, при осреднении параметров по способам с сохранением в каноническом осредненном потоке трех из шести перечисленных выше интегральных характеристик

действительного потока решается система соответствующих трех из следующих шести уравнений:

$$G = \bar{W}F \frac{\bar{p}}{R_r \bar{T}} = \frac{m \bar{p}^* q(\bar{\lambda}) F}{\sqrt{\bar{T}^*}},$$

$$I = G c_p (\bar{T}) \bar{T},$$

$$I^* = G c_p (\bar{T}^*) \bar{T}^*,$$

$$\Phi = G \bar{W} + \bar{p} F = \frac{k+1}{2k} G a_{кр} z(\bar{\lambda}),$$

$$S = R_r G \ln \left[\frac{\bar{T}^{\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}} \right] = R_r G \ln \left[\frac{\bar{T}^{*\frac{k}{k-1}}}{\bar{p}^*} \right],$$

$$E = \frac{G}{2} W^2,$$

и определяются средние параметры $\bar{p}, \bar{T}, \bar{W}$ или $\bar{p}^*, \bar{T}^*, \bar{\lambda}$ канонического потока. Далее из трех оставшихся уравнений определяются интегральные характеристики осредненного канонического потока, величины которых при данном способе осреднения могут не сохраняться равными величинам интегральных характеристик действительного неравномерного потока. При способе осреднения с сохранением Φ, S, I , из-за наличия в трех уравнениях четырех неизвестных, предполагается, что величина расхода G известна. Результаты, полученные при этом способе осреднения, рассматриваются для сведения.

С помощью разработанных ММ [2] и программы [3], на основе экспериментальных данных, полученных при испытаниях входных устройств, вентиляторов, компрессоров, камер сгорания и турбин ГТД, выполнены численные исследования по установлению наиболее обоснованных способов осреднения. Исследования выполнены для диапазонов изменения в потоках на входе и выходе из узлов приведенных среднемассовых скоростей $\lambda_m = 0,065 \dots 0,72$, коэффициентов поля $\tau_r = 1,031 \dots 1,36$, коэффициентов неравномерности температуры тор-

можения потоков воздуха $(T_{\max}^*/T_{\min}^*) = 1...1,088$, коэффициентов неравномерности температуры торможения потоков газа $T_{\Gamma\max}^*/T_{\Gamma\min}^* = 1,56...1,8$, при коэффициенте окружной неравномерности полного давления воздуха $p_{\max}^*/p_{\min}^* = 1,11...1,24$. Установлено, что наиболее обоснованным способом осреднения параметров дозвуковых неравномерных воздушных и газовых потоков для экспериментально-расчетного определения КПД узлов ГТД является способ осреднения по массовому расходу [2]. При этом способе величины интегральных характеристик G, I, I^*, Φ, S, E осредненного потока и его среднее статическое давление равны величинам соответствующих параметров действительного неравномерного потока.

ММ и программа на ЭВМ для расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания по результатам автономных испытаний камеры на камерном стенде

На втором этапе обработки результатов автономных испытаний камеры сгорания ГТД на камерном стенде (после операции осреднения параметров неравномерных воздушного и газового потоков на входе и выходе из камеры) по величинам средних полных давлений в этих сечениях p_k^* и p_{KC}^* выполняется непосредственный расчет коэффициента восстановления полного давления $\sigma_{KC} = p_{KC}^*/p_k^*$.

Также на втором этапе обработки результатов автономных испытаний камеры сгорания ГТД на камерном стенде (после операции осреднения параметров неравномерных воздушного и газового потоков на входе и выходе из камеры) по величинам средних температур торможения в этих сечениях и другим измеренным в процессе испытаний параметрам (расхода воздуха, расхода топлива) с помощью специальных ММ и программ на ЭВМ выполняется расчет коэффициента полноты сгорания η_r в испытываемой камере сгорания.

При автономных испытаниях камеры сгорания на камерном стенде на входе в испытываемую камеру сгорания может устанавливаться камера подогрева, в которой организуется процесс горения. При этом на вход испытываемой камеры вместо воздуха подается газ, имеющий относительно бедный состав смеси воздуха и продуктов сго-

рания и повышенную, по сравнению с воздухом, температуру торможения.

Для расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания по результатам ее автономных испытаний на камерном стенде разработаны три специальные ММ и программы на ЭВМ:

1. ММ и программа расчета коэффициента полноты сгорания при испытаниях камеры с камерой подогрева (учет теплофизических свойств газа и воздуха выполняется на основе работы Я.Т. Ильичева [6]).

Для расчета коэффициента η_r в камере сгорания согласно исследованию [6] при работе камеры на сухом воздухе и с камерой подогрева на входе была разработаны ММ и программа на ЭВМ в среде Excel. Алгоритм расчета коэффициента η_r в камере сгорания в этом случае сводится к следующему.

По результатам измерений при испытаниях камеры расхода топлива и воздуха, подаваемых в камеру подогрева, по измеренным величинам температуры торможения воздуха, подаваемого в камеру подогрева и температуры газа на выходе из камеры подогрева, определяется величина коэффициента η_r в камере подогрева с помощью уравнения баланса теплоты [6]

$$q_{т.КСп} = \frac{G_{т.КСп}}{G_{в.КСп}} = \frac{c_{pв}T_{г}^* - c_{pв}T_{к}^*}{H_u\eta_r - nT_{г}^* + nT_0}$$

по формуле

$$\eta_r = \frac{c_{pв}T_{г}^* - c_{pв}T_{к}^* + q_t n T_{г}^* - q_t n T_0}{H_u q_t},$$

где $c_{pв}T_{к}^*$ – теплосодержание воздуха на входе в камеру подогрева; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $nT_{г}^*$ – теплосодержание топлива при температуре газа $T_{г}^*$; nT_0 – теплосодержание топлива при температуре $T_0 = 293,15$ К, $nT_0 = 453$ кДж/кг; $c_{pв}T_{г}^*$ – теплосодержание газа на выходе из камеры подогрева. Коэффициент

избытка воздуха в камере подогрева рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{КСп}} = \frac{G_{\text{ВКС}}}{G_{\text{тКП}} L_0}, \text{ где } L_0 - \text{стехиометрический коэффициент.}$$

При расчете коэффициента η_r в камере подогрева используется средняя температура торможения газа на выходе из камеры подогрева, полученная при способе осреднения по массовому расходу. Обозначим параметры в камере подогрева индексом «1», параметры в испытываемой камере индексом «2». Относительная величина расхода газа, отбираемого из кольцевого канала камеры между корпусом камеры и жаровой трубой для имитации отбора воздуха на охлаждение турбины, характеризуется коэффициентом отбора

$$K_{\text{г.отб}} = \frac{G_{\text{г.отб}}}{G_{\text{г1}}} = \frac{G_{\text{в.отб}} + G_{\text{т1.отб}}}{G_{\text{г1}}} = \frac{G_{\text{в.отб}} + G_{\text{т1.отб}}}{G_{\text{в}\Sigma} + G_{\text{т1}}},$$

$$\text{где } G_{\text{г1}} = G_{\text{в}\Sigma} + G_{\text{т1}}; \quad K_{\text{т.отб}} = \frac{G_{\text{т1.отб}}}{G_{\text{т1}}}; \quad K_{\text{в.отб}} = \frac{G_{\text{в.отб}}}{G_{\text{в}\Sigma}};$$

$$K_{\text{в.отб}} = K_{\text{т.отб}} = K_{\text{г.отб}} = K_{\text{отб}}.$$

В уравнение баланса теплоты испытываемой камеры сгорания, которое имеет вид

$$\begin{aligned} G_{\text{т2}} H_u \eta_{\text{т2}} + G_{\text{т2}} n T_0 + G_{\text{в}\Sigma} (1 - K_{\text{отб}}) c_{\text{рв}} T_{\text{г1}}^* + G_{\text{т1}} (1 - K_{\text{отб}}) n T_{\text{г1}}^* = \\ = G_{\text{в}\Sigma} (1 - K_{\text{отб}}) c_{\text{рв}} T_{\text{г2}}^* + G_{\text{т2}} n T_{\text{г2}}^* + G_{\text{т1}} (1 - K_{\text{отб}}) n T_{\text{г2}}^*, \end{aligned}$$

входят величины следующих параметров: $G_{\text{т2}} H_u \eta_{\text{т2}}$ – количество теплоты, выделившееся в камере сгорания; $G_{\text{т2}} n T_0$ – полное теплосодержание топлива, подаваемого в камеру при температуре $T_0 = 293,15 \text{ K}$; $G_{\text{в}\Sigma} (1 - K_{\text{отб}}) c_{\text{рв}} T_{\text{г1}}^*$ – полное теплосодержание воздуха на входе в камеру при температуре газа $T_{\text{г1}}^*$ на выходе из камеры подогрева; $G_{\text{т1}} (1 - K_{\text{отб}}) n T_{\text{г1}}^*$ – полное теплосодержание топлива, подаваемого в камеру подогрева, при температуре газа $T_{\text{г1}}^*$ на выходе из камеры подогрева; $G_{\text{в}\Sigma} (1 - K_{\text{отб}}) c_{\text{рв}} T_{\text{г2}}^*$ – полное теплосодержание воздуха на выходе из камеры сгорания при температуре газа $T_{\text{г2}}^*$; $G_{\text{т2}} n T_{\text{г2}}^*$ – полное

теплосодержание топлива, подаваемого в камеру, при температуре газа $T_{г2}^*$; $G_{г1}(1 - K_{отб})nT_{г2}^*$ – полное теплосодержание топлива, подаваемого в камеру подогрева, на выходе из камеры сгорания при температуре газа $T_{г2}^*$.

Из уравнения баланса теплоты может быть определен коэффициент полноты сгорания в камере сгорания по формуле

$$\eta_{г2} = \left[G_{в\Sigma}(1 - K_{отб})c_{рв}T_{г2}^* + G_{г2}nT_{г2}^* + G_{г1}(1 - K_{отб})nT_{г2}^* - G_{г2}nT_0 - \right. \\ \left. - G_{в\Sigma}(1 - K_{отб})c_{рв}T_{г1}^* - G_{г1}(1 - K_{отб})nT_{г1}^* \right] / (G_{г2}H_u).$$

Величина коэффициента избытка воздуха на выходе из испытываемой камеры рассчитывается по формуле

$$\alpha_{КС} = \frac{G_{в\Sigma}(1 - K_{отб})}{[G_{г1}(1 - K_{отб}) + G_{г2}]L_0}.$$

2. ММ и программа расчета коэффициента полноты сгорания при испытаниях камеры с камерой подогрева (учет теплофизических свойств газа и воздуха выполняется на основе работы Л.Н. Дружинина, Л.И. Швеца и Н.С. Малининой [4]).

Для повышения точности расчета коэффициента полноты сгорания в камере при ее автономных испытаниях с камерой подогрева на входе и учета при расчете влияния влажности атмосферного воздуха на коэффициент полноты сгорания разработана соответствующая ММ, реализованная в виде программы для ЭВМ [7]. Программа составлена на языке программирования Compaq Visual Fortran Version 6.6. Учет теплофизических свойств рабочего тела в программе производится согласно исследованию [4]. Расчет коэффициента полноты сгорания в камере подогрева в программе выполняется по формуле

$$\eta_{г1} = \frac{\Delta i_{г1}^* - \Delta i_{к1}^* + \Delta i_{г1}^* q_{г1} - i_{т0} q_{г1}}{q_{г1} H_u a_{г1}}.$$

Расчет коэффициента полноты сгорания в камере сгорания (при ее испытании с камерой подогрева) выполняется по формуле

$$\eta_{г2} = \frac{\Delta i_{г2}^* G_{г2} - \Delta i_{г1}^* G_{г1}(1 - K_{отб}) - i_{т0} G_{г2}}{G_{г2} H_u a_{г2}}.$$

При $\alpha_{KC} \geq 1$ $a_t = 1$, при $\alpha_{KC} < 1$ $a_t = \alpha_{KC}$ [4].

Приращения энтальпий рассчитываются по формулам

$$\Delta i_{r1}^* = \int_{T_0}^{T_{r1}^*} c_p(T) dT, \quad \Delta i_k^* = \int_{T_0}^{T_k^*} c_p(T) dT, \quad \Delta i_{r2}^* = \int_{T_0}^{T_{r2}^*} c_p(T) dT,$$

где $T_0 = 293,15$ К, Δi_{t0} – энтальпия топлива, отсчитанная от $T_0 = 293,15$ К (для углеводородного топлива принято, что $\Delta i_{t0} = 0$).

Блок-схема программы [7] для расчета коэффициента полноты сгорания в камере по результатам ее автономных испытаний и при наличии на входе камеры подогрева приведена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема программы расчета коэффициента полноты сгорания в основной камере сгорания ГТД по результатам ее автономных испытаний на камерном стенде с камерой подогрева воздуха на входе

3. ММ и программа расчета коэффициента полноты сгорания при испытаниях камеры без камеры подогрева (учет теплофизических свойств газа и воздуха выполняется на основе работы [4]).

Для расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания ГТД при ее автономных испытаниях на камерном стенде (при отсутствии на входе в камеру камеры подогрева) также была разработана соответствующая ММ, реализованная в виде программы для ЭВМ, которая составлена на языке программирования Compaq Visual Fortran Version 6.6 [8]. Учет теплофизических свойств рабочего тела в программе [8] производится согласно исследованию [4]. Расчет коэффициента полноты сгорания в камере сгорания при ее автономных испытаниях без камеры подогрева выполняется по формуле

$$\eta_{\Gamma} = \frac{\Delta i_{\Gamma}^{*} - \Delta i_{\kappa}^{*} + \Delta i_{\Gamma}^{*} q_{\Gamma} - i_{\Gamma 0} q_{\Gamma}}{q_{\Gamma} H_{\text{и}} a_{\Gamma}}.$$

**Определение коэффициентов восстановления
полного давления и полноты сгорания в основной камере
сгорания ГТД по результатам ее автономных испытаний
на камерном стенде по параметрам неравномерных
газовых потоков**

При обработке результатов испытаний основной камеры сгорания ГТД «Л» на камерном стенде (в процессе которых было произведено измерение полей неравномерных параметров газовых потоков на входе и выходе из камеры) выполнено апробирование разработанных ММ осреднения параметров неравномерных газовых потоков и ММ для расчета коэффициента полноты сгорания.

**Общие характеристики стенда
для испытаний камер сгорания**

Испытания камер сгорания ГТД «Л» на камерном стенде производятся перед сборкой этого двигателя и поставкой его на предъявительские испытания. Схема камерного стенда описана в работе [9] и приведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема стенда для автономных испытаний основных камер сгорания ГТД: 1 – генератор сжатого воздуха; 2 – трубопровод; 3 – регулировочная заслонка; 4 – мерный участок; 5 – камера сгорания подогрева; 6 – переходный конфузорный участок; 7 – испытываемая камера сгорания; 8 – механизм кругового замера; 9 – участок измерения параметров газа на входе в испытываемую камеру сгорания; 10 – дроссельная заслонка; 11 – переходник охлаждаемый; 12 – дроссель выходной; 13 – выхлопная труба; 14 – мерный участок; 15 – трубопровод отвода воздуха (газа), отбираемого из камеры сгорания; 16 – участок измерения параметров газа на выходе из камеры сгорания; 17 – устройство для впрыска воды

В состав стенда входит генератор воздуха 1, в качестве которого используется авиационный ГТД. Из компрессора генератора отбирается сжатый воздух, подаваемый, через дроссельную заслонку и участок для измерения расхода воздуха, в камеру подогрева и далее в испытываемую камеру сгорания. В камере подогрева, которая является полно-размерной камерой сгорания ГТД, происходит подогрев воздуха за счет подачи топлива и организации в камере процесса горения. В результате в камере подогрева происходит увеличение температуры воздуха до величины температуры торможения бедного по составу смеси газа, равной температуре торможения воздуха на выходе из компрессора (на входе в камеру сгорания) ГТД «Л» на максимальном режиме его работы.

Газ, образовавшийся в камере подогрева, поступает в испытываемую камеру сгорания, в которую подается топливо и где происходит подогрев газа до уровня температуры, примерно равной температуре торможения газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» на его максимальном режиме. Узлы камерного стенда, расположенные на выходе из испытываемой камеры, имеют водяное охлаждение.

Из-за ограничений по уровню параметров воздуха, отбираемого от генератора сжатого воздуха, испытания проводятся при пониженных величинах расхода и полного давления воздуха, поступающего в камеру подогрева и в испытываемую камеру сгорания. При этом обеспечиваются величины температуры торможения, приведенной скорости газа на входе в испытываемую камеру $\lambda_{\text{вх КС}}$ и коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{КС}}$ на выходе из камеры, имеющие место на максимальном режиме работы ГТД «Л».

В процессе испытаний камеры «Л» для имитации отбираемого из нее на охлаждение деталей турбины воздуха производится отбор бедного по составу смеси газа из кольцевого канала между корпусом камеры и жаровой трубой испытываемой камеры.

Регулировка и обеспечение заданных величин вышеуказанных параметров при заданном режиме работы генератора воздуха обеспечивается в процессе испытаний путем изменения расхода топлива в камеру подогрева и в камеру сгорания «Л». Обеспечение заданных величин параметров также производится путем регулировки положений дроссельных заслонок на входе в камеру подогрева, на выходе из выхлопной трубы камерного стенда и в трубопроводе отвода отбираемого из камеры бедного по составу смеси газа.

В процессе испытаний камеры «Л» производится измерение:

– температуры торможения газа на входе в камеру «Л» $(T_{\text{вх КС}}^*)$

с помощью расположенных при различных угловых положениях четырех гребенок «А1», «Б1», «В1» и «Г1» с тремя термопарами на каждой гребенке;

– полного давления газа на входе в камеру «Л» $(p_{\text{вх КС}}^*)$ с помощью одной пятиточечной гребенки;

– статического давления газа на входе в камеру «Л» $(p_{\text{вх КС}})$

с помощью трех приемников, расположенных на корпусе камеры;

– расхода топлива, подаваемого в камеру подогрева;

– расхода топлива, подаваемого в камеру «Л»;

– температуры торможения газа на выходе из камеры «Л» с помощью устройства кругового замера, на котором установлены две гребенки «А» и «Б» с термопарами (по пять термопар на каждой гребенке) [9] (рис. 3 и 4).

Рис. 3. Схема установки гребенки «А» для измерения температуры газа

Рис. 4. Схема установки гребенки «Б» для измерения температуры газа

В радиальном направлении термопары устанавливаются с неравномерным шагом для обеспечения их расположения в центрах равновеликих кольцевых площадей. Измерение температуры газа производится на 10 радиусах при 112 угловых положениях устройства кругового замера. Погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,3 \%$ от измеряемой величины¹.

Расход воздуха, подаваемый в камеру подогрева от генератора воздуха, и расход газа, отбираемый из испытываемой камеры «Л», измеряются с помощью стандартных сужающих устройств согласно ГОСТу².

¹ ОСТ 1 01021–93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования. 18 с.

² ГОСТ 8.586.1–2005. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. М.: Стандартинформ, 2007. 52 с.

Поскольку полное давление газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» при испытаниях на камерном стенде не измерялось, то для выполнения расчетов по осреднению параметров использовалась принятая при ряде допущений и полученная при холодной продувке камеры «Л» зависимость изменения относительного полного давления от относительной высоты канала жаровой трубы

$$\frac{p_{\Gamma}^*}{p_{\Gamma \max}^*} = \frac{p_{\Gamma i}^* - p_{\Gamma}}{p_{\Gamma \max}^* - p_{\Gamma}} = f(\bar{h}),$$

где p_{Γ} – статическое давление воздуха в выходном сечении камеры сгорания; $\bar{h}$ – относительная высота канала. При проведении расчетов по осреднению параметров статическое давление газа в сечении на выходе из камеры «Л» принималось постоянным.

Результаты измерения параметров газовых потоков на входе и выходе из камеры сгорания «Л»

Режим работы камеры сгорания «Л» на камерном стенде характеризуется коэффициентом избытка воздуха на выходе из камеры подогрева $\alpha_{\text{КС п}} = 11,31$, коэффициентом избытка воздуха на выходе из испытываемой камеры $\alpha_{\text{КС}} = 2,054$, величинами среднемассовых приведенных скоростей на входе и выходе из испытываемой камеры, соответственно $\lambda_{\text{м.вх КС}} = 0,285$, $\lambda_{\text{м.вых КС}} = 0,1826$. Расход газа, отбираемый из наружного кольцевого канала камеры «Л» для имитации отбора воздуха на охлаждение турбины, составлял в процессе испытаний 16 % от расхода газа на входе в испытываемую камеру ($K_{\text{отб}} = 0,16$). Коэффициенты неравномерности температурного поля газа на входе и выходе из камеры «Л» составляли: на входе – $T_{\Gamma \max}^* / T_{\Gamma \min}^* = 1,0326$, на выходе – $T_{\Gamma \max}^* / T_{\Gamma \min}^* = 1,56$.

Результаты измерения температуры торможения газа на входе в испытываемую камеру «Л» одной из четырех гребенок с термопарами (гребенка «А1») приведены на рис. 5. Величина температуры торможения газа в пограничном слое у стенок канала определялась путем линейной экстраполяции кривой изменения температуры по радиусу.

Рис. 5. Эпюра температуры газа на входе в испытываемую камеру сгорания «Л» (на выходе из камеры подогрева, термогребенка «А1»)

Результаты измерения статического и полного давления газа на входе в камеру «Л» (на выходе из камеры подогрева) приведены на рис. 6.

Рис. 6. Эпюра полного давления газа на входе в испытываемую камеру сгорания «Л» (на выходе из камеры подогрева)

Полученная расчетом эпюра полного давления газа в сечении на выходе из камеры сгорания «Л» приведена на рис. 7.

Рис. 7. Эпюра полного давления газа на выходе из камеры сгорания «Л»

Результаты измерения температуры торможения газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» на одном из углов и на одном из радиусов приведены на рис. 8 и 9.

Рис. 8. Результаты измерения температуры газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» в радиальном направлении ($\varphi = 54,63^\circ$)

Рис. 9. Результаты измерения температуры газа на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» в окружном направлении ($R = R_3$)

Расход газа в выходном сечении камеры на режиме ее испытания рассчитан путем интегрирования по струйкам на основе приведенных выше эпюр температуры торможения и рассчитанных полного и статического давления. Полученный путем интегрирования по струйкам расход газа на выходе из камеры «Л» отличался от алгебраической суммы измеренных при испытаниях расхода воздуха на входе в камеру подогрева, расходов топлива, подаваемых в камеру подогрева и испытываемую камеру, расхода газа, отбираемого из камеры, на 0,23 %.

Результаты осреднения параметров газового потока на входе в камеру сгорания «Л»

Неравномерный газовый поток на входе в камеру сгорания ГТД «Л» (на выходе из камеры подогрева) (поток «Vh1» [2]) при испытаниях камеры «Л» на камерном стенде имел коэффициент поля $\tau_r = 1,0794$, приведенную скорость $\lambda_m = 0,285$, коэффициент неравномерности температуры торможения $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,0326$.

Анализ результатов расчета интегральных характеристик осредненного потока на входе в камеру, полученных с помощью программы [3] при различных способах осреднения, показал, что наиболее обоснованным способом осреднения является способ осреднения по массовому расходу [2]. При этом способе обеспечивается сохранение свойств осредненного потока (равенство величин интегральных характеристик G, I, I^*, Φ, S, E и статического давления осредненного канонического потока величинам соответствующих параметров действительного неравномерного потока). При всех остальных способах отмечаются погрешности расчета несохраняемых при этих способах интегральных характеристик канонических потоков (от 0,01 до 17 %) [2].

Из результатов расчета средних параметров, полученных при различных способах осреднения неравномерного газового потока на входе в камеру сгорания ГТД «Л», следует, что величины средних полных давлений на входе в камеру при большинстве рассмотренных способов (по отношению к среднему полному давлению, полученному при наиболее обоснованном способе осреднения по массовому расходу), рассчитываются с погрешностью (от 0,03 до 10 %) [2]. При способе осреднения по площади эта погрешность составляет 0,43 %, при способе осреднения с сохранением G, I^*, Φ – 0,41 %, при способе осреднения с сохранением G, I^*, E – 7,41 %. При способе осреднения с сохранением G, I^*, S среднее полное давление газа на входе в камеру «Л» равно среднему полному давлению при осреднении по массовому расходу [2].

Результаты осреднения параметров неравномерного потока на входе в камеру сгорания показали, что при способах осреднения по массовому расходу и с сохранением E, G, I величины потоков полного теплосодержания I^* и средних температур торможения равны соответствующим параметрам при способах осреднения с сохранением G, I^*, S ; G, I^*, Φ и G, I^*, E .

Результаты осреднения параметров газового потока на выходе из камеры сгорания «Л»

Неравномерный газовый поток на выходе из камеры сгорания ГТД «Л» (поток «8» [2]) при испытаниях камеры «Л» на камерном

стенде имел коэффициент поля $\tau_r = 1,0417$, приведенную скорость $\lambda_m = 0,1826$, коэффициент неравномерности температуры торможения $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,56$.

Анализ результатов расчета интегральных характеристик осредненного потока на выходе из камеры, полученных с помощью программы [3] при различных способах осреднения, также показал, что наиболее обоснованным способом осреднения является способ осреднения по массовому расходу [2].

Из результатов расчета средних параметров, полученных при различных способах осреднения неравномерного газового потока на выходе из камеры сгорания ГТД «Л», следует, что величины средних полных давлений на выходе из камеры, при большинстве рассмотренных способов (по отношению к среднему полному давлению, полученному при наиболее обоснованном способе осреднения по массовому расходу), рассчитываются с погрешностью (от 0,01 до 5,5 %) [2]. При способе осреднения по площади эта погрешность составляет 0,08 %, при способе осреднения с сохранением G, I^*, Φ – 0,20 %, при способе осреднения с сохранением G, I^*, E – 3,5 %, при способе осреднения с сохранением G, I^*, S – 3,25 % [2].

Результаты осреднения параметров неравномерного потока на выходе из камеры сгорания, имеющего высокий уровень коэффициента неравномерности температуры торможения $T_{r \max}^* / T_{r \min}^* = 1,56$, показали, что при способах осреднения по массовому расходу и с сохранением E, G, I величины потоков полного теплосодержания I^* и средних температур торможения равны соответствующим параметрам при способах осреднения с сохранением G, I^*, S ; G, I^*, Φ и G, I^*, E .

Результаты расчета коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания «Л» по параметрам неравномерных газовых потоков

Результаты расчета коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания ($\sigma_{\text{КС}}$) ГТД «Л» по величинам средних полных давлений на входе и на выходе из камеры, полученным при осредне-

нии параметров неравномерных газовых потоков в этих сечениях, приведены в табл. 1.

Также в табл. 1 представлены полученные при различных способах осреднения величины средних полных давлений на входе и выходе из камеры и величины коэффициентов σ_{KC} , отнесенные к соответствующим параметрам при осреднении по массовому расходу.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания «Л» (поток газа на входе в камеру сгорания – поток «Vh1», $\tau_r = 1,0794$, $\lambda_m = 0,285$, $T_{r\max}^*/T_{r\min}^* = 1,0326$, $K_T = 3,21\%$;

поток газа на выходе из камеры сгорания – поток «8», $\tau_r = 1,0417$,

$$\lambda_m = 0,1826, T_{r\max}^*/T_{r\min}^* = 1,56, K_T = 41,4\%)$$

Способы осреднения	Относительные величины параметров				
	Выход из KC $p_{KC_i}^*/p_{KC_G}^*$	Вход в KC $p_{r_i}^*/p_{r_G}^*$	σ_{KC}	$\sigma_{KC_i}/\sigma_{KC_G}$	$\delta\sigma_{KC}, \%$
<i>F</i>	0,9992	0,9957	0,9512	1,0035	0,35
<i>G</i>	1	1	0,9478	1	0
<i>G, I, S</i>	1,0297	0,9920	0,9839	1,0380	3,8
<i>G, I, Ф</i>	0,9998	0,9995	0,9481	1,0003	0,03
<i>Ф, S, I</i>	1,0120	0,9997	0,9595	1,0123	1,23
<i>E, G, I</i>	0,9632	0,9233	0,9888	1,0432	4,32
<i>E, G, Ф</i>	0,9990	0,9955	0,9512	1,0035	0,35
<i>E, G, S</i>	0,9450	0,8995	0,9958	1,0506	5,06
<i>G, Ф, S</i>	0,9999	0,9994	0,9483	1,0005	0,05
<i>G, I*, S</i>	1,0325	1,0001	0,9785	1,0323	3,23
<i>G, I*, Ф</i>	0,9980	0,9959	0,9499	1,0022	0,22
<i>G, I*, E</i>	0,9650	0,9259	0,9878	1,0422	4,22

Величина коэффициента σ_{KC} в камере сгорания ГТД «Л» на исследуемом режиме ее работы при осреднении параметров по массовому расходу составила $\sigma_{KC} = 0,9478$. Отклонения величин коэффициента σ_{KC} при других способах осреднения от величины этого коэффициента

ента, полученной при осреднении параметров по массовому расходу, составили $\delta\sigma_{\text{КС}} = 0,03 \dots 5,06 \%$ (см. табл. 1).

При осреднении неравномерных газовых потоков на входе и выходе из камеры по площади погрешность расчета коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$ составляет 0,35 %, при осреднении по способу с сохранением G, I^*, S – 3,23 %. Наибольшие погрешности расчета коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$ отмечаются при способах осреднения с сохранением G, I^*, E ; E, G, I и E, G, S (4, 22, 4,32 и 5,06 % соответственно).

Дальнейшее совершенствование ГТД требует в процессе его доводки достоверного знания КПД его узлов. Расчеты показывают, что увеличение на 1 % коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$ в камере сгорания ГТД «Б» ($\pi_{\text{к}}^* = 4,6$) приводит к снижению расхода топлива двигателя на 1,47 % и снижению его тяги на 1,05 %.

Как следствие, повышение точности определения коэффициента $\sigma_{\text{КС}}$ в камере сгорания ГТД даже на 0,3–0,5 % оказывает заметное влияние на точность расчета параметров ГТД.

Результаты расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания

1. Первоначально расчет коэффициента η_r в камере сгорания «Л» (при наличии на входе в камеру камеры подогрева) при работе камеры на сухом воздухе выполнен с помощью ММ и программы, разработанных согласно работе Я.Т. Ильичева [6].

По результатам измерений при испытаниях камеры «Л» расхода топлива и воздуха, подаваемых в камеру подогрева, по измеренным величинам температуры торможения воздуха, подаваемого в камеру подогрева, и температуры газа на выходе из камеры подогрева с помощью уравнения баланса теплоты определена величина коэффициента η_r в камере подогрева.

Результаты расчета, выполненного при $T_{\text{в.вх КП}}^* = 544,6 \text{ К}$,
 $T_{\text{г.вых КП}}^* = 769,27 \text{ К}$, при $q_{\text{т. КС п}} = \frac{G_{\text{т. КС п}}}{G_{\text{в.КС п}}} = 0,006$, показали, что коэффи-

коэффициент избытка воздуха в камере подогрева составляет $\alpha_{\text{КСП}} = \frac{G_{\text{в. КС}}}{G_{\text{т. КП}} L_0} = 11,31$, а коэффициент полноты сгорания $\eta_{\text{г. КСП}} = 0,943$, где L_0 – стехиометрический коэффициент (для керосина ТС–1 $L_0 = 14,69$). При расчете коэффициента полноты сгорания в камере подогрева использовалась средняя температура торможения газа $T_{\text{г. Вых КП}}^*$ на выходе из камеры подогрева, полученная при способе осреднения по массовому расходу. При расчете низшая теплотворная способность топлива принималась $H_u = 43\,400$ кДж/кг. Влагосодержание атмосферного воздуха принималось $d = 0$.

Величина коэффициента избытка воздуха на выходе из испытываемой камеры «Л» составила 2,054. Результаты расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания ГТД «Л» при ее испытании на камерном стенде согласно работе [6] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания «Л» (поток газа на входе в камеру сгорания – поток «Vh1»,

$$\tau_r = 1,0794, \lambda_m = 0,285, T_{\text{г1}}^* = 769 \text{ К}, T_{\text{г max}}^* / T_{\text{г min}}^* = 1,0326;$$

поток газа на выходе из камеры сгорания – поток «8», $\tau_r = 1,0417$,

$$\lambda_m = 0,1826, T_{\text{г max}}^* / T_{\text{г min}}^* = 1,56, \alpha_{\text{КС}} = 2,054)$$

Способы осреднения	Относительные величины температур и коэффициентов полноты сгорания в камере сгорания «Л»				
	$T_{\text{г. Вых I}}^* / T_{\text{г. Вых G}}^*$	$T_{\text{г. Вых I}}^* / T_{\text{г. Вых G}}^*$	$\eta_{\text{гI}}^*$	$\eta_{\text{гI}}^{**}$	$\delta\eta_{\text{г}}, \%$
<i>F</i>	0,9996	0,9950	0,9397	0,9404	–0,937
<i>G</i>	1	1	0,9484	0,9493	0
<i>G, I, S</i>	0,9978	0,9994	0,9490	0,9498	0,053
<i>G, I, Ф</i>	0,9976	0,9997	0,9497	0,9505	0,126
<i>Ф, S, I</i>	0,9998	0,9956	0,9405	0,9413	–0,842
<i>E, G, I</i>	1,0000	1,0000	0,9485	0,9494	0,01
<i>E, G, Ф</i>	1,0811	1,0377	0,9608	0,9604	1,17
<i>E, G, S</i>	0,9730	0,9808	0,9341	0,9334	–1,675

Окончание табл. 2

Способы осреднения	Относительные величины температур и коэффициентов полноты сгорания в камере сгорания «Л»				
	$T_{Г.ВХ_i}^* / T_{Г.ВХ_G}^*$	$T_{Г.ВЫХ_i}^* / T_{Г.ВЫХ_G}^*$	$\eta_{гi}^*$	$\eta_{гi}^{**}$	$\delta\eta_{г}, \%$
G, Φ, S	0,9985	0,9924	0,9357	0,9363	-1,369
G, I^*, S	1,0000	1,0000	0,9485	0,9494	0,01
G, I^*, Φ	1,0000	1,0000	0,9485	0,9494	0,01
G, I^*, E	1,0000	1,0000	0,9485	0,9494	0,01

Примечания: * – учет теплофизических свойств рабочего тела согласно работе [6]; ** – учет теплофизических свойств рабочего тела согласно работе [4].

Из табл. 2 следует, что при использовании способа осреднения газовых потоков по массовому расходу и при использовании данных Я.Т. Ильичева [6] величина $\eta_{г}$ в камере «Л» при работе на сухом воздухе составляет 0,9484. Относительно невысокое значение коэффициента $\eta_{г}$ обусловлено пониженным коэффициентом избытка воздуха в камере сгорания «Л» ($\alpha_{KC} = 2,054$) из-за подачи вместо воздуха на вход в испытываемую камеру газа, имеющего коэффициент избытка воздуха $\alpha_{KCп} = 11,31$.

2. Результаты расчета коэффициента полноты сгорания в камере сгорания ГТД «Л» по программе [7] (при учете теплофизических свойств рабочего тела согласно работе [4]) при испытании камеры на камерном стенде с камерой подогрева (при работе на сухом воздухе), также приведены в табл. 2. Сравнение величин $\eta_{г}$, рассчитанных согласно данной работе [6] и исследованиям [4, 7] (при работе на сухом воздухе), показало, что их отличие, при соответствующих способах осреднения, не превышает 0,09 % (см. табл. 2).

Из табл. 2 также следует, что при расчете по программе [7] и при способах осреднения по массовому расходу и с сохранением E, G, I ; G, I^*, S ; G, I^*, Φ и G, I^*, E величины коэффициентов $\eta_{г}$ имеют одинаковое значение (0,9493–0,9494), что обусловлено равенством при этих способах величин средних температур торможения газа как в сечении на входе, так и в сечении на выходе из камеры «Л».

По результатам расчетов коэффициента η_r в камере сгорания ГТД «Л» при ее испытании на камерном стенде и учете изменения теплофизических свойств рабочего тела согласно работе [4] выполнен анализ отличия величин η_r , полученных при различных способах осреднения, от величины $\eta_r = 0,9493$, полученной при наиболее обоснованном способе осреднения по массовому расходу (см. табл. 2). Степень этого отличия характеризуется приведенным в табл. 2 параметром $\delta\eta_r = (\eta_{r_i}/\eta_{r_G} - 1) \cdot 100 \%$. Как следует из табл. 2, при осреднении по площади погрешность расчета коэффициента η_r по отношению к способу осреднения по массовому расходу составляет $-0,937 \%$.

При способах осреднения с сохранением в канонических осредненных потоках на входе и выходе из испытываемой камеры «Л» интегральных характеристик G, I, S ; G, I, Φ ; E, G, Φ ; E, G, S и G, Φ, S погрешность расчета коэффициента полноты сгорания составляет, соответственно, $0,053$; $0,126$; $1,17 \%$, $-1,675 \%$ и $1,369 \%$.

Таким образом, использование при обработке результатов испытаний камеры обоснованного способа осреднения по массовому расходу позволяет повысить точность расчета коэффициента η_r в камере сгорания при ее автономным испытаниях и, соответственно, повысить точность расчета расхода топлива при расчете характеристик ГТД «Л».

Численное исследование влияния влажности воздуха на коэффициент полноты сгорания в камере сгорания при ее автономных испытаниях на камерном стенде

С целью оценки влияния влажности атмосферного воздуха на величину коэффициента полноты сгорания в камере «Л» при ее автономных испытаниях на камерном стенде с камерой подогрева выполнен расчет с помощью программы [7] изменения величины η_r при увеличении относительной влажности атмосферного воздуха с $\varphi = 0 \%$ до $\varphi = 90 \%$ (при этом влагосодержание воздуха увеличилось с $d = 0$ до $d = 0,0096$), $T_n = 288,15 \text{ К}$, $p_n = 101325 \text{ Па}$. Также выполнен расчет изменения η_r в камере подогрева при изменении влажности воздуха на

ее входе. Давление водяного пара на линии насыщения $p_{\text{п.нас}}$, кг/см², рассчитывалось согласно таблице [10] по формуле

$$\lg p_{\text{п.нас}} = 0,0141966 - 3,142305 \left(\frac{1000}{T_{\text{н}}} - \frac{1000}{373,15} \right) + 8,2 \lg \left(\frac{373,15}{T_{\text{н}}} \right) - 0,0024804(373,15 - T_{\text{н}}),$$

влажностное содержание воздуха рассчитывалось согласно работе [11] по формуле

$$d = 0,622 \frac{\bar{\Phi} p_{\text{п.нас}}}{p_{\text{н}} - \bar{\Phi} p_{\text{п.нас}}}.$$

С целью оценки влияния влажности атмосферного воздуха на величину коэффициента η_r выполнен также его расчет в камере сгорания «Б» с помощью программы [8] при имитации работы камеры «Б» на камерном стенде без камеры подогрева на четырех режимах. Расчет выполнен при относительной влажности атмосферного воздуха $\phi = 0$ % ($d = 0$) и при $\phi = 90$ % ($\bar{\phi} = 0,9$, $d = 0,0096$, $T_{\text{н}} = 288,15$ К, $p_{\text{н}} = 101325$ Па). Удельная теплоемкость атмосферного воздуха при увеличении влажности увеличилась на 0,791 % (с $c_p = 1,00148$ кДж/кг·К (при $d = 0$) до $c_p = 1,0094$ кДж/кг·К (при $d = 0,0096$)).

В качестве режимов, на которых производилась оценка изменения η_r в камере «Б» выбраны максимальный и дроссельные режимы работы ГТД «Б» на наземном стенде в стандартных атмосферных условиях. Величина коэффициента избытка воздуха в камере «Б» на этих режимах составляла $\alpha_{\text{КС}} = 2,33...4,5$. Средние величины параметров воздуха на входе и газа на выходе из камеры «Б» рассчитывались с помощью ММ ГТД «Б», идентифицированной по результатам испытаний.

3. В результате расчетов получено, что при увеличении влажностного содержания воздуха, подаваемого в камеру сгорания «Л», с $d = 0$ до $d = 0,0096$ коэффициент η_r увеличился на 0,52 %. Величина коэффициента избытка воздуха в камере «Л» составляла при этом $\alpha_{\text{КС}} = 2,054$. В камере подогрева, являющейся полноразмерной камерой типа

камеры «Л», при $\alpha_{КСп} = 11,31$ и при увеличении влагосодержания воздуха с $d = 0$ до $d = 0,0096$ коэффициент η_r увеличился на 0,84 %.

В камере сгорания «Б» при увеличении на ее входе влагосодержания воздуха с $d = 0$ до $d = 0,0096$ коэффициент полноты сгорания η_r увеличился на рассмотренных режимах работы камеры «Б» на 0,70...0,812 %.

Результаты оценки влияния изменения влажности воздуха на изменение коэффициентов полноты сгорания в камере «Л», в ее камере подогрева, а также в камере «Б» приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты оценки изменения коэффициента полноты сгорания в камере сгорания «Л» и в камере подогрева, установленной на входе в камеру сгорания «Л», при изменении влагосодержания воздуха от $d = 0$ до $d = 0,0096$

Камера	$\alpha_{КС}$	$(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*)$, кДж/кг, при $\varphi = 0$ % ($d = 0$)	η_r при $\varphi = 0$ %, ($d = 0$)	$\Delta(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*)$, %, при изменении влажности воздуха с $\varphi = 0$ до $\varphi = 90$ % ($d = 0,0096$)	η_r при $\varphi = 90$ %	$\delta\eta_r$, %, при изме- нении влажности воздуха с $\varphi = 0$ % до $\varphi = 90$ %
Камера «Л»	2,018	1067,6	0,9493	0,509	0,9543	0,526
Камера подогрева	11,1	243,67	0,9436	0,859	0,9515	0,837

Из результатов расчетов следует, что при увеличении влажности атмосферного воздуха с $\varphi = 0$ до $\varphi = 90$ % (см. табл. 3 и 4) коэффициент η_r увеличивается пропорционально увеличению приращения разности энтальпий $\Delta(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*)$ в сечениях на выходе из камеры и входе в нее.

В свою очередь, приращение разности энтальпий $\Delta(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*)$ в сечениях на выходе из камеры и входе в нее при увеличении влажности воздуха возрастает в большей степени при более низкой исходной (при $\varphi = 0$ %) разности приращений энтальпий $(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*)$ (см. табл. 3, 4).

Таблица 4

Результаты оценки изменения коэффициента полноты сгорания
в камере сгорания «Б» при изменении влагосодержания воздуха
от $d = 0$ до $d = 0,0096$

Режим	$\alpha_{КС}$	$(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*),$ кДж/кг, при $\varphi = 0 \%$, $d = 0$	$\eta_{г}$ при $\varphi = 0 \%$, $d = 0$	$\Delta(\Delta i_{г.вых}^* - \Delta i_{вх}^*),$ %, при измене- нии влажности воздуха с $\varphi = 0$ до $\varphi = 90 \%$ ($d = 0,0096$)	$\eta_{г}$ при $\varphi = 90 \%$	$\delta\eta_{г}, \%$, при изменении влажности воздуха с $\varphi = 0$ до $\varphi = 90 \%$
1	4,5	605,0	0,965	0,760	0,9728	0,808
2	4,3	636,4	0,9721	0,790	0,980	0,812
3	3,37	821,45	0,9875	0,764	0,9953	0,789
4	2,33	1140,0	0,956	0,703	0,9627	0,700

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны и апробированы универсальная математическая модель и программа на ЭВМ для осреднения параметров неравномерных воздушных и газовых потоков в каналах ГТД и математические модели для расчета коэффициента полноты сгорания в камерах сгорания по результатам их автономных испытаний при наличии и отсутствии на входе в испытываемую камеру камеры подогрева.

2. Анализ результатов расчета интегральных характеристик осредненных потоков на входе и выходе из камеры, полученных при использовании различных способов осреднения, показал, что наиболее обоснованным способом осреднения является способ осреднения по массовому расходу. В связи с вышеуказанным расчет коэффициентов восстановления полного давления и полноты сгорания в камерах сгорания по результатам их испытаний на камерных стендах необходимо выполнять с использованием способа осреднения по массовому расходу.

3. При способах осреднения по массовому расходу и с сохранением $E, G, I; G, I^*, S; G, I^*, \Phi$ и G, I^*, E величины коэффициентов $\eta_{г}$ имеют одинаковое значение, что обусловлено равенством при этих способах величин средних температур торможения газа как в сечении на входе, так и в сечении на выходе из камеры сгорания.

4. Результаты численного исследования показали, что переход работы камер сгорания с сухого воздуха на влажный (при изменении относительной влажности воздуха с $\varphi = 0$ до $\varphi = 90\%$ и влагосодержания воздуха с $d = 0$ до $d = 0,0096$) приводит к увеличению коэффициента полноты сгорания в камерах сгорания ГТД на 0,5–0,85 %.

5. Выбор обоснованного способа осреднения и учет изменения влажности атмосферного воздуха позволяет повысить достоверность и точность расчета коэффициентов $\sigma_{\text{КС}}$ и $\eta_{\text{Г}}$ в камерах сгорания при обработке результатов их автономных испытаний.

Библиографический список

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.

2. Кофман В.М. Методология и опыт экспериментально-расчетного определения показателей газодинамической эффективности узлов ГТД по параметрам неравномерных воздушных и газовых потоков: монография / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа, 2013. – 400 с.

3. Свид. РФ о гос. рег. программы для ЭВМ № 2013661093. Осреднение параметров неравномерных воздушных и газовых потоков при обработке результатов испытаний газотурбинных двигателей и их узлов / Кофман В.М.; заявл. 03.10.2013; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28.11.2013.

4. Дружинин Л.Н., Швец Л.И., Малинина Н.С. Метод и подпрограмма расчета термодинамических параметров воздуха и продуктов сгорания углеводородных топлив // Руководящий техн. материал авиационной техники. РТМ 1677–83. Двигатели авиационные и газотурбинные. – 1983. – 68 с.

5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 888 с.

6. Ильичев Я.Т. Термодинамический расчет воздушно-реактивных двигателей // Труды ЦИАМ. – 1975. – № 677. – 126 с.

7. Свид. РФ о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015617594. Экспериментально-расчетное определение коэффициента полноты сгорания в кольцевой камере сгорания газотурбинного двигателя при автономных испытаниях камеры на камерном стенде при наличии на входе в испытываемую камеру камеры подогрева / Кофман В.М.; заявл. 21.05.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 15.07.2015.

8. Свид. РФ о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015617453. Экспериментально-расчетное определение коэффициента полноты сгорания в кольцевой камере сгорания газотурбинного двигателя при автономных испытаниях камеры на камерном стенде / Кофман В.М.; заявл. 27.05.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 10.07.2015.

9. Технология эксплуатации, диагностики и ремонта газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов. – М.: Высш. шк., 2002. – 355 с.

10. Вукалович М.П. Таблица термодинамических свойств воды и водяного пара. – Л.: Энергия, 1965. – 400 с.

11. Литвинов Ю.А., Боровик В.О. Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

References

1. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike [Methods of similarity and dimension in mechanics]. Moscow: Nauka, 1967. 428 p.

2. Kofman V.M. Metodologiya i opyt eksperimentalno-raschetnogo opredeleniya pokazateley gazodinamicheskoy effektivnosti uzlov GTD po parametram neravnomernykh vozdushnykh i gazovykh potokov [Methodology and experience of experimental calculating of gas-dynamic parameters efficiency of gas turbine engine components according to the parameters of non-uniform air and gas flows]. Ufimskiy gosudarstvennyy aviatsionnyy tekhnicheskii universitet, 2013. 400 p.

3. Kofman V.M. Certificate of incorporation of the computer program no. 2013661093. Averaging parameters of non-uniform air and gas flows while processing the test results of gas-turbine engines and their components. Stated 03.10.2013. Registered in Computer Programs list 28.11.2013.

4. Druzhinin L.N., Shvets L.I., Malinina N.S. Metod i podprogramma rascheta termodinamicheskikh parametrov vozdukha i produktov sgoraniya uglevodorodnykh topliv [Method and subroutine of calculation of thermodynamic parameters of air and combustion products of hydrocarbon fuels]. Rukovodyashchiy tekhnicheskii material aviatsionnoy tekhniki. RTM 1677–83. Dvigateli aviatsionnye i gazoturbinnye. 1983. 68 p.

5. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1976. 888 p.

6. Ilichev Ya.T. Termodinamicheskiy raschet vozdušno-reaktivnykh dvigateley [Thermodynamic calculation of air-breathing engines]. *Trudy Tsentralnogo Instituta avitsionnogo motorostroeniya*, 1975, no. 677. 126 p.

7. Kofman V.M. Certificate of incorporation of the computer program no. 2015617594. Experimental determination of the estimated coefficient of completeness of combustion in an annular combustion chamber of a gas turbine engine with independent camera test on the stand in the presence of a chamber inlet in the test chamber heating chamber. Stated 05.21.2015. Registered in Computer Programs list 07.15.2015.

8. Kofman V.M. Certificate of incorporation of the computer program no. 2015617453. Experimental determination of the combustion efficiency coefficient in an annular combustion chamber of a gas turbine engine with independent camera tests on the chamber stand. Stated 05.27.2015. Registered in Computer Programs list 07.10.2015.

9. Eliseev Yu.S., Krymov V.V., Malinovskiy K.A., Popov V.G. Tekhnologiya ekspluatatsii, diagnostiki i remonta gazoturbinnnykh dvigateley [Exploitation, diagnostics and repair technology of gas turbine engines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 355 p.

10. Vukalovich M.P. Tablitsa termodinamicheskikh svoystv vody i vodyanogo para [Table of thermodynamic properties of water and steam]. Leningrad: Energiya, 1965. 400 p.

11. Litvinov Yu.A., Borovik V.O. Kharakteristiki i ekspluatatsionnye svoystva aviatsionnykh turboreaktivnykh dvigateley [Characteristics and performance of aircraft jet engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 288 p.

Об авторе

Кофман Вячеслав Монсеевич (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационная теплотехника и теплоэнергетика» Уфимского государственного авиационного технического университета (450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, e-mail: stan@ufanet.ru).

About the author

Vyacheslav M. Kofman (Ufa, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aviation Heat Engineering and Power System, Ufa State Aviation Technical University (12, K. Marx st., Ufa, 450000, Russian Federation, e-mail: stan@ufanet.ru).

Получено 20.04.2016