

В. М. Кофман

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Описана разработанная математическая модель для расчета теплового состояния кольцевых камер сгорания ГТД со струйным комбинированным охлаждением. При подготовке исходных данных секции жаровой трубы и корпус камеры делятся на элементы. При проведении расчета учитываются конвективные потоки теплоты от газа к секции жаровой трубы, лучистые потоки теплоты от газа к секции и от секции к корпусу, конвективные потоки от воздуха в кольцевых каналах к секции и корпусу. Дана расчетная оценка влияния поперечного и продольного потоков теплоты путем теплопроводности на результаты расчета теплового состояния секции. Проведена верификация разработанной математической модели путем сравнения результатов расчета теплового состояния камер сгорания ГТД «С» и «Л» с результатами их термометрирования. *ГТД; камера сгорания; жаровая труба; тепловые потоки; тепловое состояние*

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одной из практических задач, возникающих в процессе доводки ГТД, является обеспечение надежной работы их камер сгорания. Решение этой задачи в последнее время все более усложняется. Это обусловлено ростом параметров термодинамического цикла современных ГТД (температуры газа в камере сгорания до $T_r^* = 1900$ К и суммарной степени повышения давления воздуха в компрессоре до $\pi_k^* = 45...56$), и, как следствие, увеличением лучистого и конвективного тепловых потоков от газа к жаровой трубе камеры и повышением температуры охлаждающего воздуха.

Наиболее распространенным способом охлаждения жаровых труб кольцевых камер сгорания современных ГТД является струйное комбинированное охлаждение, когда часть охладителя (воздуха) подается в жаровую трубу через систему отверстий и щелей параллельно скорости потока газа для создания воздушной завесы, защищающей внутреннюю поверхность жаровой трубы от контакта с газом. Другая часть охладителя, текущая в кольцевом канале между корпусом камеры и жаровой трубой, отводит тепловой поток от наружной стороны стенок секций жаровой трубы [1]. Схема кольцевой камеры сгорания со струйным комбинированным охлаждением (схема «А») показана на рис. 1.

В практике также применяется схема охлаждения «В», отличающаяся от схемы «А» расположением подводящих охлаждающий воздух

отверстий, – перпендикулярно к поверхности козырька секции жаровой трубы (рис. 2).

Для расчета жаровой трубы и корпуса камеры сгорания на прочность и устойчивость необходимо знание их теплового состояния. Поэтому одним из инструментов проектирования и доводки камеры сгорания является реализованная на ЭВМ математическая модель камеры, служащая для расчета ее теплового состояния.

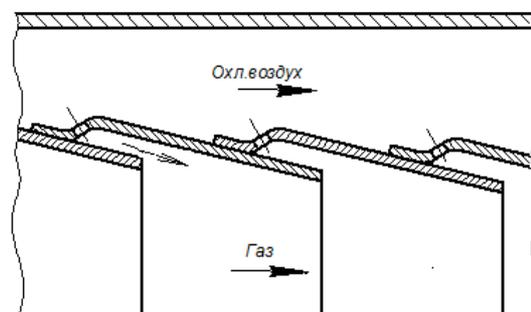


Рис. 1. Схема кольцевой камеры сгорания «А» со струйным комбинированным охлаждением

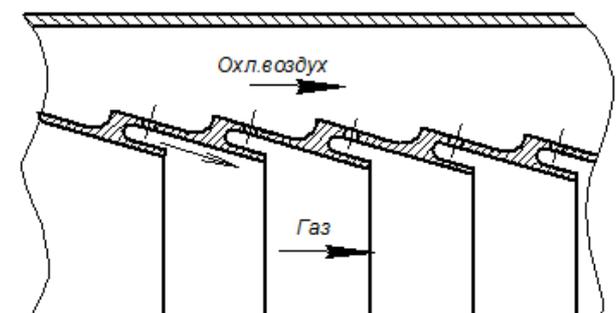


Рис. 2. Схема кольцевой камеры сгорания «В» со струйным комбинированным охлаждением

Использование такой модели позволяет прогнозировать тепловое состояние жаровой трубы и корпуса камеры в различных эксплуатационных условиях работы ГТД. По результатам математического моделирования теплового состояния камеры могут быть разработаны конструктивные мероприятия, обеспечивающие эффективное охлаждение камеры сгорания и ее прочность.

2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Применительно к кольцевым камерам сгорания, имеющим схемы охлаждения «А» и «В», разработана математическая модель и реализованная на ЭВМ программа «Камера» расчета теплового состояния кольцевой камеры сгорания ГТД. Модель базируется на результатах теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в ЦИАМ и изложенных в работах Б. А. Жесткова, С. О. Апельбаума, В. В. Глазкова, М. Д. Гусевой, В. П. Лукаша

[1–6]. Одна из первых модификаций модели применительно к схеме «А» ранее частично была описана в [7, 8].

Основные положения и допущения, принятые при разработке математической модели камеры, сводятся к следующему.

1. При расчете жаровая труба и корпус камеры разбиваются в окружном направлении на элементарные полосы. Длина дуги полосы определяется заданным элементарным углом φ . Полосы секций жаровой трубы и корпуса разбиваются на элементы. Это позволяет учитывать изменение по длине их наружных и внутренних поверхностей коэффициентов теплоотдачи и изменение температуры смеси газа и воздуха в пограничном слое по длине внутренней поверхности стенки жаровой трубы.

Длина элементов корпуса равна длине соответствующей секции жаровой трубы, над или под которой расположен элемент корпуса. Схема разбиения секций жаровой трубы и корпуса камеры на элементы приведена на рис. 3.

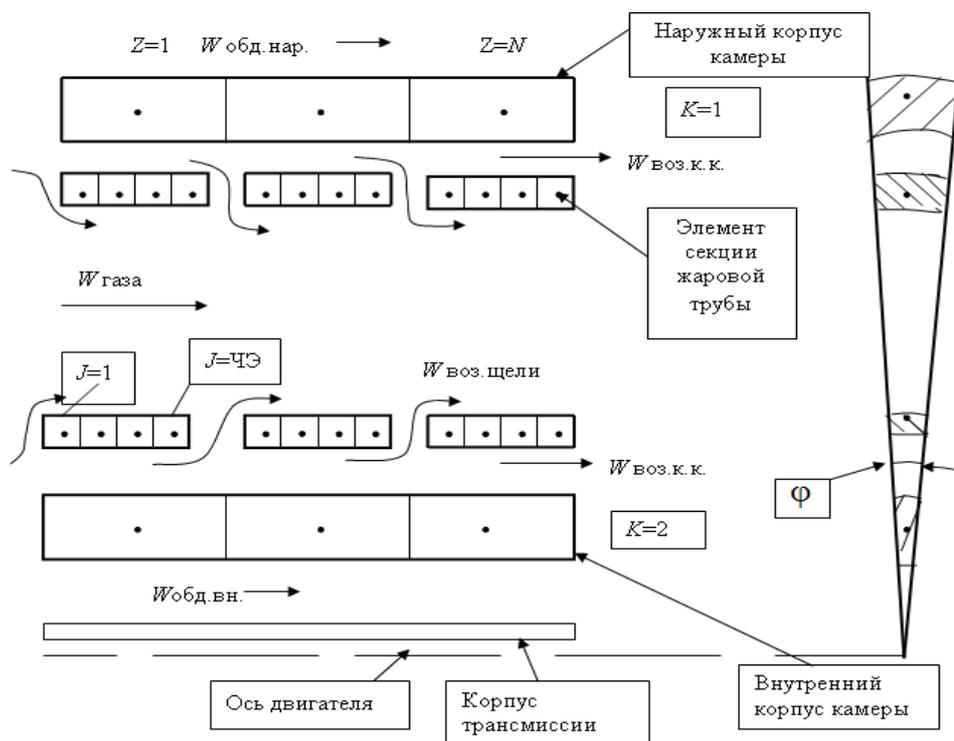


Рис. 3. Схема разбиения секций жаровой трубы и корпуса камеры на элементы ($K = 1, K = 2$ – обозначение наружных и внутренних секций жаровой трубы и элементов корпуса, ЧЭ – количество элементов секции жаровой трубы, Z – номер секции и элемента корпуса, N – количество секций и элементов корпуса)

2. При расчете теплового состояния камеры учитываются следующие тепловые потоки:

$Q_{\text{кон.газ-жар}}$ – конвективный поток от смеси газа и воздуха, вытекающего из щелей секций, к поверхности стенок жаровой трубы;

$Q_{\text{луч.газ-жар}}$ – лучистый поток от газа к поверхности стенок жаровой трубы;

$Q_{\text{луч.жар-кор}}$ – лучистый поток от поверхности стенок жаровой трубы к поверхностям наружного и внутреннего корпусов камеры;

$Q_{\text{воз.к.к-жар}}$ – конвективный поток от воздуха в кольцевом канале между корпусом и жаровой камерой к жаровой трубе;

$Q_{\text{воз.к.к-кор.нар.}}$ – конвективный поток от воздуха в кольцевом канале между корпусом и жаровой трубой камеры к поверхности наружного корпуса камеры;

$Q_{\text{воз.к.к-кор.внутр.}}$ – конвективный поток от воздуха в кольцевом канале между корпусом и жаровой трубой камеры к поверхности внутреннего корпуса камеры;

$Q_{\text{воз.обд.нар.-кор.нар.}}$ – конвективный поток от воздуха, обдувающего двигатель в мотоотсеке летательного аппарата или в наружном контуре двухконтурного ГТД, к поверхности наружного корпуса;

$Q_{\text{воз.обд.внутр.-кор.внутр.}}$ – конвективный поток от воздуха в канале между корпусом трансмиссии двигателя и внутренним корпусом камеры к поверхности внутреннего корпуса.

Схема тепловых потоков в жаровую трубу и корпус, учитываемых при расчете теплового состояния камеры сгорания, показана на рис. 4.

3. Перетекание теплоты через стенки путем теплопроводности при расчетах температур тонкостенных (1,2...2 мм) жаровых труб и корпусов (2...2,5 мм) не учитывалось, так как процесс теплообмена между рабочим телом и этими деталями относится к внешней задаче из-за меньшего на один-два порядка термического сопротивления теплопроводности по сравнению с внешним сопротивлением теплоотдачи. Как показали оценочные расчеты тонкой пластины ($\Delta = 1,2$ мм) (разделенной по длине на элементы и на два слоя в поперечном направлении), не учет поперечного перетекания тепла путем теплопроводности приводит к погрешности расчета температуры верхнего слоя пластины на $\delta T = 0,2...0,4$ %, (2...5 К). Расчеты выполнялись при обдуве пластины с одной стороны воздухом ($\alpha_{\text{обд}} = 340...240$ Вт/(м²К), $T_{\text{обд}}^* = 770$ К) и с другой стороны смесью газа и воздуха ($\alpha_e = 800...1400$ Вт/(м²К), $T_e^* = 1000...1400$ К).

4. Перетекание тепла по длине секций жаровых труб не учитывалось. Согласно [5], эффект перетекания тепла путем теплопроводности по длине секций (при их охлаждении по схеме «А») практически отсутствует при величине безразмерного критерия $K > 10$, где

$$K = \sqrt{\frac{\alpha_e \cdot L^2}{\Delta \cdot \lambda}},$$

где Δ – толщина стенки, м; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); L – длина секции, м; α_e – равновесный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К).

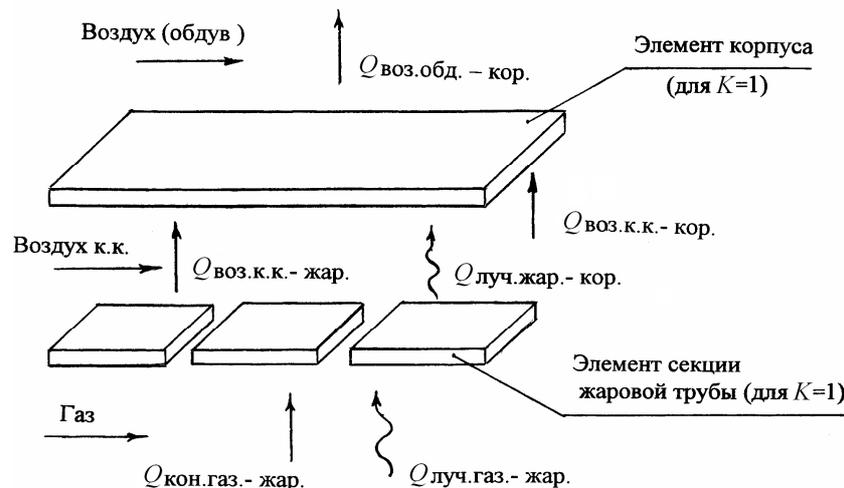


Рис. 4. Схема тепловых потоков в жаровую трубу и корпус, учитываемых при расчете теплового состояния камеры сгорания

Для секций кольцевых камер сгорания ГТД 3-го поколения (при $\Delta = 0,0012...0,002$, $\alpha_{e.c.} = 825...1700$, $L = 0,048...0,076$, $\lambda = 20$) величина критерия K составляет 7...20. Для относительно коротких секций жаровых труб ГТД 4-го поколения (при $\Delta = 0,0012$, $\alpha_{e.c.p} = 825...1700$, $L = 0,024$, $\lambda = 20$) величина критерия K составляет 4,4...6,4.

Как показали оценочные расчеты теплового состояния тонкостенной ($\Delta = 1,2$ мм) относительно короткой ($L = 0,015$ м) пластины, не учет продольного перетекания теплоты путем теплопроводности приводит (при $\alpha_{обд} = 340...240$ Вт/(м² · К), $T_{обд}^* = 770$ К и при $\alpha_e = 800...1400$ Вт/(м² К), $T_e^* = 1000...1400$ К) к погрешности расчета (занижению) температуры начальной («холодной») части пластины на $\delta T = 1,3...1,7$ %, (13...18 К).

5. Задача расчета теплового состояния кольцевой камеры сгорания решена в наиболее общей – динамической – постановке, что позволяет осуществлять расчет температур корпуса и секций жаровой трубы как на установившихся, так и на неустановившихся режимах работы ГТД.

При расчете теплового состояния камеры на неустановившихся режимах работы ГТД принимается, что величины давлений воздуха и газа по длине камеры изменяются пропорционально изменению давления воздуха на входе в камеру, а величины температуры газа и местного коэффициента избытка воздуха в сечениях камеры изменяются пропорционально изменению этих параметров на выходе из камеры.

6. Параметры воздуха и газа в сечениях за компрессором и на выходе из камеры, необходимые для расчета теплового состояния камеры на режимах приемистости и сброса газа, рассчитываются с помощью математической модели ГТД на неустановившихся режимах.

7. С учетом принятых допущений и при заданных условиях однозначности (одни из которых задаются в исходных данных – геометрические и временные, другие определяются по ходу расчета – физические и граничные) дифференциальные уравнения теплообмена, записанные в общем виде для каждого из элементов секции жаровой трубы и элементов корпуса, имеют вид

$$C_{м.жар.} (dT_{жар.} / dt) \rho_{жар.} V_{эл.жар.} = Q_{кон.газ-жар.} + Q_{луч.газ-жар.} + Q_{луч.жар-кор.} + Q_{воз.к.к-жар.}$$

$$C_{м.кор.} (dT_{эл.кор.} / dt) \rho_{кор.} V_{эл.кор.} = Q_{луч.жар-кор.} + Q_{воз.к.к-кор.} + Q_{воз.обд.-кор.}$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений при расчете приводится к алгебраическому виду путем замены дифференциалов конечно-разностными соотношениями.

Блок-схема программы расчета теплового состояния кольцевой камеры сгорания ГТД приведена на рис. 5.

В блоке «Исходные данные» программы вводятся геометрические размеры жаровой трубы и корпуса, параметры на входе в камеру на установившемся режиме работы и их относительное изменение при расчете теплового состояния камеры в переходном процессе.

Также вводятся параметры, рассчитанные с помощью математической модели газодинамического расчета камеры [9] на установившемся режиме работы ГТД, различные постоянные величины и используемые в программе табличные зависимости и коэффициенты полиномов.

Окружная неравномерность температуры торможения газового потока в жаровой трубе при расчете ее теплового состояния может быть учтена путем изменения задаваемой в исходных данных температуры газа в сечениях жаровой трубы.

В блоке программы «Геометрия» производятся операции деления секций жаровой трубы и корпуса на элементы, определяются площади поверхностей, объемы и массы соответствующих элементов. В этом блоке также определяются коэффициент избытка воздуха на выходе из камеры сгорания, среднемассовая скорость газа, скорость газа и параметр $n = T_{охл}^* / T_{г}^*$ в сечениях щелей секций.

В блоке «Щель», по известным геометрическим размерам кольцевого канала между жаровой трубой и корпусом, по известным размерам отверстий и щелей секций и по заданным параметрам воздуха в кольцевом канале и газа в жаровой трубе, производится для каждой из секций гидравлический расчет этой системы и расчет скоростей воздуха на выходе из щелей секций жаровой трубы.

Коэффициент сопротивления системы «кольцевой канал – отверстия – щель» рассчитывается согласно [11] как при течении потока через отверстия в стенке из одного объема в другой. При этом стенка с отверстиями, имеющими заданный радиус закругления по потоку, рассматривается как диафрагма.

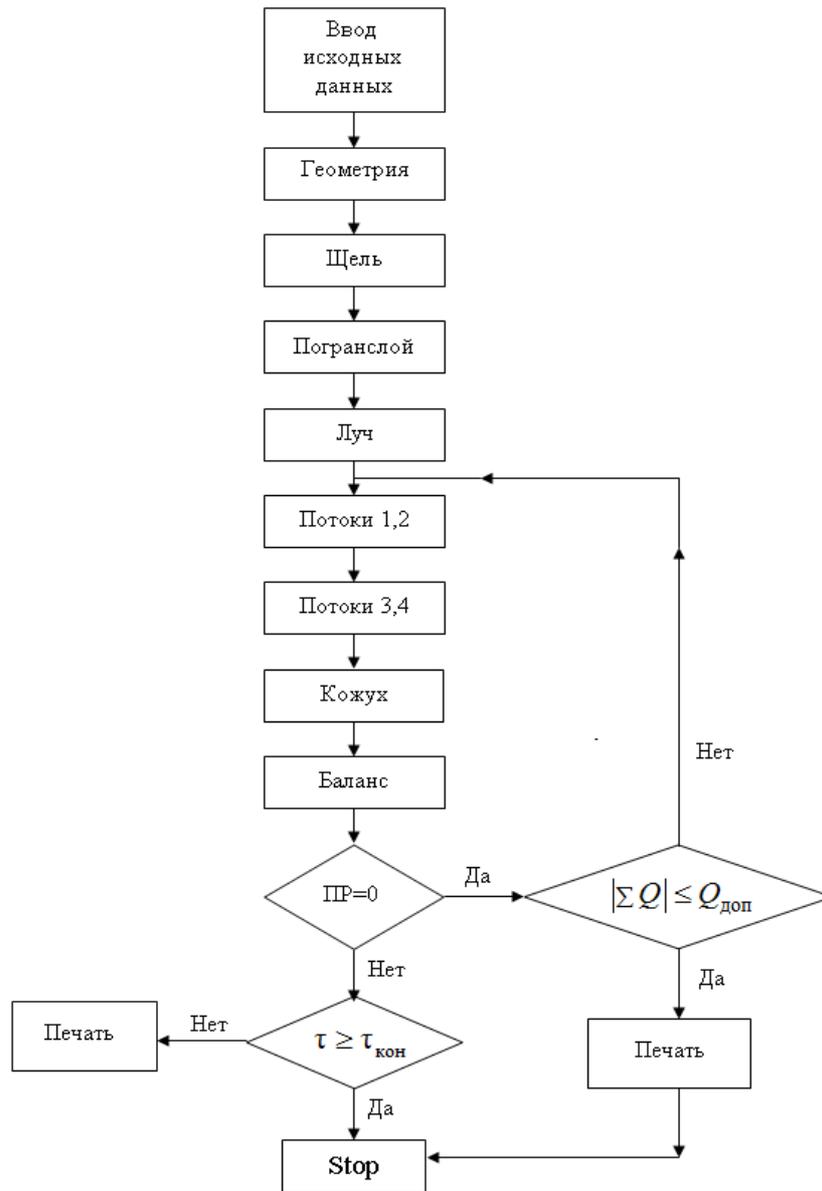


Рис. 5. Блок-схема программы расчета теплового состояния кольцевой камеры сгорания

$$\xi[k, z] = \xi' \cdot (A)^{0.75} + B^2 + 2\sqrt{\xi'} \cdot (A)^{0.375} \cdot B,$$

где

$$A = \left(1 - \frac{F_{\text{отв}}[k, z]}{F_{\text{кк}}[k, z]} \right), \quad B = \left(1 - \frac{F_{\text{отв}}[k, z]}{F_{\text{ш}}[k, z]} \right),$$

$$\xi' = f(r_{\text{закр}} / D_{\text{гидр.отв}}).$$

Коэффициент расхода через отверстия подвода охлаждающего воздуха из кольцевого канала к щели секции рассчитывается согласно [9].

$$\mu_{\text{отв}}[k, z] = \frac{0,6 + 3,27(a[k, z])^{-2,08}}{1 + 3,15(a[k, z])^{-2,08}} \cdot \frac{1}{\psi[k, z]},$$

$$\text{где } a[k, z] = \frac{2\Delta p[k, z]}{\rho_{\text{кк}}[k, z] W_{\text{кк}}[k, z]^2},$$

$$\Delta p[k, z] = p_{\text{кк}}^*[k, z] - p_{\text{гв}}[z],$$

$\psi[k, z]$ – коэффициент, учитывающий угол расположения оси отверстий β по отношению к направлению воздушного потока в кольцевом канале, при $\beta = 0$ $\psi[k, z] = 1,0$, при $\beta > 0$ $\psi[k, z] > 1,0$.

Решение системы алгебраических уравнений в блоке «Щель» производится методом итераций. Условием, замыкающим решение системы алгебраических уравнений, является равенство величин статического давления воздуха в сечениях на выходе из щелей секций

и величин статического давления газа $p_{rw}[z]$ в жаровой трубе в этих же сечениях.

Выходным параметром блока «Щель» является отношение скоростей охлаждающего воздуха на выходе из щелей к скорости газа в сечениях щелей секций $m[z] = W_{\text{охл}}[z] / W_r[z]$.

В блоке «Погранслой» с помощью уравнений, полученных на основе теоретического анализа и экспериментального исследования струйного охлаждения теплоизолированной пластины при турбулентном смешении струи охладителя (воздуха) в спутном потоке газа, из уравнения сохранения избыточного импульса смешивающихся струй [1, 4] методом итераций рассчитывается относительная избыточная равновесная температура в тепловом пограничном слое $\Delta \bar{T}_m$ и равновесная температура смеси воздуха и газа T_e^* на границе теплового пограничного слоя

$$\Delta \bar{T}_m[k, z, j] = \frac{T_e^*[k, z, j] - T_r^*[z, j]}{T_{\text{охл}}^*[z] - T_r^*[z, j]}.$$

При $\Delta \bar{T}_m \geq 1,0$ $T_e^*[k, z, j] = T_{\text{охл}}^*$,
 $\Theta_e[k, z, j] = 0$, при $\Delta \bar{T}_m < 1,0$, $\Theta_e[k, z, j] = 1 - \Delta \bar{T}_m[k, z, j]$, где

$$\Theta_e[k, z, j] = \frac{T_e^*[k, z, j] - T_{\text{ох}}^*[z]}{T_r^*[k, z, j] - T_{\text{ох}}^*[z]},$$

$$T_e^*[k, z, j] = (n[z] + (1 - n[z]) \Theta_e[k, z, j]) T_r^*[z, j].$$

Если величина параметра $m[k, z] < 1,3$, то расчет параметра Θ_e производится по предложенной Б. А. Жестковым эмпирической зависимости

$$\Theta_e[k, z, j] = 1 - \frac{3,4}{\sqrt{\delta[z]j/h_{\text{м}}}} \left(\frac{n[z]}{0,64} \right)^{0,45} \left(\frac{m[k, z]}{n[z]^2} \right).$$

В конце блока «Погранслой» производится расчет равновесной температуры в тепловом пограничном слое T_e^* в зоне каждого элемента секции по формуле

$$T_e^*[k, z, j] = (n[z] + (1 - n[z]) \Theta_e[k, z, j]) T_r^*[z, j].$$

При этом температура газа в зоне каждого элемента секции рассчитывается по формуле

$$T_r^*[z, j] = T_r^*[z] + \frac{T_r^*[z+1] - T_r^*[z]}{\text{ЧЭ}} j,$$

где ЧЭ – количество элементов в секции, j – номер элемента секции, z – номер секции жаровой трубы, $T_r^*[z]$ – температура газа в сечении щелей секций.

В блоке «Луч» рассчитываются плотность максимального собственного лучистого потока в конце зоны горения и плотность падающих лучистых потоков в зоне смешения, степень черноты продуктов сгорания углеводородного топлива (паров воды и углекислого газа), степень черноты сажистых частиц и пламени. Методика расчета лучистых потоков и степени черноты сажистых частиц базируется на результатах теоретического анализа лучистого теплообмена в камерах сгорания и результатах испытаний модельных трубчатых камер сгорания [3].

Величина плотности максимального собственного лучистого потока рассчитывается согласно [3] по эмпирическим зависимостям:

- при $p_k \leq p_k^0$

$$q_{\text{л.макс}} = q_{\text{л.0.макс}_1} \cdot \Phi_1(\bar{p}_k) \Phi_2(K_f) \Phi_3(\bar{T}_k) \Phi_4(\bar{D}) \cdot \Phi_T;$$

- при $p_k > p_k^0$

$$q_{\text{л.макс}} = q_{\text{л.0.макс}_2} \cdot \Phi_3(\bar{T}_k),$$

где p_k^0 – давление насыщения пламени сажистыми частицами, Па, (давление, при котором излучение пламени перестает быть объемным и становится поверхностным, а увеличение концентрации сажистых частиц в пламени уже не оказывает влияния на его степень черноты), (в исходной модельной камере сгорания $p_k^0 = 2 \cdot 10^5$),

$$p_k^0 = 2 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{10,1}{\Phi_2(K_f) \cdot \Phi_4(\bar{D}) \cdot \Phi_T} \right)^{0,77},$$

$q_{\text{л.0.макс}_1} = 51$ кВт/м² – плотность максимального собственного лучистого потока при объемном характере излучения пламени в исходной модельной камере сгорания,

$q_{\text{л.0.макс}_2} = 515$ кВт/м² – плотность максимального собственного лучистого потока при насыщении пламени сажистыми частицами в исходной модельной камере сгорания,

$$\Phi_1(\bar{p}_k) = \left(\frac{p_k}{2 \cdot 10^5} \right)^{1,3} - \text{коэффициент, учитывающий суммарное влияние давления в камере}$$

на плотность максимального собственного лучистого потока,

$\Phi_2(K_f)$ – коэффициент, учитывающий влияние параметра форсирования камеры K_f [3] на изменение суммарной степени черноты пламени, где

$$\varphi_2(K_f) = \frac{8,65}{(10K_f)^{1,34}}, \quad K_f = \frac{V_{\text{ж}}}{T_{\text{к}}^*(D_{\text{ж}})^3},$$

$$V_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{в.к.с.}} \cdot R_{\text{в}} \cdot T_{\text{к}}^*}{p_{\text{к}}}, \quad D_{\text{ж}} = (2H_{\text{ж}}),$$

$$H_{\text{ж}} = (D_{\text{жар.тр.нар}} - d_{\text{жар.тр.вн}}) / 2,$$

$V_{\text{ж}}$ – объемный расход газа через камеру сгорания, м³/с.

Как показано в [3], поверхностная плотность излучения пламени с увеличением объемного расхода газа через камеру сгорания и, соответственно, параметра форсирования, монотонно уменьшается, асимптотически приближаясь к излучению «чистых» продуктов сгорания. То есть, с увеличением объемного расхода уменьшается время пребывания топлива в зоне горения, уменьшаются выход сажи в пламени и плотность максимального собственного лучистого потока.

$\varphi_3(\bar{T}_{\text{к}}) = (T_{\text{к}}^*/470)$ – коэффициент, учитывающий влияние изменения температуры воздуха за компрессором по отношению к температуре воздуха при испытании исходной модельной камеры (470 К) на температуру пламени,

$\varphi_4(\bar{D})$ – коэффициент, учитывающий, при $p_{\text{к}} = \text{const}$, влияние диаметра (высоты) камеры на степень черноты пламени, $\varphi_4(\bar{D}) = \varepsilon_{\text{с}} / \varepsilon_{\text{с.0}}$, где $\varepsilon_{\text{с.0}}$ – степень черноты сажистых частиц в исходной модельной трубчатой камере сгорания, имеющей $D_{\text{ж}} = 0,19$ м,

φ_{T} – коэффициент, учитывающий род топлива (при содержании в топливе водорода 13...16 %, $\varphi_{\text{T}} = 1,0$ [3]).

Величина $\varepsilon_{\text{с.0}}$ рассчитывается по данным, приведенным в [3], с помощью уравнений:

- при $p_{\text{к}} > 13 \cdot 10^5$ Па $\varepsilon_{\text{с.0}} = 0,96$,
- при $p_{\text{к}} \leq 8 \cdot 10^5$ Па $\varepsilon_{\text{с.0}} = 0,0012 p_{\text{к}}^3$,
- при $8 \cdot 10^5$ Па $< p_{\text{к}} < 13 \cdot 10^5$ Па $\varepsilon_{\text{с.0}} = 0,15 + 0,0625 p_{\text{к}}$.

Из уравнения

$$\varepsilon_{\text{с.0}} = 1 - \frac{15}{\pi^4} \cdot 6 \sum_{K=0}^{\infty} \frac{1}{(\omega_0 + K + 1)^4}$$

находится оптическая толщина излучающего слоя газа исходной модельной камеры сгорания ω_0 , соответствующая значению $\varepsilon_{\text{с.0}}$. Далее рассчитываются оптическая толщина излучающего слоя газа ω исследуемой кольцевой камеры сгорания, имеющей высоту $H_{\text{ж}}$

$$\omega = \omega_0 \cdot 1,76 \frac{H_{\text{ж}}}{0,19},$$

и степень черноты сажистых частиц

$$\varepsilon_{\text{с}} = 1 - \frac{15}{\pi^4} \cdot 6 \sum_{K=0}^{\infty} \frac{1}{(\omega + K + 1)^4}.$$

Следует отметить, что влияние диаметра (высоты) камеры на степень черноты сажистых частиц и максимальный лучистый поток через коэффициент $\varphi_4(\bar{D})$ обусловлено увеличением оптической толщины излучающего слоя газа ω при увеличении диаметра. При небольших давлениях воздуха (при объемном характере излучения пламени) степень черноты сажистых частиц с увеличением диаметра камеры возрастает. Соответственно возрастает величина коэффициента $\varphi_4(\bar{D})$ и плотность максимального собственного лучистого потока. При высоких давлениях воздуха и при поверхностном характере излучения влияние диаметра уменьшается. При этом степень черноты сажистых частиц и коэффициент $\varphi_4(\bar{D})$ стремятся к единице [3].

Зависимость коэффициента $\varphi_4(\bar{D}) = f(H_{\text{ж}}, p_{\text{к}})$, полученная на основе данных, приведенных в [3], показана на рис. 6.

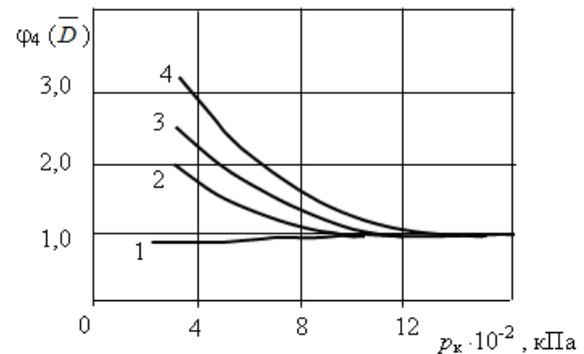


Рис. 6. Зависимость коэффициента $\varphi_4(\bar{D})$ от давления в камере и высоты кольцевого канала жаровой трубы $H_{\text{ж}}$, 1 – $H_{\text{ж}} = 0,1$ м; 2 – $H_{\text{ж}} = 0,2$ м; 3 – $H_{\text{ж}} = 0,3$ м; 4 – $H_{\text{ж}} = 0,4$ м

Плотность падающего лучистого потока тепла от газа к жаровой трубе (включающего излучение стенок жаровой трубы) в зоне смешения рассчитывалась как функция местного коэффициента избытка воздуха и плотности максимального собственного лучистого потока в конце зоны горения на основе обобщения данных [3] для диапазона изменения коэффициента избытка воздуха на выходе из камеры сгорания от 4 до 8:

- при $1 < \alpha_M < 2,0$ $q'_l = q_{l.\max}$,
- при $\alpha_M < 1,0$ $q'_l = q_{l.\max} \cdot \alpha_M$,
- при $7,0 > \alpha_M > 2,0$
 $q'_l = q_{l.\max} (1,4 - 0,19\alpha_M)$,
- при $\alpha_M > 7,0$ $q'_l = q_{l.\max} \cdot 0,1$.

Суммарная степень черноты пламени в конце зоны горения (в зоне пламени), необходимая для определения результирующих лучистых потоков к стенкам жаровой трубы, рассчитывалась как функция степени черноты продуктов сгорания углеводородного топлива в этой зоне и степени черноты сажистых частиц и по формулам

$$\varepsilon_{\text{пл}} = 1 - (1 - \varepsilon_c)(1 - \varepsilon_{\text{г.пл}}),$$

$$\varepsilon_{\text{г.пл}} = \varepsilon_{H_2O_{\text{пл}}} + \varepsilon_{CO_2_{\text{пл}}} - (\varepsilon_{CO_2} \cdot \varepsilon_{H_2O})_{\text{пл}}.$$

Степень черноты продуктов сгорания определялась по табличным зависимостям, приведенным в [10]

$$\varepsilon_{H_2O_{\text{пл}}} = f(t_{\text{г.макс}}^*, (L \cdot p_{H_2O})_{\text{пл}}),$$

$$\varepsilon_{CO_2_{\text{пл}}} = f(t_{\text{г.макс}}^*, (L \cdot p_{CO_2})_{\text{пл}}),$$

где L – длина пути луча продуктов сгорания в жаровой трубе.

За конец зоны горения в жаровой трубе принималось сечение, в котором средний по сечению местный коэффициент избытка воздуха составляет 1,65. Поэтому относительное парциальное давление продуктов сгорания в конце зоны горения рассчитывалось как функция $\alpha_M = 1,65$, согласно данным [6]:

$$\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{\text{г}}}\right)_{\text{пл}} = f(\alpha_M = 1,65),$$

$$\left(\frac{p_{CO_2}}{p_{\text{г}}}\right)_{\text{пл}} = f(\alpha_M = 1,65).$$

Произведение длины пути луча продуктов сгорания на парциальное давление в конце зоны горения, необходимое для определения степени черноты этих продуктов, рассчитывается по формулам

$$(L \cdot p_{H_2O})_{\text{пл}} = 1,76 H_{\text{ж}} \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{\text{г}}}\right)_{\text{пл}} \cdot p_{\text{к}}^* ;$$

$$(L \cdot p_{CO_2})_{\text{пл}} = 1,76 H_{\text{ж}} \left(\frac{p_{CO_2}}{p_{\text{г}}}\right)_{\text{пл}} \cdot p_{\text{к}}^* ,$$

где $p_{\text{к}}^*$ – давление воздуха в камере на выходе из компрессора.

В блоке программы «Потоки 1,2» рассчитываются конвективные потоки теплоты от газа в жаровой трубе и от вторичного воздуха в кольцевом канале к элементам секции жаровой трубы. При этом величина коэффициента теплоотдачи от газа к стенкам жаровой трубы рассчитывается согласно [1] по формуле

$$\alpha_{\text{г}} = 0,0296 \cdot C_{p,r}(\rho W)_{\text{г}} \cdot \text{Re}_{\text{г}}^{-0,2} \cdot \text{Pr}^{-0,6},$$

преобразованной к виду

$$\alpha_{\text{г}}[z, j] = \frac{133 C_{p,r}[z] \cdot (\rho W)_{\text{г},z}}{\text{Re}_{\text{г}}[z, j]^{0,2}},$$

где $\text{Re}_{\text{г}}[z, j] = \frac{(\rho W)_{\text{г},z} \cdot \delta[z] \cdot j}{\mu_{\text{г}}[z]}$.

Величина местного равновесного коэффициента теплоотдачи в тепловом пограничном слое от смеси газа и воздуха к элементам секций рассчитывается согласно [1, 4] как функция коэффициента теплоотдачи от газа к жаровой трубе $\alpha_{\text{г}}$ и параметров m, n, Θ_e по формуле

$$\alpha_e[k, z, j] = \alpha_{\text{г}}[z, j] \left[\frac{m[k, z] + (1 - m[k, z]) \cdot \Theta_e[k, z, j]}{n[z] + (1 - n[z]) \cdot \Theta_e[k, z, j]} \right]^{0,8}.$$

Величина местного коэффициента теплоотдачи от вторичного воздуха в кольцевом канале камеры к элементам секций рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{кк}}[k, z, j] = \frac{0,0296 \text{Re}_{\text{кк}}[k, z, j]^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{в}}^{0,43} \cdot \lambda_{\text{в.кк}}}{\delta[z] \cdot j},$$

с использованием критериальной зависимости при продольном обтекании пластины турбулентным потоком [10]

$$\text{Nu} = 0,0296 \text{Re}_{\text{кк}}^{0,8} \text{Pr}_{\text{г}}^{0,43},$$

где $\text{Re}_{\text{кк}}[k, z, j] = \frac{W_{\text{кк}}[k, z] \cdot \rho_{\text{в.кк}}[k, z] \cdot \delta[z] \cdot j}{\mu_{\text{в.кк}}}$.

Величина местного коэффициента теплоотдачи от вторичного воздуха в кольцевом канале камеры к элементам корпуса также рассчитывается по формуле с использованием критериальной зависимости при продольном обтекании пластины турбулентным потоком [10]. При этом характерным размером является текущая длина корпуса $L_{\text{кор.тек}}$ (от начала корпуса до центра соответствующего z -го элемента корпуса)

$$\alpha_{\text{кк-кор}}[k, z] = \frac{0,0296 \text{Re}_{\text{кк-кор}}[k, z]^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{в}}^{0,43} \cdot \lambda_{\text{в.кк}}}{L_{\text{кор.тек}}[z]},$$

$$\text{где } \text{Re}_{\text{кк-кор}} [k, z] = \frac{W_{\text{кк}} [k, z] \cdot \rho_{\text{в.кк}} [k, z] \cdot L_{\text{кор.тек}} [z]}{\mu_{\text{в.кк}}}$$

В блоке «Потоки 3,4» рассчитываются результирующий лучистый поток тепла от газа к элементам секций жаровой трубы [3]

$$Q_{\text{луч.газ-жар}} [k, z, j] = \varepsilon'_w \left(q'_n [z] - \frac{\sigma_0}{1000} A_w \cdot T_{w,0}^4 [k, z, j] \right) \cdot F_{\text{эл}} [k, z],$$

и лучистый поток теплоты от элементов секций жаровой трубы к элементам корпуса [10]

$$Q_{\text{луч.жар-кор}} [k, z, j] = \varepsilon_{\text{пр}} [k, z] \frac{\sigma_0}{1000} \times (T_{w,0}^4 [k, z, j] - T_{\text{кор.0}}^4 [k, z]) \cdot F_{\text{кор}} [k, z],$$

где ε'_w – эффективная степень черноты стенки жаровой трубы $\varepsilon'_w = 0,5(1 + \varepsilon_w)$, ε_w – степень черноты стенки жаровой трубы, A_w – коэффициент поглощения пламени, $A_w = \varepsilon_{\text{пл}}$, σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана $\sigma_0 = 5,7 \times 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴), q'_n – плотность падающего лучистого потока, кВт/м², $T_{w,0}$ – температура элементов секции жаровой трубы в предыдущий шаг счета по времени, К, $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы жаровая труба – корпус [10].

В блоке «Кожух» рассчитываются конвективные потоки теплоты от вторичного воздуха в кольцевом канале и от обдувающего корпус воздуха к элементам корпуса, а также температура элементов корпуса.

При расчете конвективного потока теплоты от воздуха, обдувающего корпус,

$$Q_{\text{воз.обд}} [k, z] = \alpha_{\text{обд}} [k, z] \cdot (T_{\text{кор}} [k, z] - T_{\text{обд}} [k]) \cdot F_{\text{кор}} [k, z]$$

используются критериальные уравнения для средней теплоотдачи при продольном обтекании пластины [10]

- при $\text{Re}_{\text{обд}} \leq 5 \cdot 10^5$
 $\text{Nu}_{\text{обд}} [k, z] = 0,66 \text{Re}_{\text{обд}} [k, z]^{0,5} \cdot \text{Pr}_B^{0,33}$,
- при $\text{Re}_{\text{обд}} > 5 \cdot 10^5$
 $\text{Nu}_{\text{обд}} [k, z] = 0,037 \text{Re}_{\text{обд}} [k, z]^{0,8} \cdot \text{Pr}_B^{0,43}$,

где при $k = 1$

$$\text{Re}_{\text{обд}} [k = 1, z] = \frac{W_{\text{обд}} \cdot L_{\text{кор.тек}} [z]}{\mu_{\text{в.обд}}},$$

при $k = 2$

$$\text{Re}_{\text{обд}} [k = 2, z] = \frac{G_{\text{внутр}} \cdot L_{\text{кор.тек}} [z]}{\mu_{\text{в.внутр}} \cdot F_{\text{внутр}}},$$

$$\alpha_{\text{обд}} [k, z] = \frac{\text{Nu}_{\text{обд}} [k, z] \cdot \lambda_{\text{обд}} [k]}{L_{\text{кор.тек}} [z]},$$

$W_{\text{обд}}$ – скорость воздуха, обдувающего наружный корпус, $L_{\text{кор.тек}}$ – текущая длина корпуса, $G_{\text{внутр}}$ – расход воздуха, обдувающего внутренний корпус, $F_{\text{внутр}}$ – площадь канала между внутренним корпусом и корпусом трансмиссии, z – номер элемента корпуса, равный номеру секции жаровой трубы.

Расчет теплового потока от воздуха в кольцевом канале к элементу корпуса и расчет температуры элементов корпуса производится по формулам

$$Q_{\text{воз.кк-кор}} [k, z] = \alpha_{\text{кк-кор}} [k, z] \cdot (T_{\text{к}}^* - T_{\text{кор.0}} [k, z]) \cdot F_{\text{кор}} [k, z],$$

$$T_{\text{кор}} [k, z] = T_{\text{кор.0}} [k, z] + \frac{Q_{\text{кор.сум}} [k, z]}{C_{\text{м}} \cdot G_{\text{м.кор}} [k, z]} \Delta \tau,$$

где $C_{\text{м}}$ – теплоемкость материала корпуса, Дж/(кг·К), $G_{\text{м.кор}}$ – масса элемента корпуса, $\Delta \tau$ – шаг счета по времени, с, $Q_{\text{кор.сум}}$ – алгебраическая сумма конвективных потоков теплоты к элементу корпуса от воздуха в кольцевом канале и от обдувающего воздуха, а также суммарного лучистого потока теплоты от всех элементов z -й секции жаровой трубы к z -му элементу корпуса

$$Q_{\text{кор.сум}} [k, z] = Q_{\text{воз.кк-кор}} [k, z] + \sum_{j=1}^{N1} Q_{\text{луч.жар-кор}} [k, z, j] + Q_{\text{воз.обд}} [k, z],$$

где $N1 = \text{ЧЭ}$ – число элементов в секции (номер последнего элемента секции).

В блоке «Баланс» рассчитывается алгебраическая сумма конвективных и лучистых потоков теплоты к элементу секции жаровой трубы

$$Q_{\text{жар.сум}} [k, z, j] = Q_{\text{кон.газ-жар}} [k, z, j] + Q_{\text{луч.жар}} [k, z, j] - Q_{\text{воз.к.к-жар}} [k, z, j] - Q_{\text{луч.жар-кор}} [k, z, j]$$

и температура этих элементов

$$T_w [k, z, j] = T_{w,0} [k, z, j] + \frac{Q_{\text{жар.сум}} [k, z, j]}{C_{\text{м}} \cdot G_{\text{м.эл}} [k, z]} \Delta \tau.$$

В случае расчета температурного состояния камеры на установившемся режиме работы (ПР=0) при достижении условия

$$\left| \sum_{k=1}^2 \sum_{z=1}^N \sum_{j=1}^{N1} Q_{\text{жар.сум}} [k, z, j] \right| \leq Q_{\text{доп}},$$

(где $Q_{\text{доп}} = 0,01 \dots 0,02$ кВт), расчет прекращается с выдачей результатов расчета на печать. В случае расчета температурного состояния камеры на неустановившихся режимах работы ГТД (ПР = 1) расчет продолжается до достижения конечного времени переходного процесса, заданного в исходных данных. При этом начальное температурное состояние элементов жаровой трубы и корпуса предварительно рассчитывается на исходном (перед переходным процессом) установившемся режиме работы и задается в исходных данных. При проведении расчетов теплового состояния камеры по описанной выше модели шаг счета по времени составлял $\Delta t = 0,01 \dots 0,02$ с.

Особенностями модели и программы для математического моделирования теплового состояния жаровых труб кольцевых камер сгорания, имеющих схему охлаждения «В» (рис. 2), является наличие дополнительного блока для расчета температуры последнего элемента секций при струйном ударном натекании на него охлаждающего воздуха.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при ударном натекании струй на поверхность элемента секции использовалась зависимость, полученная в [12], при соотношении высоты канала (щели) и диаметра отверстий $1,5 \leq h/d_{\text{отв}} \leq 8$

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{стр}} [k, z] &= \\ &= 0,78 \text{Re}_{\text{стр}} [k, z]^{0,5} \text{Pr}^{0,33} (h_{\text{щ}} / d_{\text{отв}} [k, z])^{0,12}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{стр}} [k, z] &= \frac{W_{\text{отв}} [k, z] \cdot d_{\text{отв}} [k, z] \cdot \rho_{\text{в.кк}} [k, z]}{\mu_{\text{в.кк}}}, \\ \alpha_{\text{стр}} [k, z] &= \frac{\text{Nu}_{\text{стр}} [k, z] \cdot \lambda_{\text{в.кк}}}{d_{\text{отв}} [k, z]}. \end{aligned}$$

Расчет теплового состояния последних элементов секций жаровой трубы $T_w[k, z, j = \text{ЧЭ}]$, на которые натекает воздух из отверстий, выполнялся методом последовательных приближений из уравнения

$$\begin{aligned} \alpha_e (T_e^* - T_w) F_{\text{эл}} \frac{4,19}{3600} + \varepsilon_w' \left(q_{\text{лг}} - \frac{\sigma_0 A_w T_w^4}{1000} \right) F_{\text{эл}} - \\ - \alpha_{\text{стр}} (T_w - T_k^*) F_{\text{эл}} \frac{4,19}{3600} \leq Q_{\text{доп}} \end{aligned}$$

до соблюдения условия $Q_{\text{доп}} \leq 0,001$ кВт.

Последнее уравнение выделено в отдельную самостоятельную подпрограмму «Струя». Исходные данные, необходимые в подпрограмме для решения последнего уравнения, рассчитываются в основной программе «Камера».

Программа «Камера» апробирована при расчетах теплового состояния кольцевых камер сгорания одноконтурных ГТД «С» и «Б», имеющих схему охлаждения «А», и при расчетах теплового состояния камеры сгорания двухконтурного ГТД «Л», имеющего схему охлаждения «В». Проведена верификация разработанной математической модели камеры путем сравнения результатов расчета теплового состояния жаровых труб камер сгорания ГТД «С» и «Л» с результатами их термометрирования. Отличие расчетной температуры секций жаровой трубы камеры сгорания ГТД «С» от измеренной при термометрировании составляет 20...80 градусов, что соответствует $\delta T = (3,5 \dots 11) \%$ (рис. 7).

Средняя абсолютная величина отличия результатов расчета максимальных температур наружных и внутренних секций жаровой трубы ГТД «Л» от максимальных температур секций при их термометрировании термометрирования составила $|\delta_{\text{ср}}| = 6,0 \dots 7,6 \%$.

Разработанная математическая модель расчета теплового состояния кольцевых камер сгорания ГТД может быть использована при их проектировании и доводке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жестков Б. А.** Основы теории и расчета теплового состояния стенок камер сгорания реактивных двигателей: учебное пособие. Уфа: УАИ, 1980. 94 с.
2. **Апельбаум С. О., Жестков Б. А.** Охлаждение стенок жаровых труб камер сгорания ТРД, предназначенных для работы при высоких температурах и давлениях воздуха // Труды ЦИАМ. 1959. № 368. 24 с.
3. **Апельбаум С. О.** Лучистый теплообмен в основных камерах сгорания. Труды ЦИАМ. 1974. № 481. 29 с.

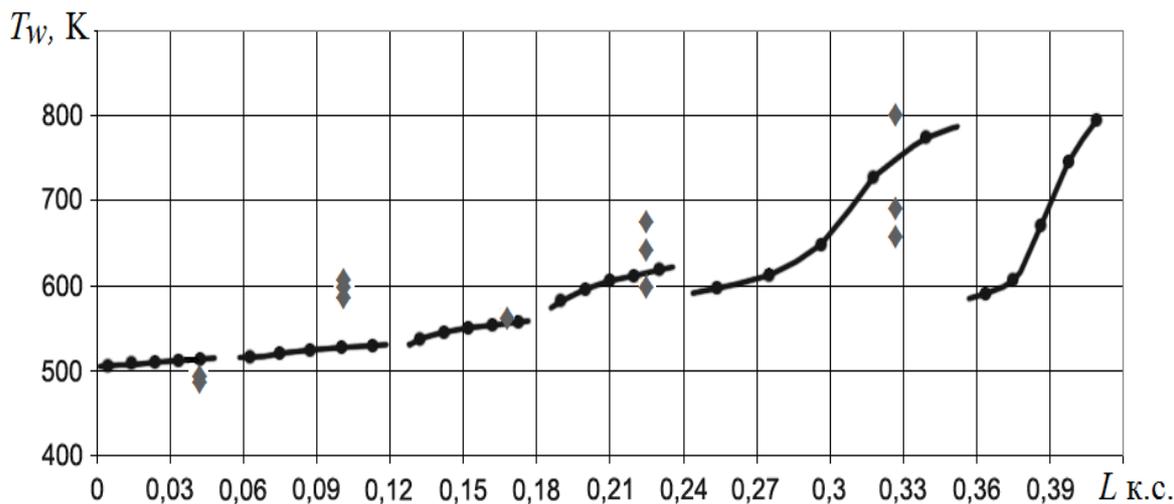


Рис. 7. Сравнение результатов расчета теплового состояния жаровой трубы камеры сгорания ГТД «С» с результатами термометрирования (● - расчет, ◆ - эксперимент)

4. Глазков В. В., Жестков Б. А., Гусева М. Д. Расчетное и экспериментальное исследование струйного охлаждения пластины при $m > 1,0$. Техн. отчет № 7303. М.: ЦИАМ, 1974.

5. Экономичность струйного комбинированного охлаждения пластины в условиях сложного теплообмена / В. В. Глазков [и др.] // Теплофизика высоких температур. 1982, Т. 20, № 4. С. 692–699.

6. Лукаш В. П. Методика расчета лучистых потоков тепла от продуктов сгорания углеводородных топлив (углекислого газа и водяного пара): техн. отчет № 6013. М.: ЦИАМ, 1974.

7. Кофман В. М., Тагилова Р. А. Алгоритм и программа поверочного расчета температурного состояния кольцевой камеры сгорания // Автоматизированное проектирование авиационных двигателей: тез. докл. 4-й отраслевой конф. Труды ЦИАМ. 1984. № 1095. С. 82–83.

8. Кофман В. М., Тагилова Р. А. Математическая модель и программа поверочного расчета температурного состояния кольцевой камеры сгорания ГТД со струйным комбинированным охлаждением // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепло-

вых двигателей: межвуз. науч. сб. Уфа, 2004. № 20. С. 132–151.

9. Безменов В. Я., Бородин А. П., Вале-ев Р. С. Методика гидравлического расчета камер сгорания на ЭВМ: техн. отчет № 6759. М.: ЦИАМ, 1971. 165 с.

10. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.

11. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

12. Дыбан Е. П., Мазур А. И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: Наукова думка, 1982. 303 с.

ОБ АВТОРЕ

Кофман Вячеслав Моисеевич, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УГАТУ, 1970). Канд. техн. наук (УГАТУ, 1983). Иссл. в обл. идентификации и матем. моделирования ГТД.