

К РАСЧЕТУ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАДИАЦИОННО ОХЛАЖДАЕМЫЕ НАСАДКИ СОПЕЛ РД

Бережинский Р.А., Гуменный А.В., Коробченко В.А., Орлов В.А.
Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж

Радиационно охлаждаемые насадки (РОН) применяются для сопел высотных ракетных двигателей (РД) для увеличения степени расширения газов в сопле, и соответственно увеличения тяги двигателя, и, следовательно, удельного импульса тяги, а так же для уменьшения массы сопловой части. Перспективным направлением развития РД является применение сдвижных РОН, позволяющих уменьшать длину РД в транспортном положении.

Всвязи с перспективностью применения РОН в камерах РД инженер неизбежно сталкивается с необходимостью расчета температурного состояния оболочки РОН для обеспечения условий ее работоспособности.

Для расчета стационарного температурного состояния РОН в условиях работы РД необходимо знать тепловые потоки, действующие на оболочку РОН (см. рис. 1): конвективный тепловой поток внутри сопла от продуктов сгорания топлива q_1 ; радиационный тепловой поток от стенок сопла, характеризующий перенос тепла излучением по поверхностям регенеративно охлаждаемой части сопла и РОН q_2 ; радиационный тепловой поток от горячего газа из камеры сгорания через критическое сечение q_3 ; радиационный тепловой поток от внутренней поверхности РОН в окружающую среду q_4 ; радиационный тепловой поток в окружающую среду от внешней поверхности сопла q_5 ; тепловой поток, возникающий за счет перетекания тепла вдоль поверхности сопла q_6 ; конвективный тепловой поток к внешней поверхности сопла q_7 .

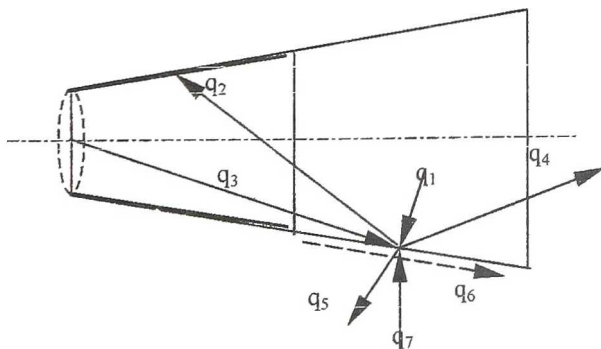


Рис. 1. Схема действия тепловых потоков на оболочку РОН

Необходимо отметить, что на оболочку РОН воздействует лучистый тепловой поток от продуктов сгорания топлива. Этим потоком можно пренебречь, так как его величина пренебрежимо мала в связи с тем, что температура поверхности углерод-углеродного РОН со стороны продуктов сгорания приблизительно равна статической температуре газов в сопле (порядка 1200÷1800К).

Уравнение теплового баланса для стационарного теплового режима РОН можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^7 q_i = 0, \\ q = q_s + q_7, \\ q = -\frac{\lambda_{ст.н}}{\delta_{ст.}} (T_{ст.г} - T_{ст.х}); \end{cases} \quad (1)$$

где $\lambda_{ст.н}$ - теплопроводность материала стенки сопла в нормальном к поверхности сопла направлении;

$\delta_{ст.}$ - толщина материала стенки сопла;

$T_{ст.г}$ - температура поверхности сопла со стороны продуктов сгорания топлива;

$T_{ст.х}$ - температура внешней поверхности сопла.

Здесь предполагается, что температура внутренней поверхности сопла по окружности постоянна и учитывается градиент температуры по толщине стенки. Кроме того, в дальнейшем для краткости поверхностную плотность теплового потока будем именовать тепловым потоком. Необходимо отметить, что в выражении (1) тепловые потоки, подводимые к оболочке РОН имеют знак “+”, отводимые - знак “-”.

Конвективный тепловой поток к стенке сопла от продуктов сгорания топлива при условии, что температура поверхности постоянна и равна местной температуре поверхности в рассматриваемом сечении РОН, определяется как

$$q_{конв. при T_{ст}(x)=const} = q_{эт}(x) \cdot \frac{S}{S_{эт}}, \quad (2)$$

где $q_{эт}(x)$ - конвективный тепловой поток к стенке сопла в данном сечении при эталонных условиях ($\alpha_{ок\ эт}=1$, $T_{ст.г\ эт}=1000K$);

S , $S_{эт}$ - значение комплекса теплофизических параметров (так называемая S-функция) соответственно для расчетного режима при $T_{ст.г}(x)$, коэффициенте избытка окислителя $\alpha_{ок}$ в пристеночном слое и при эталонных условиях;

x - текущая координата по оси симметрии сопла, отсчитываемая от критического сечения.

Так как на РОН температура поверхности по длине резко меняется в районе стыка с охлаждаемой частью сопла и пограничный слой не успевает перестроиться при изменении температуры стенки, то конвективный тепловой поток уменьшается. В районе стыка предлагается влияние тепловой завесы учитывать следующим образом

$$Q_{\text{конв. при } T_{\text{ст}}(x) \neq \text{const}} = Q_{\text{конв. при } T_{\text{ст}}(x) = \text{const}} \cdot N, \quad (3)$$

где N - поправка на влияние резкого изменения температуры стенки в районе стыка РОН, учитывающая влияние тепловой завесы на конвективный тепловой поток.

Для стенки осесимметричного сопла с газовой завесой при обтекании газом с большими скоростями

$$N = \frac{T_{\text{ст}}^*(x) - T_{\text{ст.г}}(x)}{T_{\text{эф}}(x) - T_{\text{ст.г}}(x)}, \quad (4)$$

где $T_{\text{эф}}(x)$ - эффективная температура продуктов сгорания, определяемая по методике В.М. Ивлева при $\alpha_{\text{ок}}$ в пристеночном слое;

$T_{\text{ст}}^*(x)$ - температура адиабатной стенки;

Вводя понятие эффективности тепловой завесы

$$\Theta = \frac{(T_{\text{эф}}(x) - T_{\text{ст}}^*(x))}{(T_{\text{эф}}(x) - T_{\text{ст.охл}})}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ст.охл}}$ - температура стенки со стороны продуктов сгорания охлаждаемой части сопла в районе стыка с РОН;

выражение для поправки N на влияние тепловой завесы можно записать в виде

$$N = 1 - \Theta \frac{(T_{\text{эф}}(x) - T_{\text{ст.охл}})}{(T_{\text{эф}}(x) - T_{\text{ст.г}}(x))}. \quad (6)$$

Здесь эффективность тепловой завесы можно определять по известным формулам для адиабатической стенки с предвключенным участком теплообмена. При этом предполагается, что известно распределение $\alpha_{\text{ок}}$ в пристеночном слое по длине сопла.

Учитывая, что энергия, переданная путем лучистого теплообмена первым элементом второму на единицу площади:

$$dq = \frac{d\Theta_{12}}{dF_1} = E_1 \cdot E_2 \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r_\varphi^2} dF_2, \quad (7)$$

где φ_1 и φ_2 - углы между линией r_φ , соединяющей центральные точки элементов поверхности и нормалью к ним;

E_1, E_2 - степень черноты соответственно первого и второго элемента;

C_0 - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

и для канала круглого сечения с произвольной образующей

$$dF_2 = \frac{dx}{\cos \alpha} \cdot R \cdot d\psi, \quad (8)$$

где α - угол наклона касательной к кольцу шириной dx ;

R - радиус этого канала;

ψ - центральный угол, отсчитываемый от некоторого фиксированного положения;

радиационный тепловой поток от стенок сопла, характеризующий перенос тепла излучением по внутренней поверхности регенеративно охлаждаемой части сопла и РОН можно определить из соотношения

$$q_2 = \int_{x_0}^{x_2} \int_0^{2\pi} E_1 \cdot E_2(x) \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_{2,ст.г}(x)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{1,ст.г}}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot R_2(x)}{\pi \cdot r_\varphi^2 \cdot \cos \alpha_2(x)} d\psi dx, \quad (9)$$

где x_0, x_2 - соответственно координаты горла сопла и среза РОН;

$E_1, E_2(x)$ - степень черноты соответственно текущего участка и внутренней поверхности сопла.

Выражение для локального углового коэффициента излучения, характеризующего тепловой поток, получаемый всей поверхностью второго элемента от первого, можно записать в общем виде:

$$\varphi_{12} = \int_{F_1} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r_\varphi^2} dF_2, \quad (10)$$

Локальный угловой коэффициент излучения по контуру сопла φ_c , характеризующий интегральную степень облучаемости рассматриваемого участка РОН от всей поверхности сопла, определяется следующим образом:

$$\varphi_c = \int_{x_0}^{x_2} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot R_2(x)}{\pi \cdot r_\varphi^2 \cdot \cos \alpha_2(x)} d\psi dx. \quad (11)$$

Если учесть, что газ из камеры сгорания через горло сопла излучает как некоторая светящаяся стенка с температурой T_0 и степенью черноты E_g , соответствующей поглощательной способности слоя газа данного состава при известных p_0 и T_0 и характерной длины L , то выражение для радиационного теплового потока от светящегося газа из камеры сгорания через горло сопла можно записать в виде

$$q_3 = \int_0^B \int_0^{\sqrt{R_r^2 - (R_r - y)^2}} 2E_1(x)E_r C_0 \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{1,CTI}}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r_\varphi^2} dzdy, \quad (12)$$

где $B = R_r + R_1 - (x_1 - x_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1,$ (13)

$E_1(x)$ - степень черноты внутренней поверхности сопла.

Если величина $B < 0$, т.е. из точки "1" горло сопла не просматривается, то $q_3 = 0$. Если же $B > 2R_r$, то значение ее принимается равным $2R_r$, т.е. $B = 2R_r$, где R_r - радиус критического сечения.

Локальный угловой коэффициент излучения из критического сечения сопла $\varphi_{\text{кр}}$, характеризующий интегральную величину лучистого теплового потока, получаемого рассматриваемым участком РОН от горячего газа из камеры сгорания через критическое сечение,

$$\varphi_{\text{кр}} = \int_0^B \int_0^{\sqrt{R_r^2 - (R_r - y)^2}} 2 \cdot \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot r_\varphi^2} dzdy. \quad (14)$$

Таким же образом можно определить излучение от внутренней поверхности стенок сопла в атмосферу. Однако здесь не правильно заменять видимую часть окружающего пространства холодной стенкой с температурой T_H , т.к. при приближении к краю РОН, т.е. к "фиктивной" холодной стенке, угол φ_2 будет стремиться к $\pi/2$ ($\cos \varphi_2 \rightarrow 0$). На самом деле излучение от этой точки наибольшее.

Используя принцип замкнутости, значение $\varphi_{\text{кр}}$ следует определять из условия $\varphi_2 = 1$ по формуле:

$$\varphi_{\text{кр}} = 1 - \varphi_c - \varphi_{\text{кр}}. \quad (15)$$

Тогда радиационный тепловой поток от внутренней поверхности РОН в окружающую среду

$$q_4 = \varphi_{\text{кр}} \cdot E_H \cdot E_1 \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{1,CTI}}{100} \right)^4 \right], \quad (16)$$

где E_1, E_H - степень черноты внутренней поверхности сопла и окружающего пространства соответственно;

T_H - температура окружающей среды.

Наружная стенка РОН излучает тепло в окружающее пространство, и величина теплового потока определяется по формуле:

$$q_5 = E_{CT.X} \cdot E_H \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CT.X}}{100} \right)^4 \right], \quad (17)$$

где $E_{\text{ст.х}}$, $E_{\text{н}}$ - степень черноты наружной поверхности сопла и окружающего пространства соответственно;

$T_{\text{н}}$ - температура окружающей среды;

$T_{\text{ст.х}}$ - температура поверхности НСН со стороны окружающей среды.

Помимо радиационного теплового потока возможен и конвективный тепловый поток

$$q_7 = \alpha_{\text{н}} \cdot (T_{\text{но}} - T_{\text{ст.х}}), \quad (18)$$

где $\alpha_{\text{н}}$ - коэффициент теплоотдачи окружающей среды;

$T_{\text{но}}$ - температура торможения окружающей среды.

Так как температура поверхности сопла переменна, то возникает перетекание тепла из области с большей температурой в область с меньшей температурой за счет теплопроводности материала стенки. Величина этого теплового потока на рассматриваемом участке, определяется по формуле:

$$q_6 = \lambda_0 \cdot \delta_{\text{ст}} \cdot \frac{d^2 T_{\text{ст}}}{d\ell^2}, \quad (19)$$

где λ_0 - теплопроводность материала стенки сопла в тангенциальном направлении;

$\delta_{\text{ст}}$ - толщина стенки сопла;

$T_{\text{ст}}$ - температура стенки сопла;

$d\ell$ - длина элементарного участка РОН по образующей контура сопла;

ℓ - текущая координата по образующей контура сопла.

Необходимо отметить, что тепловой поток q_6 характеризует количество тепла, перетекшее из области с большей температурой в область с меньшей температурой за счет теплопроводности материала стенки, толщиной $\delta_{\text{ст}}$, отнесенное к площади поверхности рассматриваемого участка РОН.

Таким образом, выше представленные уравнения представляют собой замкнутую систему, в которой температуры стенок РОН могут быть определены методом последовательных приближений

По выше приведенной методике были получены локальные угловые коэффициенты φ_c , $\varphi_{\text{р}}$ и $\varphi_{\text{ф}}$ для двух вариантов исходных данных.

Первый вариант: круглая труба, диаметром 0,2 м, длиной 1 м. До $x_1=0,75$ м охлаждаемая часть, далее РОН (см. рис.2). **Второй вариант:** конус, с диаметрами горла 0,2 м, среза – 0,5526 м, длиной 1 м (угол наклона образующей к оси $\alpha=10^\circ$). До $x_1=0,75$ м охлаждаемая часть, далее РОН (см. рис.3).

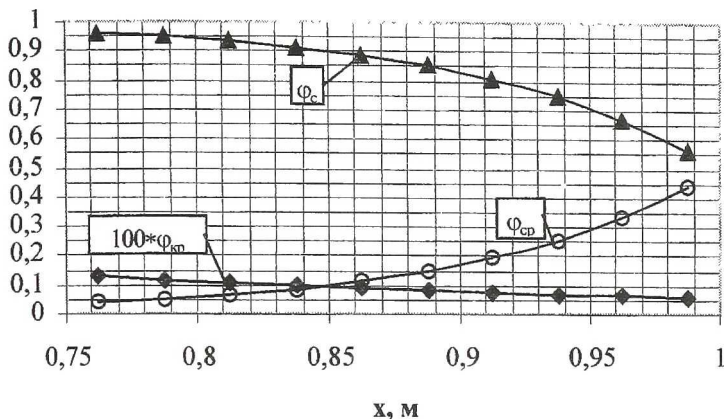


Рис. 2. Локальные угловые коэффициенты для I варианта

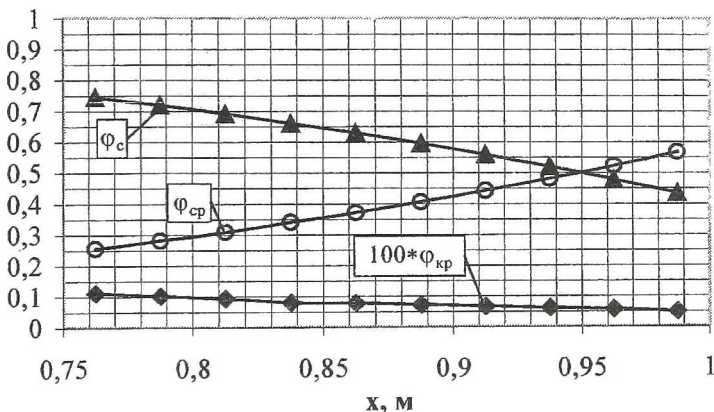


Рис. 3. Локальные угловые коэффициенты для II варианта

Как видно из результатов расчетов $\varphi_{кр} \ll \varphi_c$ и $\varphi_{кр} \ll \varphi_{ср}$. Поэтому для расчета температурного состояния РОН можно положить $\varphi_{кр} \approx 0$, т.е. $q_3 = 0$ и $\varphi_{ср}$ определять по формуле

$$\varphi_{ср} = 1 - \varphi_c. \quad (20)$$

Таким образом, выше представленные уравнения представляют собой замкнутую систему, в которой локальные угловые коэффициенты могут быть определены численным интегрированием по контуру сопла, а температуры стенок РОН могут быть определены методом последовательных приближений.