

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

В.П. БЕЛОВ

СОПЛОВЫЕ БЛОКИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2019

УДК 621.454.035.6(075.8)
Б 43

Белов, В.П.

Б 43

Рассматриваются процессы, протекающие в сопле ракетного двигателя, влияние параметров сопла на выходные характеристики двигателя, проектирование и конструкция сопловых блоков для двигателей различного типа и назначения.

Предназначено для обучающихся по направлениям 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика» и 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов».

УДК 621.454.035.6(075.8)

Р е ц е н з е н т ы: д-р техн. наук, консультант КБ «Арсенал»
В.Д. Атамасов, д-р техн. наук, проф. БГТУ *В.А. Пинчук*

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

© В.П. Белов, 2019
© БГТУ, 2019

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОПЛОВОГО БЛОКА

Основное назначение любого ракетного двигателя – перемещение летательного аппарата в окружающем пространстве. Для такого перемещения необходима сила. Так как в большинстве случаев в ракетных двигателях используется принцип реактивного движения, то движущей силой является реактивная сила, создаваемая истекающей из двигателя массой рабочего тела. В основном в двигателях используется газообразное рабочее тело. В химических двигателях это продукты сгорания ракетного топлива. Топливо сгорает в камере сгорания двигателя, а истечение продуктов его сгорания осуществляется через сопло, в котором тепловая энергия преобразуется в кинетическую энергию истекающей струи. Выходные параметры двигателя (энергетические, массовые и габаритные) во многом зависят от характеристик сопла.

Если рассмотреть летательный аппарат (ЛА) с ракетным двигателем (РД) как изолированную систему, перемещающуюся в некотором пространстве, то при работе двигателя ЛА получает приращение скорости движения за счет истечения некоторой массы рабочего тела. На основе закона сохранения количества движения для такой системы, можно записать:

$$\Delta u_{\text{ЛА}} \cdot M_{\text{ЛА}} - u_{\text{РТ}} \cdot M_{\text{РТ}} = 0,$$

где $\Delta u_{\text{ЛА}}$ – приращение скорости ЛА; $M_{\text{ЛА}}$ – масса ЛА; $u_{\text{РТ}}$ – скорость истечения рабочего тела; $M_{\text{РТ}}$ – масса рабочего тела.

Из этого выражения следует, что

$$\Delta u_{\text{ЛА}} = (M_{\text{РТ}} / M_{\text{ЛА}}) \cdot u_{\text{РТ}}. \quad (1)$$

Для выполнения целевой задачи конкретным ЛА с массой $M_{\text{ЛА}}$ требуется достичь определенного приращения скорости $\Delta u_{\text{ЛА}}$. Требуемое приращение скорости определяют внешнебаллистическим расчетом, в результате которого рассчитывают конечную скорость, обеспечивающую требуемую дальность полета ракеты или требуемую высоту подъема космического аппарата. При известных $M_{\text{ЛА}}$ и $\Delta u_{\text{ЛА}}$ согласно выражению (1) оказывается, что при повышении скорости истечения рабочего тела из двигателя потребуются меньшая его масса (масса топлива) для выполнения поставленной задачи. Отсюда следует важный вывод: сопло двигателя должно обеспечивать по возможности большее значение скорости истечения рабочего тела. Это – одно из требований к сопловому блоку. Другие

требования заключаются в следующем. Сопло должно создать необходимый секундный массовый расход (или тягу) двигателя, высокий удельный импульс тяги, минимальные массу конструкции и габариты и, при необходимости, позволять управлять движением ЛА за счет изменения вектора тяги двигателя.

1.1. Форма и параметры сопла

Сопло ответственно за получение высоких скоростей истечения рабочего тела из двигателя. Для достижения максимально возможной величины скорости требуется определенная форма сопла. Рассмотрим течение потока газообразного рабочего тела по соплу. Для описания параметров потока используем следующие уравнения:

- сохранения массы $\rho_{\Gamma} u_{\Gamma} F_{\text{прох}} = \text{const}$;
- движения $u_{\Gamma} du_{\Gamma} = -dp/\rho_{\Gamma}$;
- сохранения энергии для адиабатического процесса:

$$p \cdot \rho_{\Gamma}^{-k} = \text{const},$$

где ρ_{Γ} и u_{Γ} – соответственно плотность и скорость движения газа; p – давление газового потока; $F_{\text{прох}}$ – площадь проходного сечения сопла; k – коэффициент адиабаты.

Из решения этих уравнений нетрудно получить выражение, связывающее приращение скорости потока с приращением площади проходного сечения:

$$(M^2 - 1) du_{\Gamma} / u_{\Gamma} = dF_{\text{прох}} / F_{\text{прох}},$$

где M – число Маха. Данное выражение позволяет сделать следующие выводы:

1. При малых дозвуковых скоростях движения газа в начальной части сопла (скорость газа на входе в сопло не превышает 200 м/с, а $M \leq 0,2$) для увеличения скорости требуется уменьшать площадь проходного сечения сопла.

2. После достижения скорости звука ($M = 1$) для дальнейшего возрастания скорости необходимо, напротив, увеличивать проходное сечение.

3. С учетом этого сопло должно состоять из двух частей: входной (дозвуковой) сужающейся части и выходной (сверхзвуковой)

расширяющейся части. Последняя часть часто называется раструбом сопла. Границей между ними является критическое сечение сопла, в котором всегда скорость газа равна скорости звука, т.е. $M = 1$.

Основные параметры сопла, определяющие его геометрию и характеристики газового потока:

- диаметр критического сечения (рассчитывают по секундному массовому расходу);
- диаметр входного сечения (принимают равным диаметру камеры сгорания для ЖРД и равным двум диаметрам критического сечения для РДТТ);
- геометрическая степень расширения сопла, равная отношению площади выходного сечения к площади критического сечения ($n_c = F_a / F_{кр}$);
- диаметр выходного сечения (рассчитывается по n_c);
- степень расширения сопла по давлению, равная отношению давлению на входе в сопло к давлению на выходе ($\varepsilon_c = p_0 / p_a$).

Две степени расширения сопла связаны друг с другом соотношением

$$n_c = \frac{\sqrt{\frac{k-1}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}}}{\sqrt{(1/\varepsilon_c)^{\frac{2}{k}} - (1/\varepsilon_c)^{\frac{k+1}{k}}}}.$$

Для определения ε_c при известных значениях n_c и коэффициента адиабаты k можно воспользоваться аппроксимирующими функциями вида $\varepsilon_c = A n_c^a$, константы в которой приведены в табл. 1 для различных коэффициентов адиабаты.

Т а б л и ц а 1

Связь геометрической степени расширения сопла со степенью расширения по давлению

Коэффициент адиабаты k	$\varepsilon_c = f(n_c)$
1,14	$\varepsilon_c = 4,0389 n_c^{1,2207}$
1,15	$\varepsilon_c = 4,0929 n_c^{1,2282}$
1,16	$\varepsilon_c = 4,1478 n_c^{1,2357}$
1,17	$\varepsilon_c = 4,2027 n_c^{1,2433}$
1,18	$\varepsilon_c = 4,2532 n_c^{1,2511}$

Коэффициент адиабаты k	$\varepsilon_c = f(n_c)$
1,19	$\varepsilon_c = 4,3066 n_c^{1,2588}$
1,20	$\varepsilon_c = 4,3591 n_c^{1,2666}$
1,21	$\varepsilon_c = 4,4108 n_c^{1,2745}$
1,22	$\varepsilon_c = 4,4595 n_c^{1,2804}$
1,23	$\varepsilon_c = 4,5088 n_c^{1,2904}$
1,24	$\varepsilon_c = 4,5599 n_c^{1,2984}$
1,25	$\varepsilon_c = 4,6089 n_c^{1,3053}$

Наиболее простым по форме является коническое сопло (сопло Лавалия) (рис. 1). В нем входная и выходная часть конусные, соответственно с углом наклона образующей $35...40^\circ$ и $13...15^\circ$.

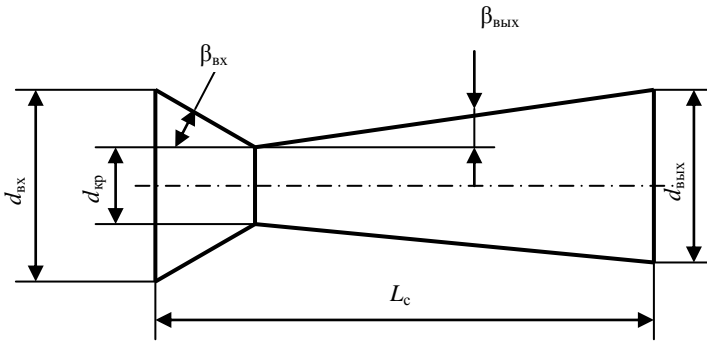


Рис. 1. Коническое сопло

1.2. Параметры потока продуктов сгорания в сопле

В сопле в процессе расширения газа происходит преобразование энергии. Тепловая энергия преобразуется в кинетическую. Следовательно, для некоторой массы газа m_r изменение теплосодержания по длине сопла равно изменению кинетической энергии газа:

$$m_r(i_0 - i_a) = m_r(u_a^2/2 - u_0^2/2).$$

Это выражение справедливо для случая адиабатического преобразования энергии, что имеет место в двигателе. Скорость газа на срезе сопла u_a существенно больше скорости на входе в сопло.

Пренебрегая малой величиной скорости на входе, получаем $u_a = \sqrt{2(i_0 - i_a)}$. Используя выражения для теплосодержания ($i = c_p T_r$), коэффициента адиабаты ($k = c_p / c_v$) и газовой постоянной ($R_r = c_p - c_v$), а также связь между температурой и давлением при адиабатическом процессе, можно получить окончательное выражение для скорости на срезе:

$$u_a = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R_r T_0 \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Если степень расширения сопла по давлению $\varepsilon_c = P_0 / P_a$, то

$$u_a = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R_r \cdot T_0 \left[1 - (1/\varepsilon_c)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2)$$

Скорость на срезе зависит от типа топлива или характеристик его продуктов сгорания, температуры продуктов сгорания и степени расширения сопла. Теоретически для конкретного двигателя скорость максимальна при стремлении степени расширения к бесконечности. Однако реально используют значение ε_c , далекое от бесконечного. При очень больших его значениях выигрыш в скорости (а также в потребной массе топлива) может составлять доли процента, а увеличение массы сопла за счет роста его длины возрастает на десятки и даже сотни процентов. Поэтому для каждого двигателя определяют оптимальное значение ε_c , которое обеспечивает достаточно высокую скорость и приемлемую массу сопла и двигателя, а как итог – минимальную массу всего двигателя. Оптимальные значения геометрической степени расширения лежат в пределах: для ЖРД 80...150 и для РДТТ 25...40.

Помимо скорости в сопле изменяются и все другие параметры потока продуктов сгорания – падают давление, температура и плотность. Причем увеличение скорости и уменьшение остальных параметров не происходит плавно. Их резкое изменение имеет место в районе критического сечения сопла. Поэтому при расчетах в сопле (газодинамических, тепловых и геометрических) целесообразно оценивать изменение параметров не по линейной координате вдоль оси сопла, а по приведенной скорости газового потока. Приведенная

скорость – это безразмерный параметр, равный отношению размерной скорости в данном сечении к скорости звука в критическом сечении сопла $\lambda = u_{\Gamma}/a_{\text{кр}}$, где $a_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R_{\Gamma} T_0}$.

При использовании в расчетах приведенной скорости необходимо вычислить ее значения в характерных сечениях входной части и раструба сопла. Приведенная скорость на входе в сопло, определяемая реальной скоростью газа, $u_{\text{вх}} = \dot{m}/F_{\text{вх}}\rho_{\Gamma}$ обычно не превышает 0,2. В критическом сечении $\lambda_{\text{кр}} = 1$. На срезе сопла, где скорость газа $u_a = 2600 \dots 4000$ м/с, $\lambda_a = 2,5 \dots 4$. По рассчитанным значениям реальной и приведенной скорости интервалы значений $\lambda_{\text{вх}} \dots \lambda_{\text{кр}}$ и $\lambda_{\text{кр}} \dots \lambda_a$ разбивают на участки с равными значениями $\Delta\lambda$, на границах которых и определяют расчетные параметры. Для непосредственного расчета обычно используют газодинамические функции, полученные с учетом допущений об одномерности и изэнтропности течения в сопле. В этом случае параметры газового потока связаны с приведенной скоростью в конкретном сечении следующими зависимостями:

- температура ядра потока $T_i = T_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2 \right)$;
- давление $p_i = p_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$;
- плотность $\rho_i = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$;
- площадь проходного сечения $F_i = \frac{F_{\text{кр}}}{\lambda_i} \left[\frac{\frac{2}{k+1}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2} \right]^{\frac{1}{k-1}}$;
- число Маха $M_i = \sqrt{\frac{2}{k+1} \left(\frac{\lambda_i^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_i^2} \right)}$.

В данных выражениях параметры с индексом «0» относятся к входному сечению сопла, а с индексом «*i*» – к расчетному сечению.

1.3. Связь выходных параметров двигателя с параметрами сопла

Сопло – один из основных элементов, определяющих энергомассовые параметры двигателя. К основным энергетическим параметрам любого двигателя относятся тяга, полный импульс и удельный импульс тяги. Общее выражение для тяги имеет вид

$$P = \dot{m} u_a + F_a (p_a - p_n). \quad (3)$$

Величина тяги зависит от \dot{m} – секундного массового расхода продуктов сгорания, u_a – их скорости на срезе сопла, F_a – площади выходного сечения сопла, p_a и p_n – давления газа соответственно на срезе сопла и наружного окружающей среды. Все эти величины, за исключением p_n , обусловлены параметрами сопла. Скорость на срезе сопла (2) является функцией степени расширения сопла. Секундный массовый расход связан с площадью критического сечения сопла $F_{кр}$:

$$\dot{m} = \frac{a_k p_0 F_{кр}}{\sqrt{R_\Gamma T_0}}, \quad (4)$$

где $a_k = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$.

Энергетическую эффективность двигателя оценивают по удельному импульсу тяги, который равен отношению тяги к секундному массовому расходу. Если использовать для этих величин выражения (3) и (4), то можно записать:

$$I_{уд} = u_a + \frac{\sqrt{R_\Gamma T_0}}{a_k} \cdot n_c \left(\frac{1}{\epsilon_c} - \frac{p_n}{p_0} \right). \quad (5)$$

Видно, что и удельный импульс тяги зависит от целого ряда параметров сопла. Следовательно, для повышения энергетической эффективности двигателя на этапе его проектирования следует оптимизировать параметры сопла с целью, прежде всего, получения высокого значения удельного импульса тяги.

С точки зрения массовых и габаритных характеристик двигателя сопловой блок является также весовым элементом конструкции. На этапе проектирования следует стремиться к минимизации этих параметров, но не в ущерб снижению энергетических характеристик. В некоторых случаях приходится дополнительно учитывать ограничения по массе и габаритам соплового блока, сформулированные в техническом задании на проектируемый двигатель.

1.4. Потери удельного импульса тяги в сопле

Реальный удельный импульс тяги $J_{удреал}$ будет отличаться от расчетного (теоретического) значения $J_{уд}$ на величину суммарных потерь $\Delta J_{уд\Sigma}$. Это определяется тем, что при расчете удельного импульса приходится использовать целый ряд допущений, которые идеализируют процессы в камере сгорания и в сопле. Обычно эти потери оцениваются коэффициентом суммарных потерь φ_Σ , который есть произведение коэффициентов всех составляющих потерь: $\varphi_\Sigma = \prod_1^n \varphi_i$, каждый из которых равен $\varphi_i = 1 - \Delta J_i / J_{уд}$, а реальный импульс $J_{удреал} = \varphi_\Sigma J_{уд}$. Значительная часть потерь связана с соплом двигателя. Составляющие этих потерь следующие.

Потери на непараллельность истечения продуктов сгорания на срезе сопла (потери на рассеивание) $\varphi_{рас}$. В создании тяги участвует составляющая вектора скорости, направленная вдоль оси сопла. При угле наклона образующей сопла на срезе эта составляющая на периферии выходного сечения равна $u_{ax} = u_a \cos \beta_a$. В целом по сечению среза сопла скорость истечения оказывается меньше, чем при полностью параллельном истечении ($\beta_a = 0$). Величина этих потерь $\xi_{рас}$ зависит от типа сопла:

- для простого конического сопла они равны $\xi_{рас} = (1 - \cos \beta_a) / 2$. В среднем относительные потери равны 0,015, что соответствует коэффициенту потерь 0,985;

- для профилированного сопла справедливо соотношение $\xi_{рас} = 0,3(1 - \cos \frac{\beta_a + \beta_m}{2})$. В нем β_m – угол наклона образующей сопла в начальном сечении раструба (обычно $23...25^\circ$), а β_a – угол на срезе сопла (обычно $5...7^\circ$). В среднем относительные потери в этом случае равны 0,01, что соответствует коэффициенту потерь 0,99.

Потери на трение газа о стенки сопла $\varphi_{\text{тр}}$. В пристеночном слое потока продуктов сгорания снижается скорость его движения за счет трения. В результате на выходе из сопла во всей основной части поперечного сечения она будет равна теоретическому значению, а в пристеночной области окажется меньше. Для всего истекающего потока скорость также будет меньше теоретического значения. Величина потерь на это явление $\xi_{\text{тр}}$ зависит, прежде всего, от внешних размеров сопла (площади его поверхности), характеристик продуктов сгорания (коэффициента адиабаты) и скорости движения газа или числа Маха. Оказывает влияние и режим течения газового потока (турбулентный или ламинарный). Для определения данных потерь необходимо провести расчет пограничного слоя вдоль внутренней поверхности сопла. В [4] приводятся соотношения для расчета потерь для ламинарного и турбулентного режима течения. Величина относительных потерь на трение для различных двигателей лежит в пределах $\xi_{\text{тр}} = 0,006...0,014$ (коэффициент потерь $0,994...0,986$).

Двухфазные потери $\varphi_{\text{двух}}$. Имеют место при течении двухфазных продуктов сгорания в сопле. Это относится к ракетным двигателям на твердом топливе, в которых используется топливо с металлическим горючим. В процессе горения таких топлив образуются двухфазные продукты сгорания, в которых присутствуют, кроме газообразных, и конденсированные продукты в виде расплавленных частиц оксида металла (чаще всего оксида алюминия). В этом случае появляются двухфазные потери удельного импульса тяги из-за скоростной и температурной неравновесности между газом и конденсированными частицами.

Частицы газа имеют массу, существенно меньшую, чем конденсированные частицы. Газовые частицы ускоряются в сопле в соответствии с газодинамическими законами, под действием перепада давления по соплу и имеют на срезе расчетное значение скорости u_a . Ускорение конденсированных частиц происходит под действием аэродинамических сил, создаваемых обдувающим газовым потоком. Вследствие большой массы, конденсированные инерционные частицы отстают по скорости от газовых частиц. На срезе сопла скорость таких частиц будет меньше скорости газовых частиц. Соответственно из-за этого осредненная по газу и частицам скорость будет меньше расчетного значения скорости. Анализ показывает, что

отличие скоростей газа и частиц существенно зависит от размера конденсированных частиц. Для частиц размером 1 мкм оно невелико (не более 50 м/с), размером 20 мкм 600...700 м/с.

Неодинаковы и температуры газа и частиц на срезе сопла. На входе в сопло их температура одинакова и равна T_0 . В сопле температура газа падает в соответствии с термодинамическим законом адиабатического расширения. Конденсированные частицы охлаждаются за счет передачи тепла газу. Этот процесс инерционен. В результате частицы оказываются более нагретыми, чем газ. С ними уносится часть теплоты без преобразования в кинетическую энергию, что уменьшает скорость u_a .

Двухфазные потери зависят от многих факторов:

- размера конденсированных частиц, чем он больше, тем выше потери;
- концентрации конденсированных частиц в продуктах сгорания (с увеличением концентрации растут потери);
- площади критического сечения (чем она меньше, тем больше ускорение газового потока в начальный момент в раструбе сопла, больше скоростная неравновесность), например, при диаметре 300 мм $\xi_{\text{двух}} = 0,005$, при 50 мм $\xi_{\text{двух}} = 0,02$;
- группы параметров, определяющих течение двухфазной смеси в сопле: геометрической степени расширения n_c или $\bar{r}_a = r_a / r_{\text{кр}}$, давления в камере сгорания p_0 , радиуса скругления горловины сопла $r_{\text{гор}}$, среднего угла профиля раструба $\beta_{\text{ср}} = 0,75\beta_m + 0,25\beta_a$.

Многообразие влияющих факторов, сложность процессов в сопле не дают возможности получить аналитическое расчетное выражение. Поэтому используют эмпирические зависимости, основанные на физической картине влияния различных факторов, расчетных и опытных данных: $\xi_{\text{двух}} = 0,1z\xi_{\text{двух}}^0 k_p k_{\text{горл}} k_\beta k_n$.

Здесь $z = 2z_0$ – массовая доля конденсированной фазы в продуктах сгорания, которая с достаточной точностью может быть принята равной удвоенной массовой доле металла в топливе; $\xi_{\text{двух}}^0$ – относительные потери, полученные экспериментальным путем для базового конического сопла со следующими параметрами: $n_c = 6,25$, $\beta_a = 15^\circ$, $\bar{r}_{\text{гор}} = r_{\text{гор}} / r_{\text{кр}} = 2$; $p_0 = 4$ МПа. При таких фиксированных параметрах потери будут зависеть только от диаметров частиц и

критического сечения, т.е. $\xi_{\text{двух}}^0 = f(d_{\text{част}}^{1,5}/d_{\text{кр}})$ мкм/мм (графики данной зависимости приведены в [5]); поправки, учитывающие отличие параметров в реальном двигателе от параметров базового двигателя:

- $k_p = 1,12 - 0,03p_0$ – поправка на давление в камере сгорания (p_0 в МПа),
- $k_{\text{горл}} = 1,1 - 0,05\bar{r}_{\text{горл}}$ – поправка на радиус горловины,
- $k_\beta = 0,7 + 0,02\beta_{\text{ср}}$ – поправка на угол профиля раструба,
- $k_n = 1,1 - 0,04n_{\text{с}}$ – поправка на степень расширения сопла.

В зависимости от рассмотренных параметров и, прежде всего, от концентрации оксида металла в продуктах сгорания и размера частиц оксида величина потерь на это явление $\xi_{\text{двух}}$ может составлять от 0,05 до 0,07 для различных топлив.

Кроме отмеченных потерь удельного импульса, возможно появление дополнительных потерь в отдельных двигателях, отличающихся конструктивными особенностями.

Потери удельного импульса в двигателях с утопленным соплом $\varphi_{\text{ут}}$. В современных крупногабаритных твердотопливных двигателях часто применяют сопла, частично вдвинутые в камеру сгорания. Это позволяет уменьшить длину двигателя, улучшить компоновку летательного аппарата, снизить массу конструкции и обеспечить лучшие условия его наземной эксплуатации. В этом случае в зарядах приходится увеличивать диаметр канала для размещения утопленной части сопла, в результате чего в камере образуется кольцевой канал между горячей поверхностью заряда и внешней поверхностью вдвинутой части сопла. При использовании металлизированного топлива частицы в двухфазном потоке продуктов сгорания приобретают радиальную составляющую скорости, изменяются их распределение по радиусу и размеры частиц. Это приводит к дополнительным потерям удельного импульса.

На основании расчетных и экспериментальных данных установлено, что величина этих потерь зависит от массовой доли конденсированной фазы в продуктах сгорания z , соотношения площадей критического и входного сечений сопла, диаметра его критического сечения, длины заряда L_z и степени утопленности сопла $l_{\text{ут}}$.

Полуэмпирическое соотношение, отражающее влияние этих факторов имеет вид

$$\xi_{\text{ут}} = 7(zp_0 F_{\text{кр}} / F_{\text{вх}})^{0,8} l_{\text{ут}}^{-0,4} d_{\text{кр}}^{-0,2},$$

где p_0 – давление, МПа; $d_{\text{кр}}$ – диаметр критического сечения, мм. Величина этих потерь может составлять 0,4...0,7%.

Потери удельного импульса в двигателях с устройствами, создающими управляющие моменты $\phi_{\text{оу}}$. В таких двигателях применяются специальные органы управления для создания управляющих моментов во время работы двигателя, обеспечивающих движение летательного аппарата по заданной траектории. Органы управления всегда связаны с сопловым блоком. Принципы создания управляющих моментов различны. Рабочие элементы различных щитков и дефлекторов локально вводятся в сверхзвуковой поток на выходе раструба сопла, перед преградой возникает скачок уплотнения, и повышается давление газа на стенку раструба в месте ввода. При использовании поворотных раструбов или сопел происходит отклонение всего потока продуктов сгорания от оси двигателя и летательного аппарата. Управляющие моменты возникают за счет боковой составляющей вектора тяги. В устройствах со вдувом газа или жидкости в сверхзвуковую часть сопла образуются местный скачок уплотнения в районе отверстий вдува и управляющая сила давления.

Во всех этих случаях изменяются характеристики истекающего из сопла потока продуктов сгорания, приводящих к потерям удельного импульса тяги. Следует отметить, что потери минимальны при нейтральном положении органов управления, когда отсутствуют управляющие моменты. Для поворотных сопел они равны нулю. Для остальных вариантов их величина возрастает до 0,2...0,5%. При функционировании органов управления потери возрастают. Их несложно подсчитать для поворотных сопел, для которых управляющий момент равен поперечной составляющей тяги и зависит от угла поворота сопла. Для остальных методов управления оценка суммарных потерь составляет: 0,3...0,5% для разрезных сопел, 0,5...2,5% для газовых рулей различного типа и 1...1,5% для систем вдува.

Так как при проектировании двигателей используют реальное значение удельного импульса тяги, минимизация потерь в сопле позволяет повысить энергетические возможности двигателя и оптимизировать затраты топлива на выполнение поставленной перед ним задачи по перемещению летательного аппарата.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОПЛА

Геометрическое проектирование сопла заключается в определении диаметров характерных сечений (входного, критического и выходного) и профиля образующей боковой поверхности сопла. Исходные данные для проектирования:

- характеристики рабочего тела на входе в сопло;
- секундный массовый расход рабочего тела (расход двигателя);

- степень расширения сопла (геометрическая или по давлению).

Характерные сечения для любых сопел определяются одинаково: критическое сечение – по секундному массовому расходу (формула (4)), выходное сечение – по геометрической степени расширения сопла, а диаметр входного сечения принимают равным диаметру камеры сгорания (для ЖРД) или двум диаметрам критического сечения (для РДТТ).

Профиль образующей зависит от конструкции сопла. Простое коническое сопло (см. подразд. 1.1) используется редко. Его недостатки, связанные с большой длиной и массой и с более значительными потерями удельного импульса, обуславливают нецелесообразность данной конструкции при достаточно больших степенях расширения и расходах рабочего тела.

В большинстве случаев применяют профилированные сопла, контур которых имеет непрерывно меняющуюся кривизну. Идеально спроектированное сопло обеспечивает безотрывное течение рабочего тела с максимально равномерным распределением скорости в критическом сечении для дозвуковой части, а для сверхзвуковой части также отсутствие отрыва потока от стенки и однородный и параллельный оси сопла поток на срезе.

В профилированном сопле можно выделить три участка по его контуру (рис. 2): входной участок (AB), горловину (BB) и раструб (BI). Первый участок обычно выполняется в виде конуса с углом наклона образующей $\beta_{\text{вх}} \cong 35...40^\circ$. В месте стыковки сопла с днищем камеры сгорания обеспечивают плавный вход газового потока. Горловина сопла представляет собой дугу окружности радиусом $r_2 \cong (1...2)r_{\text{кр}}$. Центр этой окружности лежит в критическом сечении сопла.

Профиль раструба обычно строят по линии тока крайней струйки газа расширяющегося потока.

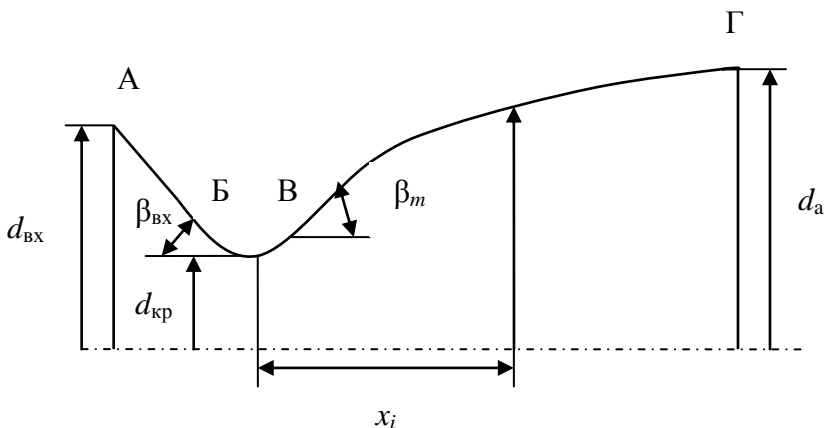


Рис. 2. Профилированное сопло

Линии тока определяются газодинамическим расчетом параметров потока с использованием метода характеристик [3]. Идеальное сопло с нулевым углом образующей на срезе не является оптимальным на практике. Обеспечивая минимальные потери удельного импульса тяги на непараллельность истечения газа из сопла, оно имеет большие потери на трение газа о стенки, большую длину и массу. Целесообразно использовать укороченные сопла с углом наклона образующей в выходном сечении $\beta_a \approx 5^\circ \dots 7^\circ$, что хотя и может привести к небольшому уменьшению удельного импульса, но дает существенный выигрыш в массе. Точное геометрическое проектирование раструба сопла проводится на этапе окончательной разработки соплового блока.

На этапе проектирования двигателя в целом обычно используют приближенные методы профилирования раструба, в которых реальный профиль заменяется кривой второго или третьего порядка. Достаточно точное профилирование обеспечивает кривая третьего порядка (рис. 2), когда профиль описывается уравнением

$$y_i = Ax_i^3 + Bx_i^2 + Cx_i + D ,$$

в котором коэффициенты равны: $D = r_{кр}$, $C = \operatorname{tg} \beta_m$,

$$B = \left[3(r_a - r_{кр}) / L_{св} - 2\operatorname{tg} \beta_m - \operatorname{tg} \beta_a \right] \frac{1}{L_{св}} ,$$

$$A = \left[(\operatorname{tg} \beta_a + \operatorname{tg} \beta_m) - 2(r_a - r_{\text{кр}}) \frac{1}{L_{\text{св}}} \right] \frac{1}{L_{\text{св}}^2}.$$

В данных выражениях β_m , β_a – углы наклона образующей в начале и в конце раструба: $\beta_a = \frac{1}{2} M_a (6,8 - M_a) + 0,1$, град;

$$\beta_m = \left[\mu - \frac{\pi}{2} + \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \operatorname{ctgu} \right) \right], \text{ рад};$$

$M_a = u_a / a_{\text{зв } a}$ – число Маха на срезе сопла; k – коэффициент адиабаты газа.

Параметр μ определяют по формуле

$$\mu = 0,594 + \frac{\pi}{2} \left[\frac{1 + (k-1)/2}{1 + M_0^2 (k-1)/2} \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}},$$

где M_0 – число Маха на срезе идеального сопла,

$$M_0 \cong (0,7 + 0,263k)M_a + (0,263k - 0,3).$$

Длина раструба сопла $L_{\text{св}}$ может быть подсчитана по следующей эмпирической зависимости:

$$L_{\text{св}} = 2r_{\text{кр}}(M_a - 1)^{(6-3,5k)}.$$

3. ТЕПЛОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОПЛА

3.1. Алгоритм теплового расчета

Сопло, как и другие элементы конструкции двигателя, функционирует в условиях мощного теплового воздействия со стороны потока продуктов сгорания. Без принятия специальных мер по тепловой защите стенок, через несколько секунд после начала работы двигателя произойдет разрушение двигателя вследствие либо оплавления или деструктивного разрушения материалов элементов конструкции, либо потери прочности материалов при нагреве. Поэтому при проектировании двигателя необходимо выполнить

основное условие нормальной в тепловом отношении работы несущих элементов конструкции, которое можно сформулировать следующим образом. В течение всего времени работы двигателя температура несущих элементов конструкции не должна превышать допустимую температуру нагрева материала, из которого изготовлены эти элементы.

При нагреве любого материала ухудшаются его прочностные характеристики. При малых температурах нагрева прочность падает незначительно, а затем начинается ее резкое уменьшение. Снижение прочности материала требует увеличения толщин стенок несущей конструкции или более мощной тепловой защиты. Оценка массовых характеристик двигателя показывает, что незначительное падение прочности допустимо, а резкое существенно ухудшает эти характеристики. Поэтому для элементов конструкции ЛА, в число которых входит и РД, принято, что температура нагрева стенок не должна превышать некоторого значения $T_{\text{доп}}$. Это значение соответствует границе между незначительным и резким уменьшением прочности материала и называется допустимой температурой нагрева материала.

Величина $T_{\text{доп}}$ для разных материалов составляет: 1100...1200 К для жаропрочных сталей, 900...950 К для обычных сталей, 700...750 К для титановых сплавов, 500...600 К для алюминиевых сплавов и 450...500 К для композиционных материалов. Следовательно, в процессе теплового проектирования необходимо обеспечивать такой тепловой режим работы элементов конструкции, чтобы во все время работы двигателя температура нагрева стенок не превышала допустимого значения. Это условие выполняется при правильном выборе тепловой защиты в процессе теплового проектирования. Поэтому тепловое проектирование – важнейший этап в общем проектировании любого двигателя.

Тепловое проектирование любой высокотемпературной установки включает в себя несколько этапов:

1. Анализ процессов, протекающих в установке, выявление источника тепла, оценку тепловыделения. Для химических двигателей источник тепла – это процесс горения топлива, носитель тепла – продукты сгорания. На этом этапе необходимо определить основные характеристики потока продуктов сгорания на различных участках двигателя: температуру, скорость движения, расход, химический состав.

2. Анализ теплообмена между потоком продуктов сгорания и стенками элементов конструкции. Конечной целью этого анализа яв-

ляется определение суммарной плотности тепловых потоков, поступающих в стенки.

3. Анализ температурных полей, нагрева элементов конструкции и оценка необходимой тепловой защиты. На основании этого анализа определяют максимальную температуру нагрева конкретного элемента и сравнивают с допустимой температурой нагрева материала. Если имеет место перегрев, то требуется тепловая защита. В большинстве случаев тонкостенные несущие элементы двигателя перегреваются даже при малых временах работы. Поэтому при временах работы более 1,5...2 с всегда требуется тепловая защита. При меньших временах проводится оценка необходимости тепловой защиты.

4. Выбор и проектирование тепловой защиты для элементов конструкции. На данном этапе выбирают метод тепловой защиты в зависимости от типа и конструкции двигателя и определяют проектные параметры выбранного метода.

Следует отметить, что перед тепловым проектированием должны быть известны геометрические размеры элементов несущей конструкции двигателя и характеристики потока продуктов сгорания для всего тракта двигателя.

В данном учебном пособии будем рассматривать только одну задачу теплового проектирования – задачу теплообмена в сопле.

3.2. Расчет плотности конвективного теплового потока

Конвективный тепловой поток вносит основной вклад в суммарный тепловой поток, идущий от продуктов сгорания в стенки сопла. Задача его определения при известных температурах газа и поверхности стенки сводится к расчету конвективного коэффициента теплоотдачи α_k :

$$q_k = \alpha_k (T_\Gamma - T_\Pi).$$

За температуру газа принимают температуру ядра потока T_0 при малых скоростях его движения ($M < 0,2$) или температуру восстановления T_b , т.е. максимальную температуру, которая может быть достигнута в пограничном слое в результате торможения газа у поверхности, при больших скоростях движения ($M > 0,2$),

$$T_b = T_0 \left(1 + r_b \frac{k-1}{2} M_0^2 \right),$$

где r_v – коэффициент восстановления, зависящий от критерия Прандтля и равный $\sqrt{\text{Pr}}$ для ламинарного течения, $\sqrt[3]{\text{Pr}}$ для турбулентного течения.

За температуру поверхности стенки принимают допустимую температуру нагрева материала стенки, если она не имеет теплозащитного покрытия, или температуру поверхности покрытия на стенке.

Коэффициент теплоотдачи определяется из решения системы уравнений газодинамики и теплопроводности для области газа, примыкающей к стенке, т.е. для пограничного слоя. Так как коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов (геометрических параметров стенки, параметров потока, теплофизических характеристик газа), то целесообразно конечную зависимость представить в безразмерном виде, используя безразмерные критерии, каждый из которых есть совокупность определенных размерных параметров и характеристик. Такая зависимость часто называется критериальным уравнением. Она включает в себя критерии:

$$\text{Re} = \frac{(\rho u)_\Gamma \chi}{\mu_\Gamma} \text{ – критерий Рейнольдса, характеризующий дина-}$$

мические и вязкостные свойства потока;

$\text{Pr} = \mu_\Gamma c_p / \lambda_\Gamma$ – критерий Прандтля, определяющий теплофизические свойства газа.

В состав критериев входят размерные величины: $(\rho u)_\Gamma$ – массовая скорость потока в ядре; λ_Γ , μ_Γ и c_Γ – соответственно теплопроводность, коэффициент динамической вязкости и теплоемкость газа; χ – характерный размер.

На основе критериального уравнения можно получить расчетное выражение для конвективного коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_k = c_\Gamma (\rho u)_\Gamma A \text{Re}^{-m} \text{Pr}^{-n}, \quad (6)$$

где A , m и n – константы, зависящие от типа взаимодействия газа и стенки и от режима течения в потоке.

Практический расчёт для сопла можно ввести по следующему алгоритму.

1. *Выбор расчётных точек.* Расчёт коэффициента теплоотдачи всегда ведётся для конкретных точек рассматриваемой поверхности. Для поверхностей большинства элементов конструкции двигателя расчётные точки можно располагать равномерно по поверхности. Это определяется неизменной или плавно изменяющейся кривизной поверхностей, постоянными или меняющимися закономерно (без резких максимумов и минимумов) характеристиками газового потока, омывающего стенку. В сопле же, напротив, имеет место резкое изменение кривизны стенки в районе горловины сопла и там же происходит резкое изменение характеристик потока. Поэтому для сопла неприемлемо равномерное распределение расчетных точек по его поверхности относительно продольной координаты.

Наиболее целесообразно расчетные точки назначать, используя приведённую скорость газового потока. В этом случае весь диапазон изменения приведённой скорости от λ_a до $\lambda_{вх}$ разбивают на равные участки, определяют на границах участка значения λ , по которым рассчитывают площади исходных сечений и продольные координаты точек (см. подразд. 1.2). На этом же этапе рассчитывают по газодинамическим функциям характеристики на границах выделенных участков: температуру ядра потока и температуру восстановления, радиус кривизны, углы наклона образующей и ширину участка.

2. *Определение характера взаимодействия газа и стенки.* Для сопел возможны два случая взаимодействия газа и стенки: обтекание поверхности или течение в узком канале. Критерием, определяющим вид взаимодействия, является относительная длина потока, омывающего данную стенку, т.е. отношение его длины к минимальному поперечному размеру. Для сопла это – отношение длины сопла к диаметру критического сечения. Принято считать, что, если эта величина больше 15, то имеет место течение в узком зазоре, если меньше, то обтекание поверхности.

3. *Расчёт массовой скорости газового потока.* Массовую скорость газового потока, непосредственно входящую в критериальное уравнение, а также определяющую величину критерия Рейнольдса, всегда вычисляют исходя из секундного массового расхода газа, омывающего стенку в расчетном сечении. Для сопла в любом сечении секундный массовый расход постоянен и равен полному расходу двигателя. Из уравнения сохранения массы (уравнения неразрывности) следует, что

$$(\rho u)_r = \dot{m} / F_{\text{прох}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{прох}}$ – площадь проходного сечения сопла, в котором рассчитывают теплообмен.

Из этого выражения следует, что в дозвуковой части сопла $(\rho u)_r$ возрастает по мере уменьшения $F_{\text{прох}}$, достигая максимума в критическом сечении сопла, а в раструбе падает вплоть до выходного сечения.

4. *Определение характерного размера.* Интенсивность конвективного теплообмена во многом определяется параметрами пограничного слоя (ПС) на стенке, его толщиной и теплофизическими характеристиками газа в нём. Эти параметры, в свою очередь, зависят от местоположения расчётной точки относительно точки начала формирования ПС. Вниз по потоку растёт толщина ПС и меняются характеристики газа в нём. Также оказывает влияние скорость газового потока, омывающая стенку. Причем, важна не только абсолютная скорость в районе расчётной точки, но и характер её изменения (если она меняется) на участке течения потока до рассматриваемой точки.

Характерный размер учитывает все эти факторы, поэтому он рассчитывается для каждой точки отдельно. Для случая обтекания поверхностей можно дать следующее определение этому параметру. Характерный размер – это линейный размер, отсчитываемый вдоль поверхности от точки начала формирования потока, обтекающего рассматриваемую стенку, до расчётной точки и учитывающий всю предысторию развития пограничного слоя.

Для частного случая обтекания осесимметричной конической поверхности (рис. 3) газовым потоком со скоростью u_∞ во входном сечении известны:

- R_o – радиус кривизны начальной точки, точки начала формирования ПС на конической поверхности;
- R_a – радиус кривизны расчётной точки;
- x_a и l_a – координаты расчётной точки соответственно вдоль оси x и вдоль образующей поверхности.

Общее выражение для характерного размера в случае обтекания поверхностей имеет вид

$$\chi_A = \frac{\int_0^{l_a} (\rho u)_r R^{\frac{1}{1-m}} dl}{(\rho u)_{r_a} R_a^{\frac{1}{1-m}}}. \quad (8)$$

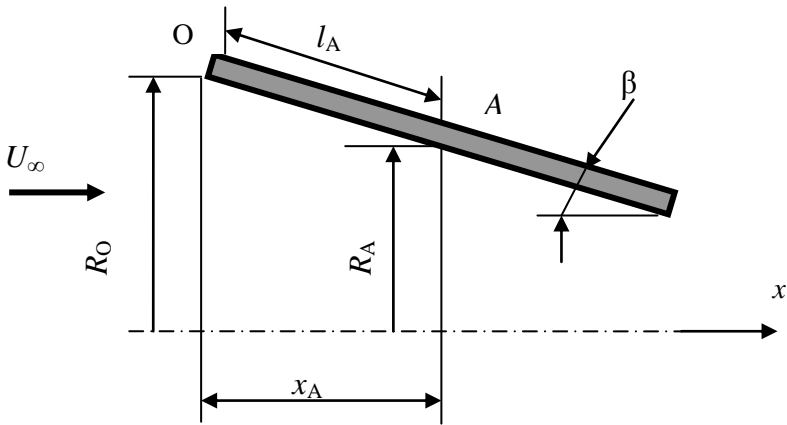


Рис. 3. Теплообмен на конической поверхности

В числителе выражения (8) учитывается предыстория развития пограничного слоя путём интегрирования параметров от нулевой точки до расчётной вдоль образующей стенки, а в знаменателе представлены параметры расчётной точки. В случае турбулентного течения газа у стенки $m = 0,2$, в случае ламинарного $m = 0,5$.

Нетрудно заметить, что при обтекании плоских поверхностей, для любых точек которых радиус кривизны одинаков ($R = \infty$) и одинаково значение массовой скорости потока, характерный размер равен линейной координате точки: $\chi_a = l_a$.

Для осесимметричных поверхностей χ вычисляют при решении интеграла в выражении (8) с учётом характера изменения R и $(\rho u)_r$. Для сопла возможны следующие частные случаи.

А. Обтекание поверхности конического сопла газовым потоком с постоянным секундным массовым расходом. В данном случае постоянно изменяется радиус кривизны, уменьшаясь по мере удаления от нулевой точки (рис. 3), изменяется и массовая скорость потока в соответствии с площадью проходного сечения (выражение (7)).

При ламинарном режиме ($m = 0,5$) $\chi_a = l_a$; при турбулентном режиме

$$\chi_a = \frac{4R_a^{3/4}}{\sin \beta} (R_0^{1/4} - R_a^{1/4}). \quad (9)$$

В подавляющем числе случаев течение газа в сопле является турбулентным, поэтому можно использовать выражение (8) для любой точки вплоть до критического сечения. Для раструба сопла необходимо учитывать, что угол наклона образующей отличается от угла наклона входной части. Поэтому для осесимметричных поверхностей, образующая которых состоит из последовательности конусов с различными углами наклона, следует воспользоваться следующей общей зависимостью:

$$\chi_i = 4R_i^{3/4} \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\sin \beta_i} (R_{0_i}^{1/4} - R_{i-1}^{1/4}) \right]. \quad (10)$$

Для входной части она принимает вид

$$\chi_i = 4R_i^{3/4} \frac{(R_0^{1/4} - R_i^{1/4})}{\sin \beta_{\text{вх}}},$$

а для раструба

$$\chi_i = 4R_i^{3/4} \left[\frac{1}{\sin \beta_{\text{вх}}} (R_0^{1/4} - R_{\text{кр}}^{1/4}) + \frac{1}{\sin \beta_{\text{вых}}} (R_{\text{кр}}^{1/4} - R_i^{1/4}) \right].$$

В последнем выражении при положительном значении угла $\beta_{\text{вх}}$, угол $\beta_{\text{вых}}$ отрицателен, т.е. вторая добавка в сумме оказывается всегда положительной.

Б. Обтекание поверхности профилированного сопла газовым потоком с постоянным секундным массовым расходом.

При тепловом расчёте профилированного сопла непрерывно меняющуюся по кривизне поверхность заменяют (аппроксимируют) ломаной линией, т.е. реальную конфигурацию сопла заменяют последовательным набором конических поверхностей (рис. 4). Для разбиения на конические участки используют такой же подход, как и при расчёте характеристик рабочего тела в сопле (разд. 1). В результате получают для каждого участка значения радиусов левой $R_{0_{i-1}}$ и правой R_{0_i} границ, угол наклона образующей β_i , а также рассчитывают координаты вдоль сопла границ участков x_{i_0} и x_i . Далее, используя общее выражение (10), вычисляют характерные размеры χ_i по

участкам, что позволяет в конце теплового расчёта получить зависимость конвективного теплового потока по координате x .

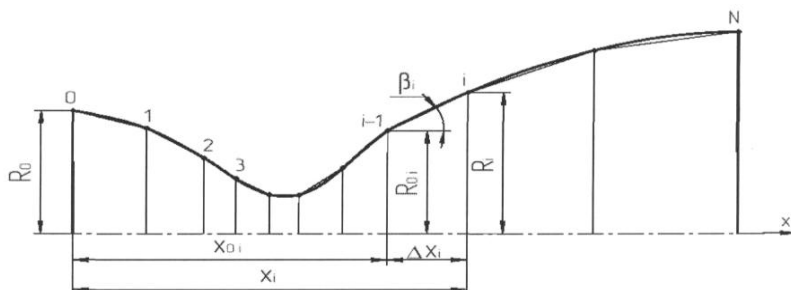


Рис. 4. Расчет характерного размера в профилированном сопле

Для длинных сопел, когда реализуется течение в узком канале, характерный размер для всех точек рассчитывают по следующей зависимости:

$$\chi_a = 4F_a / \Pi_a,$$

где F_a – площадь проходного сечения в рассматриваемой точке; Π_a – смоченный периметр потока в данном сечении.

Для круглых каналов $\chi_a = d_a$, т.е. характерный размер численно равен диаметру рассчитываемого сечения.

5. *Расчёт критерия Рейнольдса и определение режима течения газового потока.* Критерий Рейнольдса вычисляют по известным значениям массовой скорости газового потока, характерному размеру и коэффициенту динамической вязкости газа. Вывод о режиме течения делают при сравнении расчётного значения Рейнольдса с критическим. Если величина Рейнольдса меньше критического значения, то течение ламинарное. В противном случае – турбулентное. Критическое значение Рейнольдса равно:

- для случая обтекания поверхностей $Re_{кр} = 10^5$,
- для случая течения в узких каналах в зазорах $Re_{кр} = 5 \cdot 10^3$.

6. *Расчёт коэффициента конвективной теплоотдачи.* Первоначально определяют расчетное значение α_k по критериальному уравнению (6). Постоянные в этом уравнении выбирают с учётом характера взаимодействия газа и стенки и режима течения. Для случая обтекания поверхности при турбулентном течении $A = 0,0296$,

$m = 0,2$ и $n = 0,6$; при ламинарном течении $A = 0,332$, $m = 0,5$ и $n = 0,67$. Для случая течения в узком канале при турбулентном режиме $A = 0,023$, $m = 0,2$ и $n = 0,6$; при ламинарном режиме $A = 3,65$, $m = n = 0$.

Полученный коэффициент теплоотдачи отвечает идеальным условиям, не учитывающим реальные изменения характеристик газа в пограничном слое. Критериальное уравнение в идеальной постановке предполагает постоянство температуры по толщине ПС, т.е. его изотермичность. Реально температура в ПС может существенно меняться, особенно для теплонапряжённых устройств, какими являются ракетные двигатели. Причина неизотермичности ПС – два фактора.

Первый из них – сток тепла в стенку. Идеальный случай соответствует теплоизолированной стенке, когда такой сток отсутствует. В реальном случае часть тепла уходит в стенку и в пристеночной области ПС температура понижается. Это приводит к изменению свойств газа. Например, для воздуха при снижении температуры с 1200 К до 360 К уменьшаются вязкость в 2,2 раза, теплоёмкость в 3,4 раза и теплопроводность в 9,6 раза. Вследствие этого должна меняться интенсивность теплообмена, т.е. α_k . Этот фактор учитывают введением специального коэффициента (температурного фактора) $\psi_1 = T_{\text{п}} / T_{\infty}$, который определяется отношением температур на поверхности стенки (нижняя граница ПС) и в ядре потока (на верхней границе ПС).

Второй фактор, определяющий неизотермичность, связан с эффектом торможения газа в ПС. Скорость в нём падает от скорости в ядре потока до нуля. При этом кинетическая энергия переходит в тепловую энергию, температура газа повышается. Без учёта теплообмена в пределах ПС температура максимальна на границе с поверхностью стенки. Это – температура полного торможения, которая равна

$$T_{00} = T_{\infty} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_{\infty}^2 \right).$$

Но из области максимальной температуры часть тепла уходит в стенку, часть идёт на нагрев более холодного газа в верхней части ПС. Поэтому максимальная температура в ПС (температура восстановления) будет меньше T_{00} . Её можно определить по выражению

$$T_{\text{в}} = T_0 \left(1 + r_{\text{в}} \frac{k-1}{2} M_0^2 \right).$$

Эффект торможения учитывается коэффициентом $\psi_2 = T_{\text{в}} / T_{00}$.

Общая температурная поправка φ_T на неизотермичность ПС равна для ламинарного режима: $\varphi_T = \psi_1^{-0,11} \psi_2^{0,15}$, а для турбулентного режима

$$\varphi_T = \left(\frac{2}{1 + \sqrt{\psi_1}} \frac{\arctg \sqrt{\psi_2 - 1}}{\sqrt{\psi_2 - 1}} \right)^{1,6}.$$

Следует отметить, что при малых скоростях потока газа эффект торможения очень мал и $T_{\text{в}} \cong T_{\infty}$, а ψ_2 немного превышает единицу. В этом случае можно не учитывать сомножители в выражениях для φ_T , связанные с коэффициентом ψ_2 . Расчёты показывают, что эффект торможения следует учитывать только при $M \geq 0,2$.

7. Расчет плотности конвективного теплового потока. Как было отмечено выше, плотность конвективного теплового потока определяется коэффициентом конвективной теплоотдачи (реальным значением) и разностью температур газа и поверхности стенки. При $M > 0,2$ за температуру газа принимают температуру восстановления. По длине сопла q_k непрерывно меняется, достигая максимального значения в критическом сечении. Следовательно, район горловины является самым теплонапряженным участком сопла.

3.3. Расчет лучистого теплового потока

Лучистый тепловой поток определяется излучением высокотемпературных продуктов сгорания. Излучение газа, как и любого источника излучения, подчиняется закону Стефана–Больцмана

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \cdot \sigma^0 \cdot T_{\text{изл}}^4,$$

где ε – степень черноты излучателя; $T_{\text{изл}}$ – температура излучателя; $\sigma^0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана–Больцмана.

Применительно к соплу ракетного двигателя необходимо учитывать следующие особенности. Так как излучателем является газ,

а лучистый поток формируется от значительного объема газа, то в качестве температуры излучателя следует брать температуру ядра потока – T_0 . Стенка, воспринимающая тепло, нагревается и становится также излучателем, т.е. она теряет часть пришедшего тепла, излучая его в газ. Поэтому лучистый тепловой поток, идущий непосредственно на нагрев стенки, будет меньше излучаемого газом потока. Расчетная зависимость для его определения имеет вид

$$q_{\text{луч}} = \varepsilon_{\text{эф}} \sigma \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right],$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная степень черноты системы газ – стенка,

$$\varepsilon_{\text{эф}} = 1 / (1/\varepsilon_{\text{г}} + 1/\varepsilon_{\text{ст}} - 1),$$

$\varepsilon_{\text{г}}$ – степень черноты газа (продуктов сгорания); $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты поверхности стенки; $\sigma = 5,67 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}^4$.

С достаточной точностью можно принимать:

$\varepsilon_{\text{г}} = 0,5 \dots 0,6$ для продуктов сгорания жидких и твердых безметаллических топлив;

$\varepsilon_{\text{г}} = 0,6 \dots 0,7$ для продуктов сгорания твердых металлизированных топлив;

$\varepsilon_{\text{г}} \cong 0,7$ для стенок без теплозащитных покрытий;

$\varepsilon_{\text{г}} \cong 0,8$ для стенок с нанесенными теплозащитными покрытиями;

$T_{\text{ст}} = [T_{\text{доп}}]$ для стенок без ТЗП;

$T_{\text{ст}} = T_{\text{s}} = 1800 \dots 1900 \text{ К}$ для стенок с покрытием.

Рассчитанные по приведенному выражению значения $q_{\text{луч}}$ отличаются от реальных. Причина – дополнительная проникающая радиация от более нагретых объемов газа, расположенных левее рассматриваемого сечения (ближе к камере сгорания). Любой объем газа излучает во все стороны. Часть излучения, попадающая в рассматриваемую точку от высокотемпературных областей, которые расположены ближе к камере сгорания, является дополнительной проникающей радиацией. Кроме того, следует учитывать поглощение излучаемой энергии на пути от излучаемого объема газа к стенке сопла. Поэтому рекомендуется принимать следующие значения $q_{\text{луч}}$ в зависимости от величины плотности лучистого потока в камере сгорания $q_{\text{луч,кам}}$:

- в дозвуковой части сопла до сечения $d = 1,2d_{кр}$: $q_{луч} = q_{луч_{кам}}$;
- в критическом сечении: $q_{луч} = 0,5 q_{луч_{кам}}$;
- в раструбе, в сечении с $d = 1,5d_{кр}$ $q_{луч} = 0,15 \cdot q_{луч_{кам}}$; в сечении с $d = 2,5d_{кр}$ $q_{луч} = 0,04 \cdot q_{луч_{кам}}$; в конечной части раструба с $d > 2,5d_{кр}$ величиной $q_{луч}$ можно пренебречь по сравнению с плотностью конвективного теплового потока.

При решении последующих задач теплового проектирования можно использовать значение условного суммарного коэффициента теплоотдачи. Его вычисляют по зависимости

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{q_k + q_{луч}}{(T_r - T_n)}.$$

Если проанализировать распределение суммарной плотности тепловых потоков по длине сопла (рис. 5), то можно сделать следующие выводы. Район горловины – самый теплонапряженный участок сопла. В критическом сечении величина потока может достигать значений порядка 10^6 и даже 10^7 Вт/м². Наименьшие величины теплового потока реализуются в конечной части раструба сопла, где они могут уменьшаться на два порядка для сопел с большой степенью расширения.

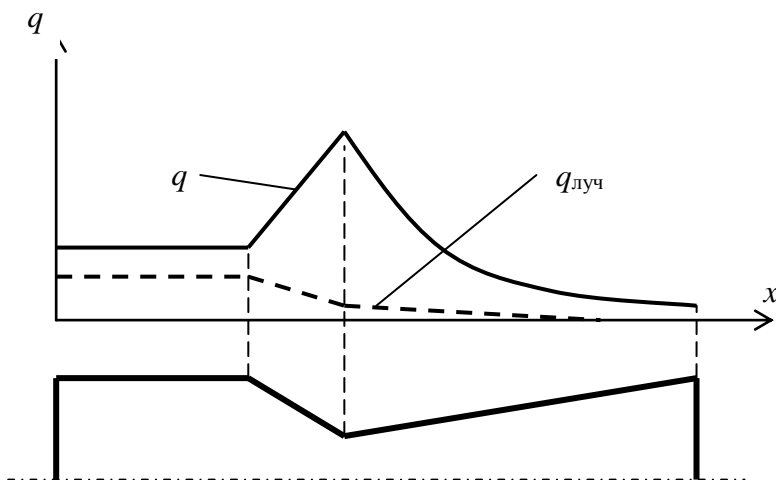


Рис. 5. Характер изменения тепловых потоков по длине сопла

4. ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА СОПЛ

Основное условие качественной тепловой защиты сопла – обеспечение нагрева его стенки в конце работы двигателя не выше допустимой температуры нагрева материала, из которого изготовлена его несущая конструкция. У жидкостных и твердотопливных двигателей способы тепловой защиты принципиально различаются. Проанализируем основные варианты применительно к соплам ЖРДУ и РДТТ.

4.1. Тепловая защита сопел ЖРД

Для защиты от воздействия тепловых потоков всех поверхностей элементов конструкции жидкостных двигателей, в том числе и сопла, используется внешнее конвективное охлаждение. Его принцип заключается в следующем (рис. 6). С внешней стороны защищаемой стенки создается охлаждающий тракт, по которому прокачивается жидкий охладитель. Толщину охлаждающего тракта $\delta_{\text{охл}}$ образуют основная силовая стенка толщиной $\delta_{\text{ст}}$ и наружная оболочка. Суммарный тепловой поток q_{Σ} , поступающий от газа, передается теплопроводностью от внутренней поверхности к внешней поверхности стенки и далее воспринимается охладителем. Между стенкой и охладителем осуществляется конвективный теплообмен.

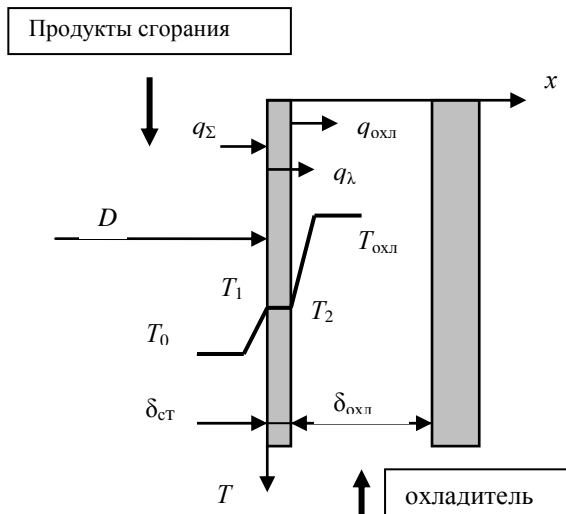


Рис. 6. Схема конвективного охлаждения

При своем движении по охлаждающему тракту охладитель нагревается. Характер распределения температуры в системе «газ–стенка–охладитель» приведен на рис. 6.

Нормальный режим работы системы охлаждения – это стационарный режим, когда весь тепловой поток, поступающий в стенку, поглощается охладителем. При этом температура нагрева стенки остается постоянной во времени и не превышает допустимое значение. Для обеспечения стационарного режима необходимы соответствующие расход и скорость движения охладителя. В качестве охладителя в ЖРД используется один из компонентов топлива, чаще всего горючее, химическая активность которого ниже окислителя. Так как в двигателе имеются запас жидкого компонента (охладителя) и система подачи компонентов, а нагретый компонент подается из охлаждающего тракта в камеру сгорания, т.е. практически отсутствует потеря тепла в двигателе, то данный метод наиболее предпочтителен для ЖРД по сравнению с другими. Однако не всегда удается использовать этот метод, существуют некоторые ограничения.

Первое ограничение заключается в том, что жидкий охладитель, воспринимая теплоту от защищаемой стенки на всей длине охлаждающего тракта и нагреваясь, не должен перегреваться до температуры кипения для одних компонентов топлива или до температуры разложения для других. Образование газообразных или парообразных включений в потоке жидкого охладителя приводит к негативным эффектам. Во-первых, коэффициент теплоотдачи от стенки в пар или газ существенно меньше, чем в жидкость. Это ведет к уменьшению теплосъема со стенки и ее перегреву. Исключение составляет водород, для которого коэффициенты теплоотдачи близки при жидком и парообразном состоянии. Во-вторых, некоторые компоненты (гидразин, несимметричный гидразин, перекись водорода) при перегреве разлагаются на газообразные продукты, причем, это разложение носит взрывной характер. В-третьих, если допустить перегрев охладителя, то в жидкости образуются газовые или смолоподобные включения. Это может привести к неустойчивой работе двигателя из-за нерасчетной работы и засорения форсунок.

Второе ограничение связано с возможностью местного перегрева охладителя. Такой перегрев возможен на участках двигателя с максимальным значением q_s , например, в районе критического сечения сопла. При этом температура охладителя на выходе из охлаждающего тракта не превышает температуру кипения. На участке перегрева образуется паровая пленка, контакт жидкости со

стенкой исчезает, резко уменьшается теплоотдача от стенки и возрастает ее температура, которая может превысить допустимое значение. В дальнейшем, вниз по потоку охладителя паровая пленка разрушается, пузырьки пара попадают в более холодное ядро потока жидкости, где, конденсируясь, жидкость вновь становится однофазной и охлаждение последующих участков не нарушается. Таким образом, важным для системы охлаждения является требование повсеместного обеспечения теплосъема без возникновения кипения или разложения охлаждающей жидкости на стенке. При наличии местного перегрева необходимо принимать дополнительные меры по снижению теплового потока в местах перегрева.

Третье ограничение связано с практическими возможностями по обеспечению необходимого расхода охладителя. Если бы было можно неограниченно увеличивать расход охладителя, то в любом случае удалось бы избежать общего перегрева жидкости на выходе из охлаждающего тракта. Однако каждый двигатель характеризуется вполне конкретным расходом компонентов топлива. Если этого расхода не хватает, то в чистом виде нельзя использовать конвективное охлаждение. Принципиально невозможно применять этот вид охлаждения для ЖРД малой тяги. Для них расходы компонентов и топлива в целом настолько малы, что нет возможности обеспечить необходимый теплосъем со стенок и избежать их перегрева. Так как охладитель подается в охлаждающий тракт чаще всего на срезе сопла, то его перегрев в самом сопле, как правило, отсутствует. Но анализ возможностей метода необходимо проводить с учетом дополнительно нагрева охладителя в камере сгорания.

4.1.1. Стационарный тепловой режим системы «газ–стенка–охладитель»

От горячего газа тепло в стенку передается конвекцией и излучением. В соответствии с общими положениями теории теплообмена газа и стенки плотность суммарного теплового потока в стенку равна

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} (T_{\Gamma} - T_1), \quad (11)$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи; T_{Γ} – температура газа, омывающего стенку; T_1 – температура внутренней поверхности стенки.

Внутри стенки тепло передается теплопроводностью, т.е. плотность теплового потока в стенке

$$q_{\lambda} = -\lambda_{\text{ст}} \frac{dT}{dx} \cong \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta_{\text{ст}}}, \quad (12)$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – теплопроводность материала стенки; T_2 – температура наружной поверхности стенки; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки.

Температура по толщине стенки максимальна на внутренней поверхности, поэтому ограничение по нагреву стенки должно иметь вид $T_1 \leq [T_{\text{доп}}]$. Передача тепла от стенки в охладитель происходит путем конвективного теплообмена, т.е. для плотности теплового потока в охладитель справедливо выражение

$$q_{\text{охл}} = \alpha_{\text{охл}} (T_2 - T_{\text{охл}}), \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{охл}}$ – коэффициент теплоотдачи в охладитель; $T_{\text{охл}}$ – температура охладителя.

При стационарном режиме работы системы охлаждения поступающий в стенку тепловой поток равен тепловому потоку, уходящему от нагретой стенки в охладитель. Условие его реализации: $q_{\Sigma} = q_{\lambda} = q_{\text{охл}}$.

Для повышения эффективности охлаждения необходимо стремиться к максимально высокой температуре внутренней поверхности стенки, так как это позволит, согласно (11) и (13), уменьшить тепловой поток q_{Σ} и соответственно тепловой поток в охладитель из-за снижения температуры наружной поверхности защищаемой стенки. Поэтому в качестве материала внутренних стенок ЖРД целесообразно использовать жаропрочные стали с высоким значением допустимой температуры нагрева 1100...1200 К.

4.1.2. Нагрев охладителя

При проектировании системы охлаждения на первом этапе необходимо ответить на принципиальный вопрос – происходит или нет перегрев охладителя, т.е. возможно ли использовать внешнее конвективное охлаждение для рассматриваемого объекта. Для этого необходимо рассчитать температуру нагрева охладителя на выходе из охлаждающего тракта. В большинстве случаев тепловая нагрузка охлаждаемой стенки неодинакова, т.е. она находится под воздействием разных по величине тепловых потоков от газа на

различных участках. Может меняться и величина боковой поверхности на различных участках.

В общем случае в стационарном режиме тепло, поступающее в стенку со стороны газа $Q_{ст}$, должно быть равно теплу, воспринимаемому охладителем $Q_{охл}$. Такой тепловой баланс можно записать следующим образом:

$$Q_{ст} = t_{нагр} \int_S q_{\Sigma} dS = Q_{охл} = c_{охл} m_{охл} (T_{охл_{вых}} - T_{охл_{вх}}),$$

или нагрев охладителя на рассматриваемом участке будет равен

$$\Delta T_{охл} = T_{охл_{вых}} - T_{охл_{вх}} = \frac{\int q_{\Sigma} dS}{c_{охл} \cdot \dot{m}_{охл}}. \quad (14)$$

В приведенных зависимостях $T_{охл_{вх}}$ – температура охладителя на входе в участок; S – боковая поверхность стенки на рассматриваемом участке; $c_{охл}$ – средняя теплоемкость охладителя; $\dot{m}_{охл}$ – секундный массовый расход охладителя.

Конечная температура на выходе из охлаждающего тракта определяется суммированием подогрева охладителя на всех N участках (рис. 7): $T_{охл_{кон}} = T_{охл_{нач}} + \sum_{i=1}^N \Delta T_i$.

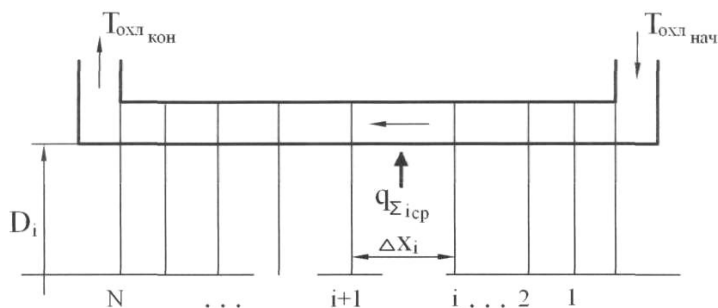


Рис. 7. Схема расчета нагрева охладителя по тракту двигателя

Использовать метод возможно при условии $T_{\text{охл.кон}} \leq [T_{\text{охл}}]$, где $[T_{\text{охл}}]$ – допустимая температура нагрева охладителя, определяемая физическими свойствами охладителя (типом охладителя) и давлением в охлаждающем тракте. Чаще всего, в качестве этой температуры принимают температуру кипения или разложения.

При расчете нагрева охладителя на каждом участке необходимо знать величину боковой поверхности стенки в пределах участка (14). При расчете суммарного теплового потока весь охлаждающий тракт разбивается на отдельные участки (рис. 7). Число участков выбирают из следующих соображений. В пределах каждого из N участков суммарный тепловой поток не должен меняться значительно, чтобы без большой ошибки можно было принимать осредненное значение потока, как среднеарифметическое между значениями потока на границах участка:

$$(q_{\Sigma_{i+1}})_{\text{ср}} = \frac{1}{2}(q_{\Sigma_i} + q_{\Sigma_{i+1}}).$$

Таким образом, при расчете принимают допущение, что в пределах каждого участка тепловой поток остается постоянным. В пределах участка не должна сильно изменяться и кривизна стенки. В этом случае для криволинейной стенки можно заменить ее профилем конической поверхностью без существенной ошибки в величине боковой поверхности стенки.

Каждый участок будет характеризоваться следующими параметрами:

- q_{Σ_i} – постоянным тепловым потоком;
- Δx_i – шириной вдоль основной оси;
- D_i – диаметром (или среднеарифметическим диаметром для конической поверхности);
- $T_{\text{охл}_i}$ и $T_{\text{охл}_{i+1}}$ – температурами охладителя на границах.

4.1.3. Теплообмен стенки с охладителем

Теплообмен стенки с охлаждающей жидкостью происходит конвективным путем. Если использовать подход, аналогичный случаю конвективного теплообмена продуктов сгорания и стенки, то коэффициент теплоотдачи в системе «стенка – охладитель» будет равен

$$\alpha_{\text{охл}} = c_{\text{охл}} (\rho u)_{\text{охл}} A \text{Re}^{-m} \text{Pr}^{-n}. \quad (15)$$

Для конкретизации уравнения (15) необходимо учитывать следующее:

1. Массовая скорость охладителя может быть различной на разных участках. Однако в любом случае ее можно выразить через секундный массовый расход, который остается постоянным в любой части охлаждающего тракта:

$$(\rho u)_{\text{охл}} = \dot{m} / F_{\text{прох}}.$$

2. Вследствие малых толщин охлаждающего тракта $\delta_{\text{охл}}$ по сравнению с радиусом кривизны стенки $(D/2)$ (рис. 6) можно рассчитать площадь проходного сечения охлаждающего тракта по упрощенной зависимости

$$F_{\text{прох}} = \pi \cdot D \cdot \delta_{\text{охл}}.$$

3. Протяженность охлаждающего тракта значительно превосходит его толщину. Следовательно, характер взаимодействия охладителя и стенки отвечает течению в узком кольцевом канале толщиной $\delta_{\text{охл}}$. Тогда характерный размер $\chi = 2 \delta_{\text{охл}}$.

4. Из-за больших плотностей охладителя даже при незначительных скоростях его движения массовая скорость оказывается значительной. Так как критическое значение числа Рейнольдса для компонентов топлива составляет всего примерно 2300, течение в охлаждающем тракте является турбулентным.

С учетом этих положений уравнение (15) преобразуется в следующее:

$$\alpha_{\text{охл}} = 0,008 \frac{c_{\text{охл}}^{0,4} \cdot \lambda_{\text{охл}}^{0,6}}{\mu_{\text{охл}}^{0,4}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{охл}}}{D^{0,8} \cdot \delta_{\text{охл}}}. \quad (16)$$

Следовательно, для любого участка величина теплового потока в охладитель будет определяться температурой охладителя, его теплофизическими характеристиками, расходом и толщиной охлаждающего тракта. Подбирая эти параметры, можно обеспечить требуемый сброс тепла в охладитель, т.е. требуемый теплосъем со стенки. Следует обратить внимание, что коэффициент теплоотдачи обратно пропорционален толщине охлаждающего тракта, т.е. при

постоянном секундном массовом расходе охладителя, чем больший тепловой поток поступает в стенку, тем меньше должна быть толщина охлаждающего тракта.

При проектировании системы тепловой защиты двигателя в целом, в том числе и сопла, могут возникнуть две трудности в реализации метода внешнего конвективного охлаждения.

Во-первых, возможность перегрева охладителя из-за недостатка его расхода. Обычно на начальном этапе проектирования в качестве охладителя рассматривают горючее. Если имеет место перегрев, то можно заменить горючее окислителем, расход которого в любом топливе в несколько раз больше. Если это не поможет избежать перегрева, то в качестве охладителя можно использовать оба компонента. В последнем случае необходимо конструктивно обеспечить, чтобы не было контакта в охлаждающем тракте окислителя и горючего. Так как обычно перегрев наступает уже в камере сгорания, то можно к внешнему конвективному охлаждению добавить другие методы защиты: пристеночное охлаждение и завесное охлаждение. Это позволит снизить тепловую нагрузку на стенку камеры сгорания и избежать перегрева охладителя. Используют еще один конструктивный прием для снижения тепловой нагрузки на защищаемые стенки. Их внутреннюю поверхность покрывают тонким слоем (доли миллиметров) термостойкого покрытия. Материал такого покрытия обладает низкой теплопроводностью, но способен выдерживать высокие температуры, большие, чем допустимая температура несущей конструкции стенки. Такими свойствами обладают оксиды и карбиды металлов.

Вторая возможная трудность носит технологический характер. При значительных тепловых потоках в условиях постоянного расхода охладителя расчетное значение толщины охлаждающего тракта может составить доли миллиметра. Такой случай для сопла может реализоваться в районе горловины, где имеет место максимум теплового потока (рис. 5). Столь малый зазор между внутренней и наружной стенками охлаждающего тракта технологически очень сложно создать. Самым распространенным способом интенсификации охлаждения с целью увеличения толщины охлаждающего тракта является его оребрение. Все полученные расчетные выражения, описывающие теплообмен стенки и охладителя, справедливы для охлаждающего тракта в виде гладкого кольцевого канала. При оребрении внутренняя и наружная стенки связаны густой сетью продольных связей – ребер. Конструкция ребер может быть

различной. Например, продольные ребра, выполненные заодно с внутренней стенкой тракта, или гофра, как отдельный элемент (рис. 8), располагающиеся между стенками. Жесткая связь всей конструкции обеспечивается сваркой или пайкой.

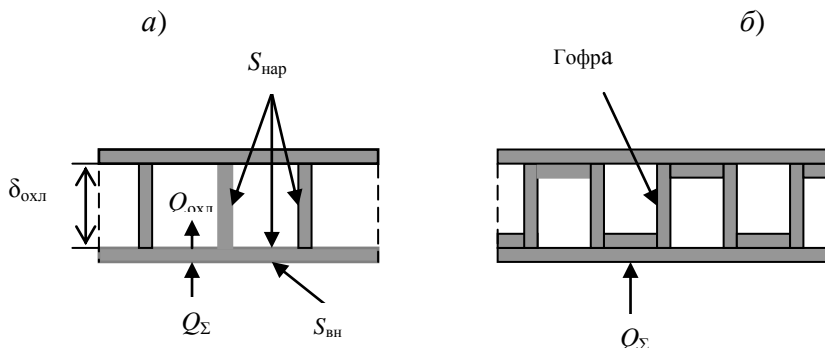


Рис. 8. Конструкция охлаждающего тракта: а – с ребрами, б – с гофрой

При введении оребрения увеличивается теплоотдача в охлаждающую жидкость за счет роста поверхности, омываемой ею. Увеличение теплоотдачи удобно учитывать введением коэффициента оребрения η_r . Он определяет соотношение площадей наружной, со стороны охладителя, поверхности защищаемой стенки и ее внутренней поверхности. Баланс тепла, поступающего в стенку от продуктов сгорания, и тепла, отдаваемого стенкой охладителю:

$$Q_{\text{прих}} = q_{\Sigma} S_{\text{вн}} t = Q_{\text{охл}} = q_{\text{охл}} S_{\text{нар}} t.$$

Отсюда следует, что $q_{\text{охл}} = q_{\Sigma} (1/\eta_r)$. Для гладкого, без ребер, канала обе поверхности практически равны, $\eta_r = 1$ и, как принималось в расчетной модели, $q_{\Sigma} = q_{\text{охл}}$. Для оребренного канала при $\eta_r > 1$ снижается $q_{\text{охл}}$. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению $\alpha_{\text{охл}}$ и увеличению толщины охлаждающего тракта.

Коэффициент оребрения рассчитывают для конкретных геометрических форм охлаждающего тракта с учетом распределения температуры по высоте ребер. Величина η_r может составлять 1,5...2,5.

Оребрение повышает эффективность двигателя в целом. Если внутренняя и наружная стенки связаны между собой, то наружная стенка частично разгружается. Это позволяет создавать двигатели

высокой прочности и жесткости, в которых можно применять стенки малой толщины при высоких давлениях в охлаждающем тракте.

Другим способом интенсификации теплообмена в охлаждающем тракте является искусственная шероховатость стенок тракта. Физическая картина влияния шероховатости поверхности стенки на теплообмен следующая. В конвективном теплообмене участвует лишь тонкий слой потока – пограничный слой (ПС). Интенсивность теплообмена во многом определяется характером течения в ПС. При ламинарном течении в ПС тепло переносится теплопроводностью. В турбулентном ПС перенос теплоты более интенсивен за счет более мощного механизма турбулентного обмена. Но при турбулентном ПС непосредственно к поверхности примыкает ламинарный подслой, который может сильно снижать интенсивность теплообмена (термическое сопротивление). Можно уменьшать термическое сопротивление подслоя за счет увеличения скорости потока и соответственно сокращения его толщины, но это не всегда возможно.

Для повышения интенсивности теплообмена применяют искусственную турбулизацию в пограничном слое. Во всем потоке это нерационально, так как увеличивается гидравлическое сопротивление. Искусственная шероховатость решает эту задачу. На поверхности стенки создают чередующиеся невысокие бугорки различной формы.

При обтекании потоком таких бугорков возникают местные отрывные течения с образованием местных отрывных зон. ПС сильно турбулизируется, в нем происходит периодическое разрушение ламинарного подслоя, его термическое сопротивление снижается и интенсифицируется теплообмен. Таким способом можно интенсифицировать теплообмен до двух раз. Но необходимо рационально подобрать высоту бугорков h и расстояние между ними S . Опыты показывают, что наибольший эффект получается при относительном шаге шероховатости $S/h = 12...14$. Высота же бугорков не должна значительно выходить за пределы ламинарного подслоя. Расчет и опыт дают оптимальное значение $h = 10 \delta_n$.

4.2. Тепловая защита сопл РДТТ

4.2.1. Тепловая защита камеры сгорания

Теплозащитные покрытия (ТЗП), наносимые на стенки элементов конструкции, являются основным видом тепловой защиты РДТТ. Для таких покрытий используются различные материалы, отличающиеся

свойствами, механизмом поглощения тепла. Самые распространенные теплозащитные материалы (ТЗМ) – композиционные материалы, состоящие из основы (каучука, смолы или каучукосмоляной композиции) и различных наполнителей (сажи, оксида кремния, асбестовых нитей, угольных нитей и тканей и др.). Основные свойства таких ТЗМ:

- низкая теплопроводность, что определяет нагрев только поверхностного слоя покрытия при воздействии внешнего теплового потока;
- способность разлагаться при достижении температуры нагрева порядка 600...800 К;
- превращение исходного твердого материала при разложении в газообразные продукты и твердый пористый коксовый слой;
- способность коксового слоя вступать в химические реакции с продуктами сгорания при достижении температуры порядка 2000 К с образованием только газообразных продуктов;
- постоянный унос во времени продуктов разложения обдувающим потоком продуктов сгорания.

Обобщенный механизм разложения таких покрытий включает три стадии. На первой стадии, стадии инертного прогрева, происходит нагрев исходного материала до температуры разложения его компонентов. В течение этой стадии в материале не протекают какие-либо физические или химические процессы. Из-за низкой теплопроводности нагрев (подготовка к разложению) происходит только в поверхностном слое покрытия.

Вторая стадия, стадия нестационарного разложения, характеризуется реакциями разложения и образованием конечных продуктов. При этом на поверхности постоянно нарастает коксовый слой, а газообразные продукты протекают по его порам к поверхности покрытия и уносятся потоком продуктов сгорания топлива. Вторая стадия заканчивается в момент, когда температура на поверхности коксового слоя достигнет температуры, при которой начинается химическое взаимодействие углерода кокса с продуктами сгорания.

На третьей стадии, стадии квазистационарного разложения, начинается унос коксового слоя с постоянной скоростью. Во времени последовательно, слой за слоем, покрытие нагревается, разлагается и уносится. По мере работы двигателя общая толщина покрытия уменьшается и при ее правильном выборе в конце она будет равна нулю. Требуемая толщина покрытия определяется в основном

скоростью разложения и уноса теплозащитного материала u_p и временем работы двигателя t_p (временем воздействия теплового потока на стенку с покрытием): $\delta_n = u_p \cdot t_p$. Скорость разложения ТЗМ зависит от величины воздействующего суммарного теплового потока и характеристик теплозащитного материала:

$$u_p = q_{\Sigma} / \rho_n H_{\text{эф}}, \quad (17)$$

где ρ_n – плотность материала; $H_{\text{эф}}$ – эффективная энтальпия материала, характеризующая суммарные затраты тепла, которые требуются для полного разложения единицы массы материала, т.е. определяет его тепловую эффективность.

Плотность и эффективная энтальпия ТЗМ зависят от состава материала. Существующие материалы (табл. 2) можно разбить на шесть классов. Их характеристики представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Характеристики ТЗМ

Класс ТЗМ (состав)	Плотность кг/м ³	Эффек- тивная энтальпия, Дж/кг	Относи- тельная дефор- мация, %	Относи- тельная стоимость
Легковесные резины (основа – каучук, наполнитель – сажа)	1050	$6 \cdot 10^6$	50	1
Резины с порошко- образным минераль- ным наполнителем (основа–смесь каучука и смолы, наполнитель – сажа, оксид кремния, порошок асбеста)	1100	$7 \cdot 10^6$	35	2
Асборезины (основа – каучук, наполнитель– асбестовые нити)	1300	$8,5 \cdot 10^6$	30	3
Углепластики (основа- смесь каучука и смолы, наполнитель – углерод- ные волокна или ткани)	1400	$9,5 \cdot 10^6$	3...15	5
Углеметаллопластики (состав аналогичен сос- таву углепластиков, но с добавлением тонкой вольфрамовой сетки)	1550	$1,15 \cdot 10^7$	1...3	7

Класс ТЗМ (состав)	Плотность кг/м ³	Эффек- тивная энтальпия, Дж/кг	Относи- тельная дефор- мация, %	Относи- тельная стоимость
Углерод-углеродные ТЗМ (состоят из про- странственного каркаса из углеродистых жгутов, пропитанных пеком или смолой и насыщенных пирографитом или пиро- углеродом)	1650	$1,25 \cdot 10^7$	0,4...0,5	8

Как следует из табл. 2, защитные свойства ТЗМ возрастают с увеличением массы наполнителя и повышением его термостойкости. Об этом свидетельствует величина эффективной энтальпии. Однако при этом увеличиваются плотность материала и его стоимость. К тому же, с увеличением количества наполнителя увеличивается жесткость материала. Эластичные резины достаточно легко приклеить к любой криволинейной поверхности. Такие покрытия вследствие пластичности будут выдерживать любые нагрузки, не отрываясь от стенки. Высоконаполненные ТЗМ не обладают такими свойствами.

Отмеченные противоречивые характеристики определяют необходимость выбора оптимального материала для защиты конкретной поверхности. Очевидно, что при низких значениях тепловых потоков, воздействующих на стенку, нецелесообразно использовать материалы с высокой энтальпией из-за их высокой стоимости. Напротив, при мощных тепловых потоках применение резиноподобных материалов приведет к высокой скорости разложения и к существенному увеличению массы покрытия и массы всего двигателя.

Применительно к соплу для поверхности соплового днища и входной части сопла, где тепловые потоки начинают достаточно резко возрастать, следует применять армированные резины и углепластики. Основными материалами для раструба сопла являются высоконаполненные ТЗМ последних трех классов. Следует отметить, что для раструба сопла углерод-углеродный материал может выполнять роль не только теплозащиты, но и конструкционного материала, успешно выдерживающего незначительные нагрузки, реализуемые в данном участке двигателя.

4.2.2. Тепловая защита горловины сопла

Разлагающиеся ТЗП нецелесообразно использовать для тепловой защиты внутренних поверхностей сопла в районе горловины. В условиях значительного теплового воздействия в этой зоне будет происходить сильный разгар ТЗП, изменение проходных сечений соплового тракта и существенное изменение расходно-тяговых характеристик двигателя. Поэтому ТЗП сопла должны обеспечивать, прежде всего, постоянство площади критического сечения или минимальное изменение площади за время работы двигателя.

Такая задача решается с помощью эрозионно стойких теплозащитных материалов. Их принцип тепловой защиты основан на аккумулировании тепла в своей массе. При этом в материале не должно происходить заметных физико-химических превращений. Количество тепла, которое способно поглотить покрытие $Q = c_{\text{п}} m_{\text{п}} (T_{\text{max}} - T_{\text{нач}})$.

Больше тепла поглотят материалы, имеющие:

- высокую теплоемкость $c_{\text{п}}$;
- высокую температуру нагрева T_{max} (температуру плавления или разложения);
- высокую теплопроводность $\lambda_{\text{п}}$, что способствует аккумулярованию тепла во всей массе покрытия.

Таковыми свойствами обладают тугоплавкие металлы, их сплавы и графитовые материалы (табл. 3).

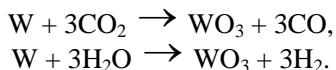
Т а б л и ц а 3

Свойства эрозионно стойких ТЗМ

Материал	$\rho_{\text{п}}, \text{кг/м}^3$	$\lambda_{\text{п}}, \text{Вт/мК}$	$c_{\text{п}}, \text{Дж/кгК}$	$T_{\text{max}}, \text{К}$
Вольфрам	19300	150	140	3650
Молибден	10200	136	250	2890
Вольфрамоникелевый сплав	16700	70	200	3400
УУМ	1900	0,4/50	750	3000
Пирографит	2200	0,8/150	700	2800

Использование материалов в реальных двигателях определяется их плотностью, эрозионной стойкостью и эксплуатационными свойствами. Из тугоплавких металлов наибольшее применение получили вольфрам и его сплавы благодаря высокой температуре плавления, высокой теплопроводности и высоким прочностным

характеристикам. При нормальной температуре для него предел прочности при растяжении составляет 260 МПа, в то время как у графитов всего 21 МПа. Недостатком этих материалов является их высокая плотность. Следует отметить, что тугоплавкие металлы способны окисляться при высоких температурах продуктами сгорания. Для вольфрама могут протекать реакции:



Образующиеся в результате оксиды имеют более низкие температуры плавления, не защищают поверхность покрытия от дальнейшего окисления из-за уноса обтекающим потоком. Для не очень высоких температур нагрева ТЗП (до 3300 К) унос вольфрама невелик и не превышает 0,001 мм/с. Молибден редко используется из-за склонности к трещинообразованию при больших градиентах температуры в начальный момент времени.

Графитовые материалы (углерод-углеродные материалы и пирографит) имеют преимущество перед тугоплавкими металлами по плотности, теплоемкости и стоимости. Но они уступают по прочности, хотя с повышением температуры их прочность даже возрастает. Их основной недостаток – способность взаимодействовать с кислородосодержащими компонентами продуктов сгорания. В результате протекания реакций ($C + CO_2 \rightarrow 2CO$ и $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$) твердый углерод поверхностного слоя превращается в газ, т.е. происходит унос поверхностного слоя. Так же как и для тугоплавких металлов, скорость уноса графитов и пирографитов зависит от температуры нагрева материала. Предельная скорость уноса в целом выше, чем у тугоплавких металлов. Следует отметить, что эти материалы обладают анизотропными свойствами. В частности, их теплопроводность меняется в зависимости от расположения армирующих элементов относительно направления скорости обдувающего потока продуктов сгорания. Это свойство можно использовать при конструировании теплозащиты.

4.2.3. Конструкция сопловых вкладышей

Эрозионно стойкие покрытия горловины сопла оформляются в виде специальных вкладышей. Их конструкция и материалы определяются, прежде всего, временем работы двигателя.

В двигателях со временем работы от 1,5 до 10 с используется однослойный вкладыш из любого эрозионно стойкого материала (рис. 9). Требуемую толщину вкладыша рассчитывают при решении задачи нестационарной теплопроводности двухслойной стенки, состоящей из слоя ТЗП и несущей стенки конструкции сопла. Исходными данными для задачи являются теплофизические характеристики теплозащитного материала и материала стенки, толщина стенки, воздействующий суммарный тепловой поток и время работы двигателя.

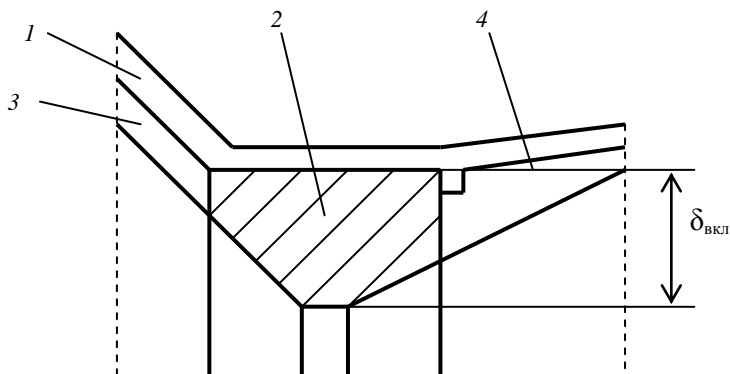


Рис. 9. Сопловой вкладыш горловины сопла: 1 – силовая конструкция сопла, 2 – теплозащитный вкладыш, 3 и 4 – тепловая защита входной части и раструбы

Начальное условие для задачи: постоянство температуры по толщине двухслойной стенки и равенство ее температуре окружающей среды (начальной температуре). На внутренней границе используется граничное условие третьего рода, т.е. равенство внешнего теплового потока потоку тепла, передаваемому теплопроводностью в глубь материала покрытия. На границе ТЗП и стенки подразумевают идеальный контакт, что определяет равенство тепловых потоков на границе для обоих материалов. Обычно теплообменом с окружающей средой с внешней границы пренебрегают. Точное решение для температурного профиля в системе получают численными методами решения. Толщину покрытия находят из условия, что в конце работы двигателя температура на границе покрытия и стенки равна допустимой температуре нагрева материала стенки.

В инженерных расчетах можно применить более простые, приближенные методы расчета. При использовании вольфрама или его сплавов теплофизические характеристики вкладыша и металлической стенки близки. Это позволяет заменить двухслойную стенку однослойной с осредненными теплофизическими характеристиками:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} + \lambda_{\text{п}} \delta_{\text{п}}}{\delta_{\Sigma}} ; c = \frac{c_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} + c_{\text{п}} \delta_{\text{п}}}{\delta_{\Sigma}} ; \rho = \frac{\rho_{\text{ст}} \delta_{\text{ст}} + \rho_{\text{п}} \delta_{\text{п}}}{\delta_{\Sigma}} ,$$

где $\delta_{\Sigma} = \delta_{\text{ст}} + \delta_{\text{п}}$. Используя решение нестационарной задачи теплопроводности для однослойной стенки и принимая условие непревышения температуры нагрева стенки допустимой температуры нагрева материала стенки в конце работы на внешней поверхности, определяют толщину условной стенки. Толщина вкладыша будет равна $\delta_{\text{п}} = \delta_{\Sigma} - \delta_{\text{ст}}$.

При использовании графитов, свойства которых сильно отличаются от свойств металла, такой подход не корректен, так как теплопроводность графита может быть существенно ниже, чем у металлической стенки. В этом случае приближенное решение может быть получено при следующем допущении. Слой графита с низкой теплопроводностью воспринимает тепловые нагрузки. Теплопроводность стенки считается бесконечно большой, т.е. по ее толщине температура постоянна. Тогда для температуры слоя ТЗП приближенное решение имеет вид:

$$\theta = \frac{T - T_{\text{нач}}}{T_{\Gamma} - T_{\text{нач}}} = 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{m + 0,4}\right), \text{ где } t_1 = a_{\text{п}} t / \delta_{\text{п}}^2 ,$$

$$m = 1/\text{Bi} + \frac{(\rho \cdot c \cdot \delta)_{\text{ст}}}{(\rho \cdot c \cdot \delta)_{\text{п}}} (1 + 1/\text{Bi}) , \text{ Bi} = \alpha \cdot \delta_{\text{п}} / \lambda_{\text{п}} .$$

Подставляя в приведенные выражения вместо температуры значение допустимой температуры и время, равное времени работы, определяют необходимую толщину вкладыша.

В двигателях с большим временем работы, более 10 с, рассмотренные однослойные эрозионно стойкие вкладыши неприемлемы. В этих условиях графитовые материалы будут иметь большой разгар. Тугоплавкие металлические материалы обеспечат минимальный разгар критического сечения, но существенно увеличат

массу сопла и двигателя. Поэтому для таких двигателей можно использовать многослойный вкладыш (рис. 10).

Сам вкладыш 2 изготавливают из графитового материала, он играет роль теплопоглотителя. Это обеспечивает минимальную массу всей теплозащиты горловины сопла. С внутренней стороны поверхность вкладыша покрывается тонким слоем облицовки 3 из вольфрама или вольфрамового сплава. Задача облицовки – изолировать графитовый вкладыш от контакта с продуктами сгорания и исключить его поверхностный разгар. Тонкий слой облицовки никакой роли как теплозащитный материал не играет. Для снижения общей массы на границе вкладыша и защищаемой стенки размещается слой термостойкой теплоизоляции 4 из керамического материала или асбестоцемента. Благодаря очень низкой теплопроводности теплоизоляции на небольшой ее толщине резко падает температура. Это позволяет существенно уменьшить толщину графитового вкладыша. Без теплоизоляции толщина вкладыша должна быть такой, чтобы на его внешней поверхности температура в конце работы двигателя не превышала допустимую температуру нагрева материала силовой стенки сопла, т.е. порядка 900 К. С изоляцией эта температура не должна превышать температуру начала разложения материала теплоизоляции ~ 2000 К. Небольшой слой теплоизоляции, толщиной несколько миллиметров, дает существенный выигрыш в массе вкладыша.

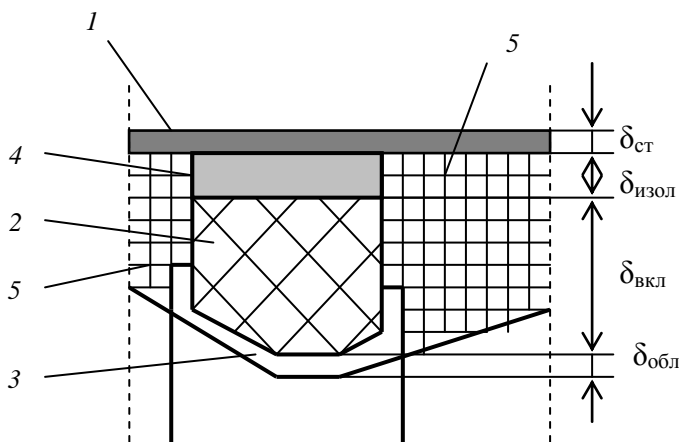


Рис. 10. Многослойная теплозащита горловины сопла. 1 – стенка сопла; 2 – вкладыш; 3 – облицовка; 4 – теплоизоляция; 5 – теплозащита входной и выходной частей

Для определения характерных толщин многослойного вкладыша требуется решить чрезвычайно сложную задачу – задачу нестационарной теплопроводности многослойной стенки, состоящей из разнородных материалов. Расчетная схема приведена на рис. 11.

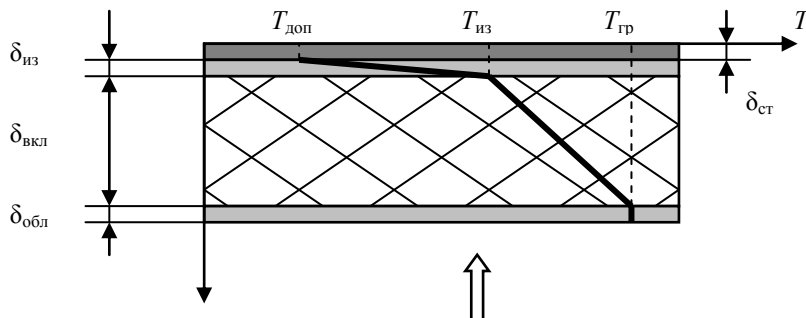


Рис. 11. Модель многослойной стенки: $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура нагрева материала стенки; $T_{\text{из}}$ – температура разложения теплоизоляции; $T_{\text{гр}}$ – температура разложения материала вкладыша

Задача включает четыре уравнения теплопроводности для каждого слоя и краевые условия. Начальное и граничное условия на внутренней поверхности аналогичны условиям для однослойной стенки. Кроме того, на всех границах между слоями задаются условия равенства тепловых потоков. Решить задачу можно только численными методами. Для определения толщин слоев используют условия непревышения температуры допустимых значений нагрева материалов в конце работы в виде $T_1 = T_{\text{плав}}$ (для облицовки), $T_2 = T_{\text{гр}}$ (для графита), $T_3 = T_{\text{из}}$ (для теплоизоляции) и $T_4 = [T_{\text{доп}}]$ (для несущей стенки). Анализ результатов численного решения показывает, что на толщину всех слоев оказывают влияние следующие факторы: время работы двигателя t_p , температура продуктов сгорания T_0 , плотность теплового потока в стенку горловины (суммарный коэффициент теплоотдачи α_Σ), радиус критического сечения сопла $R_{\text{кр}}$.

Аппроксимация результатов численного решения позволяет получить следующие зависимости для оценки толщин слоев:

$$\begin{aligned}\delta_{\text{обл}} &= 2,71 \cdot 10^{-3} + 2,26 \cdot 10^{-3} X_1 + 3,69 \cdot 10^{-3} X_2 + 3,25 \cdot 10^{-3} X_3 + 2,88 \cdot 10^{-3} X_4; \\ \delta_{\text{вкл}} &= 6,15 \cdot 10^{-2} + 1,74 \cdot 10^{-2} X_1 - 9,78 \cdot 10^{-4} X_2 + 4,0 \cdot 10^{-4} X_3 + 5,19 \cdot 10^{-3} X_4; \\ \delta_{\text{из}} &= 2,0 \cdot 10^{-3} + 9,06 \cdot 10^{-4} X_1 - 3,1 \cdot 10^{-5} X_2 - 4,75 \cdot 10^{-7} X_3 - 0,3 \cdot 10^{-4} X_4,\end{aligned}$$

где $X_1 = \frac{t_p - 65}{35}$, $X_2 = \frac{T_r - 3005}{2000}$, $X_3 = \frac{\alpha_\Sigma - 10000}{6000}$, $X_4 = \frac{R_{кр} - 0,11}{0,09}$.

Одно из направлений совершенствования РДТТ – использование высокоэнергетических топлив, температура продуктов сгорания которых на входе в сопло может достигать 3900К. Усложнение тепловых условий в сопле требует более эффективной тепловой защиты. Применение многослойной тепловой защиты горловины сопла становится неэффективным по следующим причинам:

- существенного возрастания массы соплового блока из-за увеличения требуемой толщины покрытия для двигателей с высокими расходными характеристиками;
- плохой совместимости тугоплавких металлов с другими материалами при высоких температурах (например, химическая реакция вольфрама с графитом);
- усложнения конструкции ТЗП.

Выход – использовать в качестве тепловой защиты углерод–углеродные материалы (УУМ), обладающие уникальными свойствами, среди которых можно выделить следующие:

- высокая тепловая эрозионная стойкость;
- стойкость к термическим ударам;
- увеличение прочности при нагревании в 2...2,5 раза;
- малая плотность (не более 2000 кг/м²);
- дешевое и недефицитное сырье;
- возможность направленно менять свойства путем изменения исходных компонентов, параметров технологического процесса получения, использования оптимальных схем армирования;
- возможность применения в любом месте сопла;
- применимость почти всех видов механической обработки;
- химическая совместимость с самыми разнообразными материалами;
- способность сохранять свойства при длительном хранении в различных климатических условиях.

УУМ представляют собой углеродный пространственный каркас из углеродных жгутов или стрижней, который насыщен пироуглеродом и пропитан каменноугольными или нефтяными пеками или смолами. Благодаря очень большому содержанию углерода они

обладают высокой тепловой эрозионной стойкостью. Однако УУМ, как и другие теплозащитные материалы, подвергаются уносу под воздействием высокотемпературного потока продуктов сгорания. Механизм их разрушения в основном носит тепловой характер. При высоких температурах углерод покрытия взаимодействует с кислородосодержащими компонентами продуктов сгорания. Однако в одинаковых условиях теплового нагружения, в отличие от ТЗМ с обычным углеродным наполнителем (углепластики), температура поверхности УУМ заметно ниже из-за большой теплопроводности. Это определяет более низкую скорость окисления углерода и меньшую скорость химического уноса.

На суммарный унос влияет ряд факторов. Прежде всего, сказывается сильная анизотропия свойств УУМ. В зависимости от ориентации армирующих элементов относительно поверхности материала, обдуваемой потоком продуктов сгорания, могут значительно меняться как эрозионные, так и прочностные характеристики. Суммарный унос материала оказывается максимальным вдоль главных осей анизотропии, которые соответствуют траектории армирующего элемента. Поэтому детали эрозионно стойких ТЗП следует располагать под оптимальными углами направления осей анизотропии относительно оси сопла.

Другим важным фактором является плотность углеродного материала. При всех прочих одинаковых условиях, чем больше плотность материала, тем выше его эрозионная стойкость. Расчеты и экспериментальные данные показывают, что зависимость линейной скорости уноса углеродных теплозащитных материалов от их плотности может быть аппроксимирована зависимостью типа $u_{\text{ун}} = 0,48 - 0,215 \rho_{\text{п}}$, где u в мм/с, если ρ в г/см³.

При течении двухфазного потока продуктов сгорания происходит перенос конденсированных частиц на поверхность ТЗП за счет осаждения турбулентными пульсациями или инерционное осаждение при искривлении линий тока потока. Унос материала может изменяться за счет как интенсификации нагрева стенки, так и образования сплошной жидкой пленки конденсированного оксида алюминия. В отдельных зонах возможно эрозионное воздействие высокоскоростных частиц при соударении с поверхностью покрытия. Все эти эффекты необходимо учитывать при проектировании тепловой защиты.

5. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СОПЛОВЫХ БЛОКОВ

Конструкции сопел ЖРД не отличаются разнообразием. Как и весь двигатель, сопла – цельносварные элементы. При использовании внешнего конвективного охлаждения их несущая конструкция выполняется в виде двухслойной стенки. Между внутренней и наружной стенками располагаются ребра или гофры (рис. 8), образующие продольные каналы для протекающего охладителя. При больших степенях расширения сопла изготавливаются из нескольких секций, которые сваркой соединяются друг с другом при сборке (рис. 12).

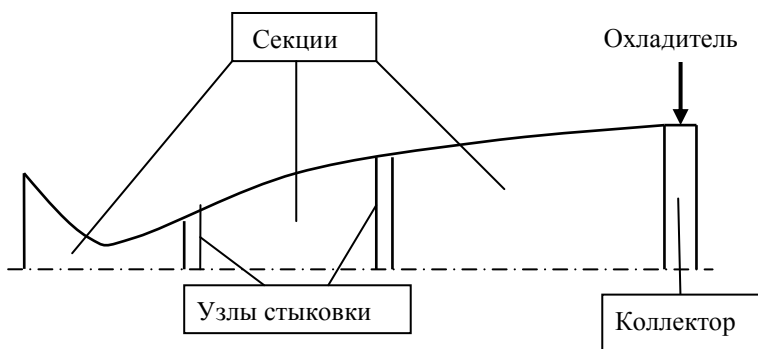


Рис. 12. Конструктивная схема сопла

Каждую секцию изготавливают полностью с несущей конструкцией, оребрением, конечными шпангоутами узлов стыковки и другими вспомогательными элементами. Сборка секций в единое целое осуществляется сваркой в следующей последовательности (рис. 13). Вначале сваривают внутренние стенки секций. Затем по посадочным поверхностям шпангоутов устанавливают кольцевую накладку и закрепляют ее сваркой с обеими секциями. Следует отметить, что вследствие переменного теплового потока по длине сопла расчетная толщина охлаждающего тракта будет также непрерывно меняться. С технологической точки зрения в каждой секции выбирают единую толщину охлаждающего тракта, равную наименьшему расчетному значению в пределах данной секции.

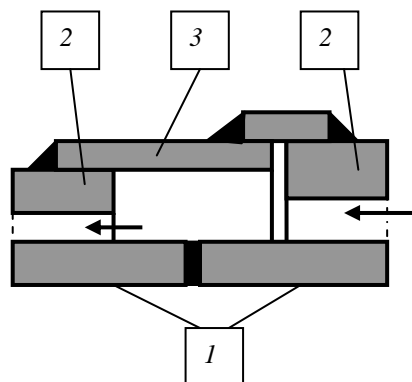


Рис. 13. Узел стыковки секций сопла: 1 – внутренние стенки охлаждающего тракта, 2 – внешние стенки охлаждающего тракта, 3 – кольцевая накладка

Обязательным элементом конструкции сопла является узел подвода охладителя. С учетом того, что охладитель необходимо подать в каждый продольный канал охлаждающего тракта, конструкция узла подвода обычно выполняют следующим образом (рис. 12 и 14).

В конечной части раструбы устанавливают коллектор, представляющей собой кольцевой трубопровод постоянного сечения со срезанной нижней частью (рис. 14). Этой нижней частью коллектор стыкуется с наружной поверхностью внешней стенки охлаждающего тракта и приваривается к ней.

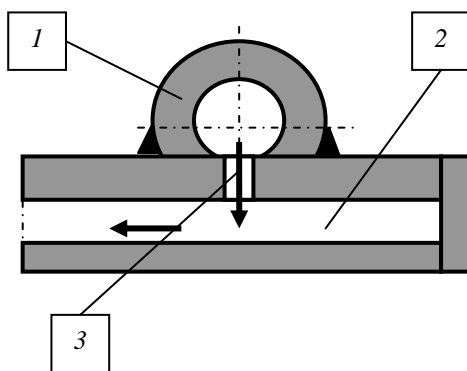


Рис. 14. Коллектор подачи охладителя: 1 – коллектор; 2 – охлаждающий тракт; 3 – отверстие подачи охладителя в индивидуальный канал

Предварительно во внешней стенке охлаждающего тракта в месте установки коллектора по окружности сверлят отверстия, которые обеспечивают доступ охладителя в каждый канал охлаждающего тракта. Общий подвод охладителя в коллектор обеспечивается трубопроводом, присоединяемым к его внешней поверхности.

Место расположения коллектора на раструбе может быть различным для разных двигателей. Классическое расположение – это срез сопла. Однако при больших степенях расширения возможна реализация малых тепловых потоков в стенку в конечной части раструба. В этом случае вместо внешнего конвективного охлаждения целесообразно использовать радиационное охлаждение, при котором поступающее в стенку тепло сбрасывается излучением во внешнюю среду. Зону возможной реализации радиационного охлаждения рассчитывают.

Конструкция сопел РДТТ отличается разнообразием. Их можно классифицировать по следующим признакам.

1. *По контуру образующей сопла.* Если в ЖРД используются только профилированные сопла из-за их большой степени расширения, то в РДТТ могут применяться сопла с небольшой степенью расширения. Для таких сопел достоинства профилированного сопла (меньшая длина и масса, меньшие потери удельного импульса тяги) нивелируются. На первый план выступают простота конструкции и технологичность изготовления конических сопел. Конические сопла обычно применяют в малогабаритных двигателях вспомогательного назначения.

2. *По количеству сопел в блоке.* В большинстве случаев двигатели имеют односопловой блок с одним центральным соплом. Многосопловые блоки используют с учетом конструкции двигателя, условий его компоновки в летательном аппарате, при наличии ограничения на длину двигателя или необходимости обеспечить управление аппарата на траектории за счет двигателя. Примеры использования многосопловых блоков:

в двигателях с кольцевыми камерами сгорания отсутствует возможность установить сопло по центру камеры. Приходится располагать несколько одинаковых сопел по периферии;

для двигателей мягкой посадки спускаемых космических аппаратов существует жесткое требование по минимальной длине двигателя из условий компоновки. Это условие можно выполнить заменой одного сопла на несколько сопел, длина которых будет заметно меньше;

часто для управления полетом летательного аппарата во время работы двигателя служат поворотные сопла. При повороте сопла возникает управляющий момент, обеспечивающий разворот аппарата в том или ином направлении. Одно поворотное сопло позволяет осуществлять стабилизацию и управление аппаратом по каналам тангажа и рысканья. Чтобы дополнительно управлять по каналу крена используют четырехсопловой блок. Такие поворотные сопла располагаются симметрично на сопловом днище и работают попарно, создавая управляющие моменты. Следует учитывать, что многосопловые блоки обладают большей массой, чем односопловой блок.

3. *По соосности сопла и двигателя.* В большинстве сопло устанавливается так, чтобы его продольная ось совпадала с продольной осью двигателя. Но в некоторых случаях требуется предохранить поверхности других элементов летательного аппарата от воздействия истекающей из сопла струи продуктов сгорания, так как иначе потребуются дополнительная тепловая защита этих поверхностей. Это приводит к увеличению пассивной массы аппарата. Может оказаться целесообразным отклонить истекающую струю за счет установления сопла под некоторым углом к продольной оси двигателя. Такое решение практически исключит воздействие газовой струи на элементы конструкции аппарата, но при этом произойдет уменьшение тяги двигателя. В ускорении аппарата участвует только горизонтальная составляющая тяги, а поперечная составляющая будет определять потери тяги.

4. *Утопленные сопла.* Маршевые двигатели ступеней баллистических ракет и ракетоносителей космических аппаратов имеют большие тяги и значительные габариты сопла. Для них часто ставится условие по ограничению длины. Одним из путей выполнения этого условия является использование утопленных сопел. Такие сопла частично вдвигаются в камеру сгорания, что позволяет уменьшить общую длину двигателя (рис. 15).

При использовании утопленных сопел необходимо учитывать следующие особенности. Для них по сравнению с обычными соплами требуется дополнительная тепловая защита внешней поверхности утопленной части (7). Это увеличивает общую массу двигателя. Кроме того, существенно меняется газодинамика течения продуктов сгорания в районе утопленной части, что сказывается на характере теплового взаимодействия газа и стенок. Так в «носике» утопленной части реализуются мощные тепловые потоки, соизмеримые с тепловыми потоками в горловине сопла.

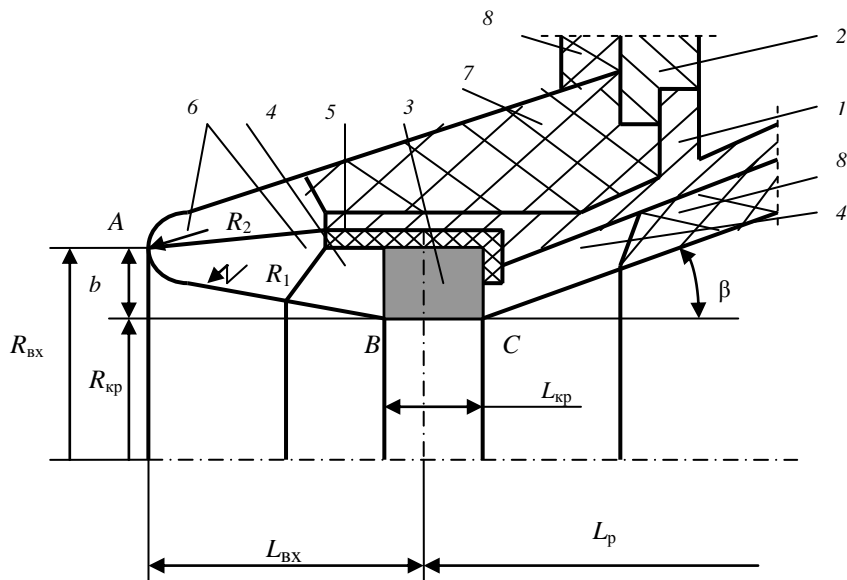


Рис. 15. Утопленное сопло: 1 – силовая конструкция сопла; 2 – силовая конструкция днища; 3 – графитовый вкладыш; 4 – входной и выходной вкладыши; 5 – теплоизоляция; 6 – вкладыши «носика» утопленной части сопла; 7 – теплозащита внешней поверхности утопленной части сопла; 8 – теплозащита раструба сопла и днища

Поэтому в этой части необходимы высокоэрозионные теплозащитные материалы в виде специальных вкладышей 6. В горловине сопла теплозащита строится традиционным способом (сочетание графитового вкладыша 3 и теплоизоляции 5). Однако на участках перед горловиной сопла и сразу за ней ставятся дополнительные вкладыши из высокоэрозионных теплозащитных материалов 4, что позволяет поддерживать нормальный профиль внутренней поверхности сопла во время его работы. При использовании утопленного сопла в двигателе встает вопрос, какая степень утопленности целесообразна. Чем большая часть сопла располагается в камере сгорания, тем меньше длина двигателя и длина всего летательного аппарата. Это дает выигрыш в массе, например, за счет уменьшения переходного отсека. Но с другой стороны, масса двигателя увеличивается за счет дополнительной массы тепловой защиты на внешней стороне утопленной части сопла.

Кроме того, необходимо учитывать, что при помещении утопленной части в районе соплового днища приходится реконструировать заряд, формируя в нем выточку под сопло. При неизменной массе топлива это приводит к удлинению заряда и камеры сгорания, т.е. к увеличению массы двигателя. Поэтому в каждом случае существует оптимальная с точки зрения массы степень утопленности сопла. Опыт создания таких двигателей показывает, что предельная длина утопленной части составляет 30...35%.

Для крепления сопла к днищу используют обычные, широко распространенные в технике способы. Малогабаритные сопла крепятся с помощью резьбового соединения, для крупногабаритных сопел применяют шпилечные или болтовые соединения. В месте крепления на днище формируется утолщение в виде стыковочного шпангоута. Если для камеры сгорания применяется композиционный материал, созданный по технологии «кокон», то в месте стыковки днища с соплом заделывается металлический закладной элемент, к которому и крепится сопло.

Библиографический список

1. Белов, В.П. Тепловое проектирование ракетных двигателей: практическое пособие к выполнению домашнего задания / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2016.
2. Белов, В.П. Внутрикамерные процессы в ракетных двигателях на твердом топливе: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2018.
3. Белов В.П. Проектирование элементов конструкции ракетных двигателей на твердом топливе: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2011.
4. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов проектирование РДТТ: учебник. М.: Машиностроение, 1991.
5. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: учебник. М.: Машиностроение, 1980.
6. Ермолаев В.И. Двигательные установки космических аппаратов: учебник / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2016.
7. Белов В.П. Тепловая защита элементов конструкции ракетных двигателей на твердом топливе: учебное пособие / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2010.

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОПЛОВОГО БЛОКА.....	3
1.1. Форма и параметры сопла.....	4
1.2. Параметры потока продуктов сгорания в сопле	6
1.3. Связь выходных параметров двигателя с параметрами сопла.....	9
1.4. Потери удельного импульса тяги в сопле.....	10
2. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОПЛА.....	15
3. ТЕПЛОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОПЛА	17
3.1. Алгоритм теплового расчета	17
3.2. Расчет плотности конвективного теплового потока.....	19
3.3. Расчет лучистого теплового потока	27
4. ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА СОПЛ	30
4.1. Тепловая защита сопл ЖРД.....	30
4.1.1. Стационарный тепловой режим системы «газ–стенка–охлади- тель»	32
4.1.2. Нагрев охладителя.....	33
4.1.3. Теплообмен стенки с охладителем	35
4.2. Тепловая защита сопл РДТТ.....	39
4.2.1. Тепловая защита камеры сгорания.....	39
4.2.2. Тепловая защита горловины сопла	43
4.2.3. Конструкция сопловых вкладышей	44
5. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СОПЛОВЫХ БЛОКОВ	51
<i>Библиографический список</i>	<i>56</i>

Белов Валерий Павлович

Сопловые блоки ракетных двигателей

Редактор *Г.В. Никитина*

Корректор *Л.А. Петрова*

Компьютерная верстка: *А.В. Мецерыкова*

Подписано в печать 15.04.2019. Формат 60х84/16. Бумага документная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,325. Тираж 100 экз. Заказ № 65.

Балтийский государственный технический университет

Типография БГТУ

190005, С.-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1