



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Глава 2. Термогазодинамический расчет рабочего процесса ГТД

§ 2.6. Выходные устройства

2.6.1. Назначение и классификация

К выходным устройствам относятся **сопла**, применяемые на двигателях прямой реакции и **диффузорные выходные устройства**, применяемые на газотурбинных двигателях со свободной турбиной.

Сопло служит для преобразования тепловой и потенциальной энергии газа в кинетическую энергию вытекающей струи, а также для обеспечения требуемой пропускной способности на выходе из двигателя.

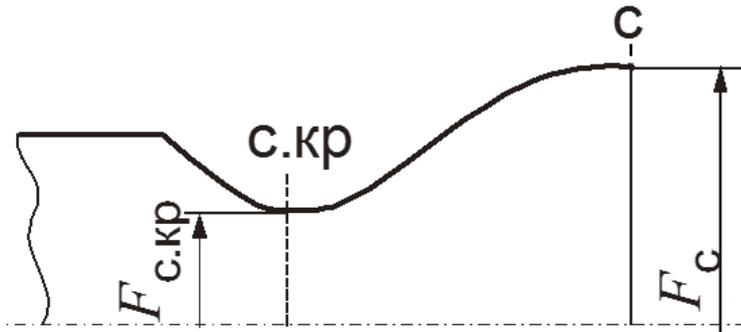
Сопла бывают:

- сужающиеся (дозвуковые);
- сверхзвуковые.

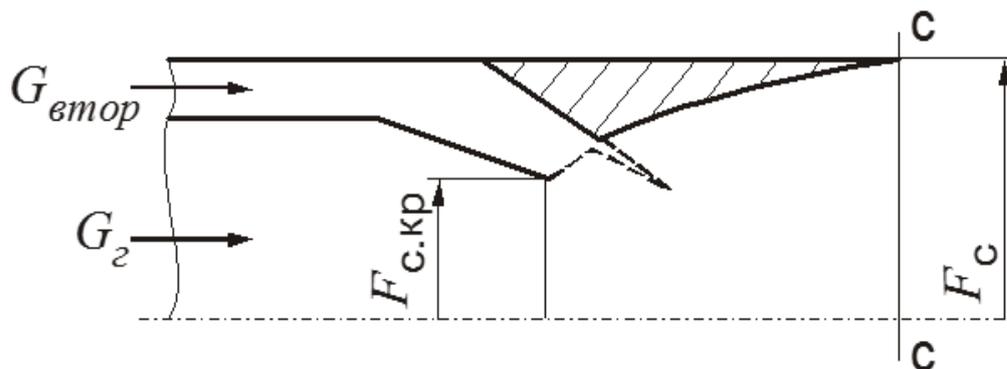


Среди сверхзвуковых сопел выделяют:

- сопло Лавала;



- эжекторное сопло;



Сопла двигателей сверхзвуковых летательных аппаратов выполняются регулируемыми, что позволяет оптимально согласовать работу компрессора и турбины в различных условиях эксплуатации и повысить эффективность применения силовой установки.

Современные выходные устройства могут обеспечивать отклонение выходной струи вплоть до изменения направления ее движения на противоположное. Таким образом обеспечивается управление вектором тяги.



Диффузорные выходные устройства служат для уменьшения давления за свободной турбиной ГТД СТ и, тем самым, увеличения ее мощности.



2.6.2. Параметры режима работы

M_{Π} - число Маха скорости полета.

λ_C - приведенная скорость потока рабочего тела в выходном сечении.

π_c - действительная степень понижения давления в выходном устройстве.

Действительная степень понижения давления в выходном устройстве - отношение полного давления газа в сечении на входе (например, в сечении Т) к статическому давлению в сечении С на выходе из него:

$$\pi_c = \frac{p_T^*}{p_C} = \frac{1}{\pi(\lambda_{Cs})}.$$

$\pi_{\text{ср}}$ -располагаемая степень понижения давления в выходном устройстве.

Располагаемая степень понижения давления в выходном устройстве - отношение полного давления газа в сечении на входе (например, в сечении Т) к давлению окружающей среды:

$$\pi_{\text{ср}} = \frac{p_{\text{T}}^*}{p_{\text{H}}}.$$

Как известно из газовой динамики, в канале сужающегося сопла срабатывается до полного расширения докритическая или, в предельном случае, критическая степень понижения давления.

Величина критической степени понижения давления определяется по формуле

$$\pi_{\text{кр}} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1}{\pi(\lambda=1)}.$$

При $k_2=1,33$ $\pi_{\text{кр}}=1,85$.

При $k_6=1,4$ $\pi_{\text{кр}}=1,89$.

Соответственно, в сужающемся сопле реализуются следующие режимы работы:

- докритические: $\pi_{ср} < \pi_{кр} \Rightarrow \pi_c = \pi_{ср}, p_C = p_H, \lambda_C < 1;$
- критические: $\pi_{ср} = \pi_{кр} \Rightarrow \pi_c = \pi_{кр} = \pi_{ср}, p_C = p_H, \lambda_C = 1;$
- сверхкритические: $\pi_{ср} > \pi_{кр} \Rightarrow \pi_c = \pi_{кр}, p_C > p_H$ (недорасширение), $\lambda_C = 1.$

Для сверхзвуковых сопел величина $\pi_{ср}$ и ее соотношение с π_c также являются основными параметрами, характеризующими режим работы.

Если $\pi_{ср} = \pi_c$, то $p_C = p_H$, то есть реализуется режим полного расширения.

Когда $\pi_{ср} \neq \pi_c$, давление на выходе из сопла не равно атмосферному $p_C \neq p_H$, то есть имеют место режимы недорасширения или перерасширения (нерасчетные режимы работы).

2.6.3. Критерии эффективности

φ_c - коэффициент скорости.

Коэффициентом скорости φ_c называют отношение осевой составляющей действительной скорости истечения к идеальной (изоэнтропической) скорости при одинаковых в обоих случаях степенях понижения давления и одинаковых полных температурах газового потока:

$$\varphi_c = \frac{c_c}{c_{cs}} .$$

Коэффициентом скорости учитываются внутренние потери, обусловленные вязкостью газа, отклонением потока от осевого направления, а также возможным возникновением скачков уплотнения в сверхзвуковых соплах.

Коэффициент скорости в соплах современных ТРДД и ТРД изменяется в пределах $\varphi_c = 0,97 \dots 0,995$, сопла ТВД характеризуются более низким значением - $\varphi_c = 0,90 \dots 0,97$.

σ_c - коэффициент восстановления полного давления в выходном устройстве.

Коэффициент восстановления полного давления в выходном устройстве σ_c представляет собой отношение полных давлений на выходе из выходного устройства и на входе в него.

$$\sigma_c = \frac{p_c^*}{p_T^*}.$$

С помощью коэффициента σ_c обычно оцениваются потери в диффузорных выходных устройствах ГТД СТ, который изменяется в пределах $\sigma_c = 0,98 \dots 0,99$.

Величины σ_c и φ_c взаимозависимы.

r_c - коэффициент тяги.

Коэффициентом тяги r_c называют отношение тяги сопла P_c к его идеальной тяге P_{cs} при одинаковом (действительном) в обоих случаях расходе газа через сопло:

$$r_c = \frac{P_c}{P_{cs}}.$$

Идеальной тягой сопла P_{cs} условно называют динамический импульс в его выходном сечении, соответствующий изоэнтропическому ($\varphi_c=1$) полному ($p_C=p_H$) расширению потока при заданной располагаемой степени понижения давления:

$$P_{cs} = G_C \cdot c_{cs}.$$

Тягой сопла P_c условно называют сумму действительного динамического импульса в выходном сечении сопла и статической составляющей тяги:

$$P_c = G_C \cdot c_c + F_C (p_C - p_H).$$

μ_c - коэффициент пропускной способности сопла.

Коэффициент пропускной способности сопла μ_c равен отношению действительного расхода газа через сопло к идеальному при одинаковых условиях на входе в сопло и одинаковом внешнем давлении:

$$\mu_c = \frac{G_c}{G_{cид}} .$$

a_c - относительная пропускная способность сопла.

$$a_c = \mu_c q(\lambda_{c.кр}) = \frac{G_c \cdot \sqrt{T_T^*}}{m_2 \cdot p_T^* \cdot F_{c.кр}} .$$

Относительная пропускная способность a_c определяется по результатам экспериментальных исследований путем замера расхода рабочего тела, его полной температуры и давления в сечении на входе в сопло, а также геометрической площади критического сечения.

A_c - пропускная способность сопла.

A_c позволяет оценить величину расхода рабочего тела, проходящего через сопло при заданных условиях на входе в нее

$$A_c = \frac{G_C \cdot \sqrt{R_2 \cdot T_T^*}}{p_T^*}.$$

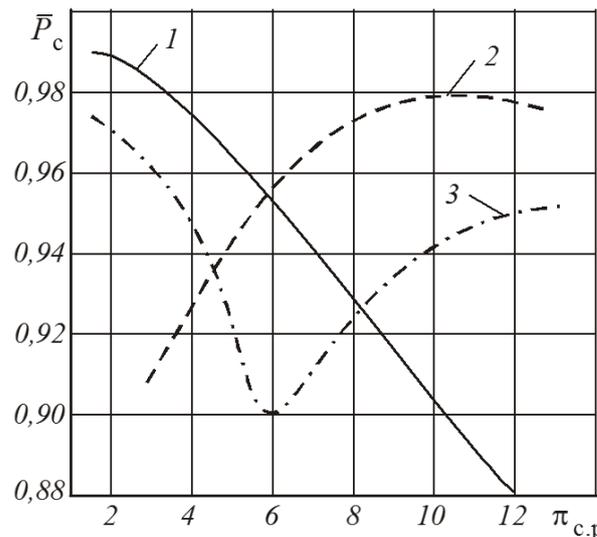
$\mu_c q(\lambda_{C.KP}) F_{C.KP}$ - пропускная способность сопла.

$$\mu_c q(\lambda_{C.KP}) F_{C.KP} = \frac{G_C \cdot \sqrt{T_T^*}}{m_2 \cdot p_T^*}.$$

$$\mu_c q(\lambda_{C.KP}) F_{C.KP} \sim A_c.$$

Тяговые характеристики. С помощью коэффициентов φ_c и r_c описываются тяговые характеристики сопла, которые представляют собой зависимости данных критериев эффективности от располагаемой степени понижения давления $\pi_{c,p}$. Обычно их получают экспериментально на специальных установках, где замеряются тяга сопла, статическое давление на его поверхности и параметры потока во входном и выходном сечениях.

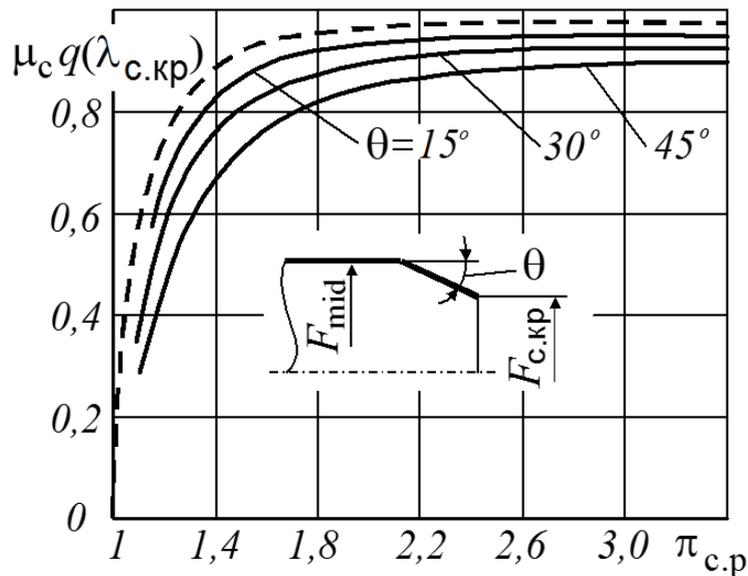
Тяговые характеристики
сужающегося сопла (1),
сопла Лаваля (2),
эжекторного сопла (3)



Расходные характеристики сужающегося сопла. Коэффициент расхода профилированных сопел большой и средней размерности близок к единице $\mu_c = 0,970 \dots 0,998$ и поэтому относительная пропускная способность $a_c = \mu_c q(\lambda_{c.kp})$ этих сопел в зависимости от располагаемой степени понижения давления при $\pi_{cp} < \pi_{kp}$ изменяется практически так же, как и относительная плотность тока, а при $\pi_{cp} > \pi_{kp}$ сохраняется постоянной.

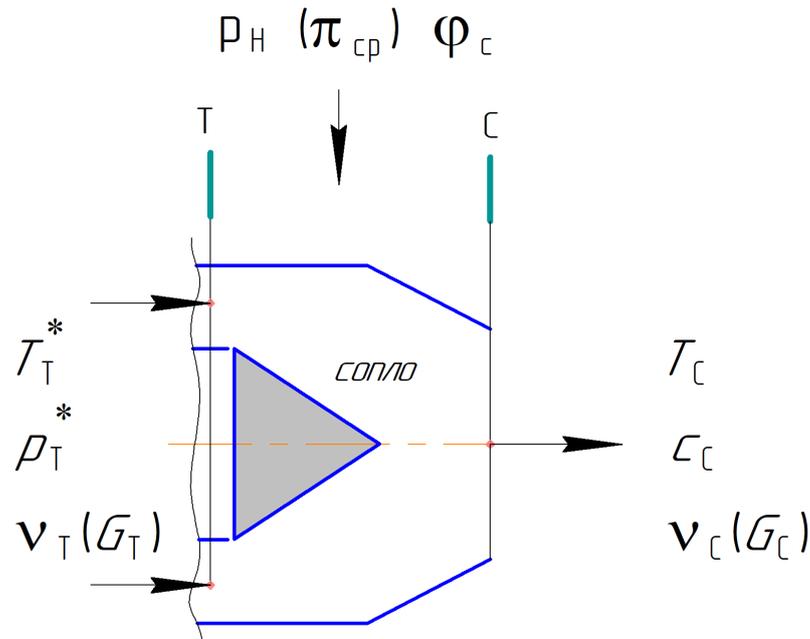
Коэффициент расхода μ_c и относительная пропускная способность a_c данного сопла однозначно определяются располагаемой степенью понижения давления π_{cp} .

Расходные характеристики сужающегося сопла



2.6.4. Расчет рабочего процесса

Расчетная схема



В приближенном методе определения параметров сопла расчет выполняется из условия полного расширения рабочего тела.

Располагаемая степень понижения давления

$$\pi_{\text{ср}} = \frac{p_{\text{T}}^*}{p_{\text{H}}}.$$

Скорость истечения рабочего тела из выходного устройства:

$$c_{\text{C}} = \varphi_{\text{C}} \sqrt{2 \cdot c_{\text{p}2} \cdot T_{\text{T}}^* \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{k_2} \pi_{\text{ср}}} \right)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

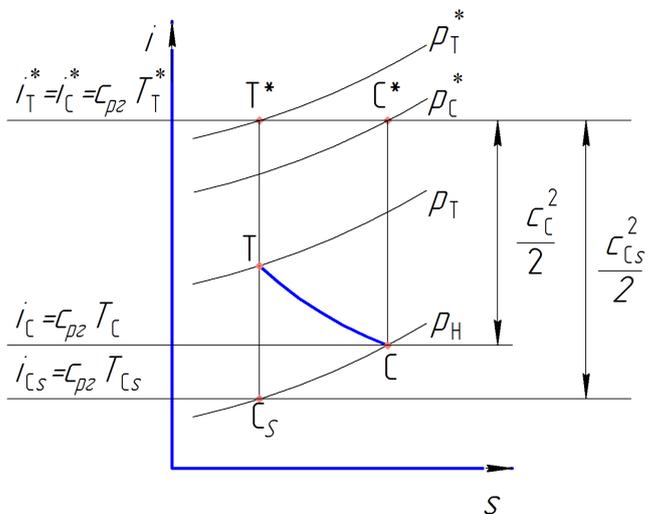
Статическая температура рабочего тела в сечении на выходе:

$$T_{\text{C}} = T_{\text{T}}^* - \frac{c_{\text{C}}^2}{2 \cdot c_{\text{p}2}}, \text{ К}.$$

Коэффициент изменения массы рабочего тела в сечении на выходе:

$$\nu_{\text{C}} = \nu_{\text{T}}.$$

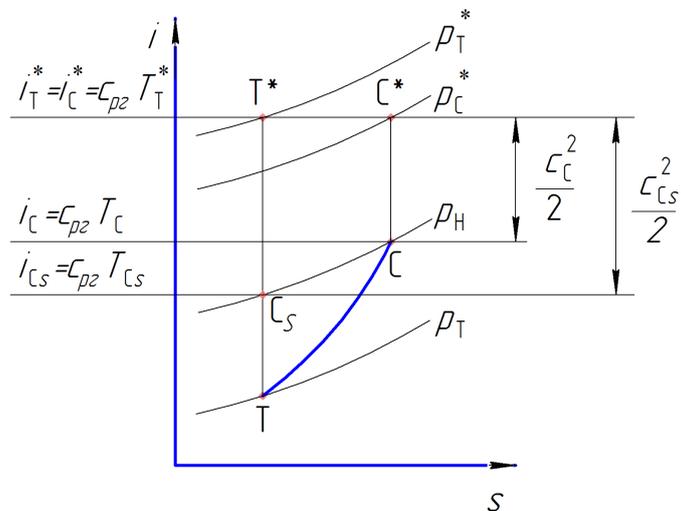
Вид рабочего процесса на i - s -диаграмме зависит от соотношения скоростей c_T и c_C , то есть от формы канала выходного устройства.



$$C_C > C_T$$

Сопло

Процесс расширения



$$C_C < C_T$$

Диффузорное выходное устройство

Процесс сжатия