

4. Система уравнений термогазодинамического расчета.**Типовые исходные данные:**

1. Термохимические характеристики компонентов или топлива в целом – УХФ, H_{II} , α ,
2. Условия в камере сгорания – p_k ,
3. Условия в произвольном сечении – p (на срезе сопла – p_a).

Типовой состав топлива:

Для «простого» топлива принято включать четыре химических элемента: С, Н, О, N. В РДТТ используют более сложные топлива, которые часто включают в себя металлические добавки: алюминий (Al), магний (Mg), бериллий (Be), бор (B).

Типовой состав продуктов сгорания (ПС) 4-х элементного топлива:

Принято считать, что здесь можно получить 11 основных составляющих продуктов сгорания:

$H_2O; CO_2; OH; CO; NO; H_2; O_2; N_2; H; O; N$. При $\alpha < 0,5$ может «выпадать» углерод (C) в виде сажи. При горении твердых топлив с металлами образуется конденсированная фаза (K-фаза), например Al_2O_3 .

Обычно состав ПС выражают двумя способами:

- 1) через N_q – число молей газа в одном кг ПС,
- 2) через p_q – парциальное давление одного газа в ПС.

Известно, что $\frac{p_q}{p} = \frac{N_q}{N}$, где $N = \sum N_q$ – суммарное число молей всех газов,

$p = \sum p_q$ – полное давление всех газов в ПС.

Типовое число неизвестных в расчете:

Число неизвестных величин определяется числом газов в ПС и температурой. 11 газов + 1 температура = 12 неизвестных. Значит, для решения требуется 12 уравнений.

1) Уравнение сохранения давления (уравнение Дальтона). Полное давление смеси газов равно сумме парциальных давлений каждого газа

$$p = \sum p_q.$$

2) Уравнение сохранения энергии.

Для камеры двигателя составляются два вида этого уравнения:

а) Для камеры сгорания – $H_n^\kappa = H_n^T$, где H_n^κ – полная энтальпия ПС в КС, H_n^T – полная энтальпия топлива. Здесь величина полной энтальпии ПС приравнивается к величине полной энтальпии топлива.

б) Для среза сопла (или любого сечения):

$$\text{В общем случае } H_n^\kappa = H_n^a + \frac{W_a^2}{2}, \text{ или } H_n^\kappa = H_n + \frac{W^2}{2}.$$

Здесь полная энтальпия ПС в любом сечении была бы дополнительной неизвестной, поэтому закон сохранения энергии используется в виде закона постоянства энтропии S по длине сопла:

$$S = const, \text{ т.е. } S_k = S_{кр} = S_i = S_a,$$

где S_k определяется для КС, величина которой уже известна.

3) Уравнения сохранения вещества (баланс вещества). Массовая доля любого химического элемента в составе ПС равна массовой доле этого элемента в составе топлива.

Массовая доля элемента в топливе зависит от:

а) массовой доли этого элемента в каждом компоненте,

б) соотношения расходов компонентов в топливе.

Количество уравнений для 4-х элементного топлива будет равно 4. (Выводы этих уравнений – на семинарском занятии). При решении этих уравнений появляется ещё одно неизвестное N – суммарное число молей всех газов. И так:

число указанных выше уравнений = 6, число неизвестных = 12+1=13. Значит требуется ещё 7 уравнений.

4) Уравнения констант химического равновесия K_p .

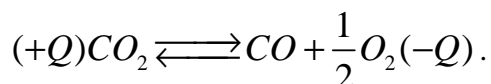
В процессе химических реакций, проходящих с диссоциацией и рекомбинацией, может устанавливаться химическое равновесие. При равновесии концентрации газов находятся в определенных соотношениях между собой. Для количественного выражения этих соотношений используются константы химического равновесия. В расчете удобнее пользоваться не величинами концентрации, а величинами парциальных давлений газов.

Константа химического равновесия – это соотношение парциальных давлений газов в продуктах сгорания. Число независимых констант равновесия N_{Kp} равно разности числа газов $N_{газов}$ и числа химических элементов в продуктах сгорания $N_{элементов}$ элементов, т.е:

$$N_{Kp} = N_{газов} - N_{элементов}.$$

В нашем примере «простого» топлива $N_{Kp} = 11_{газов} - 4_{элементов} = 7$.

Таким образом, число неизвестных и число уравнений констант равновесия совпадают. Пример одной из реакций:



Поглощение тепла $(-Q)$ идет в реакции диссоциации (вправо), а выделение $(+Q)$ – в реакции рекомбинации (влево). Таким образом, для данной реакции константа будет как:

$$K_p = \frac{p_{co} \cdot p_{o_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{co_2}},$$

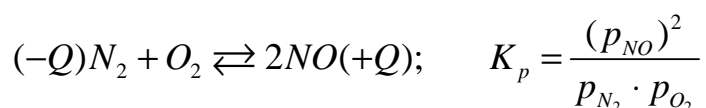
где p – парциальное давление;

K_p – константа химического равновесия;

$1/2$ – показатель степени.

В числителе K_p – с поглощением тепла, в знаменателе – с выделением тепла.

Исключение составляет реакция для азота:



Размерность у констант не учитывается.

Все уравнения констант химического равновесия составлены раз и навсегда и занесены в справочники под своими номерами.

1	$CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2} O_2$	$K_1 = \frac{P_{CO} \cdot (P_{O_2})^{1/2}}{P_{CO_2}} = f_1(T)$
2	$H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2} O_2$	$K_2 = \frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} = f_2(T)$
3	$H_2O \rightleftharpoons OH + \frac{1}{2} H_2$	$K_3 = \frac{P_{OH} \cdot (P_{H_2})^{1/2}}{P_{H_2O}} = f_3(T)$
4	$N_2 + O_2 \rightleftharpoons 2NO$	$K_4 = \frac{(P_{NO})^2}{P_{N_2} \cdot P_{O_2}} = f_4(T)$
5	$H_2 \rightleftharpoons 2H$	$K_5 = \frac{(P_H)^2}{P_{H_2}} = f_5(T)$
6	$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$K_6 = \frac{(P_O)^2}{P_{O_2}} = f_6(T)$
7	$N_2 \rightleftharpoons 2N$	$K_7 = \frac{(P_N)^2}{P_{N_2}} = f_7(T)$

Иногда вводятся более универсальные константы, которые образуются из основных.

Итак, число уравнений термодинамического расчета равно числу неизвестных, т.е. равно 13.

5) Методы выполнения термогазодинамического расчета.

Все методы можно условно разделить на две группы:

- 1) универсальные,
- 2) неуниверсальные.

Для универсальных методов можно использовать многокомпонентные и многоэлементные топлива, можно учитывать конденсированную фазу, исходные данные задаются практически произвольно, т.е. ограничений почти не существует. Это означает, что расчет можно провести только с помощью ЭВМ. Однако, в основе универсальных методов заложены перечисленная выше система уравнений. Наиболее распространенный универсальный метод – метод Трусова Б.Г. – программный комплекс «ASTRA.4».

Неуниверсальные методы применяются, если число неизвестных невелико и их проведение допустимо «вручную». Например:

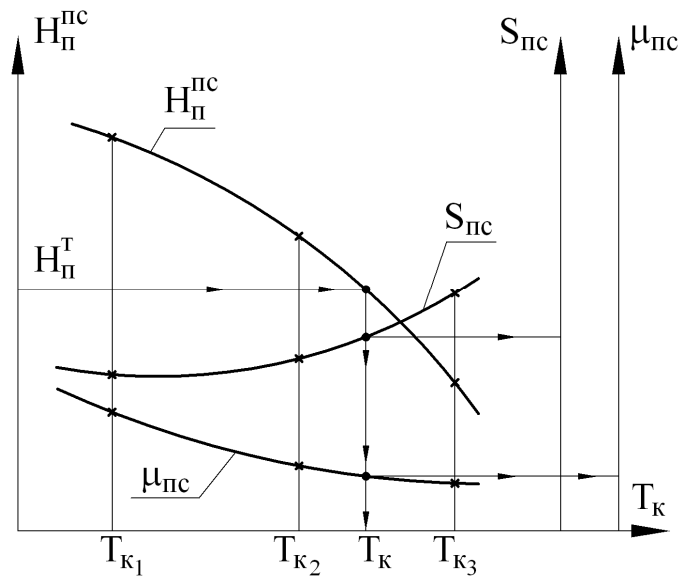
метод «3-х точек» (метод последовательных приближений)

Этот метод базируется на законе сохранения энергии в 2-х видах:

1) Для КС $\longrightarrow H_n^{ПС} = H_n^T$,

2) Для среза сопла $\longrightarrow S_a = S_k$, т.к. $S = const$.

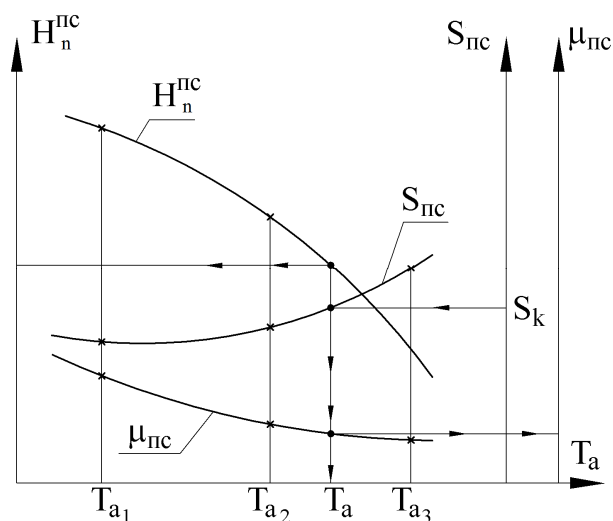
а) для КС $H_n^{nc} = H_n^T$ (см. рисунок).



Последовательность расчета:

- 1) Задается величина ожидаемой температуры в КС $T_k^{ожд}$ (из опыта).
- 2) Задается диапазон T_k так, чтобы $T_k^{ожд}$ находилась в этом диапазоне. Диапазон может включать несколько конкретных T_k (3 или более).
- 3) Задается число газов в продуктах сгорания (3...5).
- 4) По справочнику определяются константы равновесия $K_p = f(T)$.
- 5) По справочнику определяются величины $H_n^{nc}, S_{nc}, \mu_{nc}$.
- 6) Строятся графики $H_n^{nc}, S_{nc}, \mu_{nc} = f(T_k)$ (см. рисунок).
- 7) По равенству $H_n^T = H_n^{nc}$ определяются S_{nc}, μ_{nc}, T_k (см. рисунок).
- 8) Определяется газовая постоянная в КС $R_{nc} = \frac{R_o}{\mu_{nc}}$.

б) для среза сопла $S_a = S_k$ (см. рисунок):



Последовательность расчета:

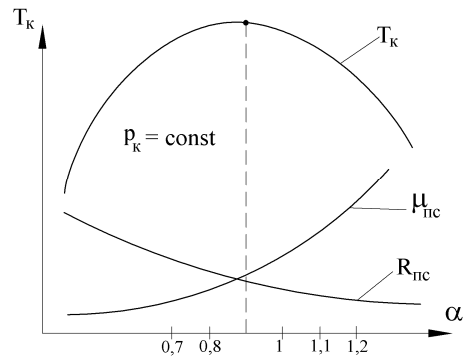
- 1) Принимается равенство констант равновесия $K_p^a = K_p^k$, т.к. процесс в сопле равновесный.
- 2) Определяется T_a для 3-х заданных ранее точек T_k ($T_{a1} = \tau_{a1} \cdot T_{k1}$ и т.п., где τ_a – ГДФ).
- 3) По справочнику определяются $H_n, S_{nc}, \mu_{nc} = f(T_a)$ для всех T_a .
- 4) Строятся графики $H_n^{pc}, S_{nc}, \mu_{nc} = f(T_a)$ по 3-м точкам (см. рисунок).
- 5) По равенству $S_a = S_k$ определяются искомые значения H_n^{pc}, μ_{nc}, T_a (см. рисунок).
- 6) Определяется газовая постоянная $R_{nc} = \frac{R_o}{\mu_{nc}}$.

Т.к. в сопле идут практически только реакции рекомбинации, то для среза сопла из числа газов в продуктах сгорания можно исключить $H, O, N, OH, NO, O_2, N_2$.

б) Анализ результатов термогазодинамического расчета.

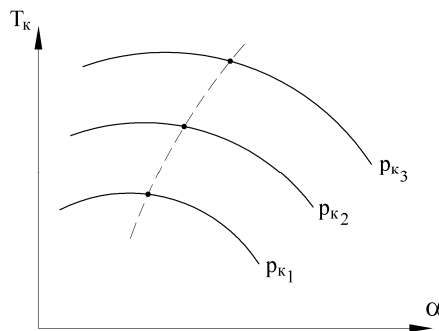
Это анализ зависимостей термодинамических характеристик от основных переменных факторов (параметров), которыми являются p_k и α . Наиболее важными характеристиками камеры сгорания являются I_{yn} и β . В свою очередь, I_{yn} и β зависят и от других параметров, например T_k, R, n , которые так же зависят от p_k и α .

- 1) T_k имеет максимальное значение, которое определяется только термодинамическим расчетом, однако это не означает оптимальность режима, поскольку $W_a \sim \sqrt{R_k T_k}$. Видно, что увеличение скорости истечения, а, значит, удельного импульса возможно лишь при увеличении комплекса $R_k T_k$.



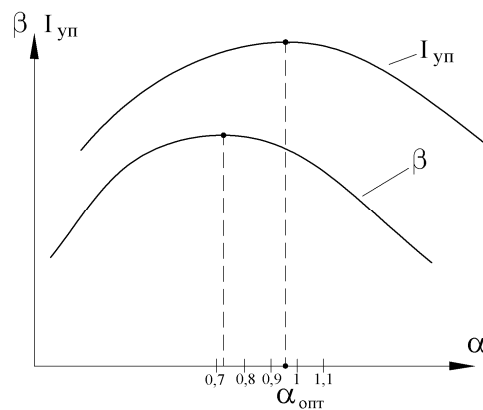
2) С увеличением $\alpha \rightarrow R$ падает из-за увеличения массы молекул продуктов сгорания ($R = \frac{R_0}{\mu}$). Величина T_k имеет максимум, который не совпадает по α с максимумом I_{yn} .

3) С увеличением p_k максимум T_k смещается вверх и вправо по α , т.к. p_k подавляет реакции диссоциации и при $p_k = \infty \rightarrow T_k = T_k^{\max}$.

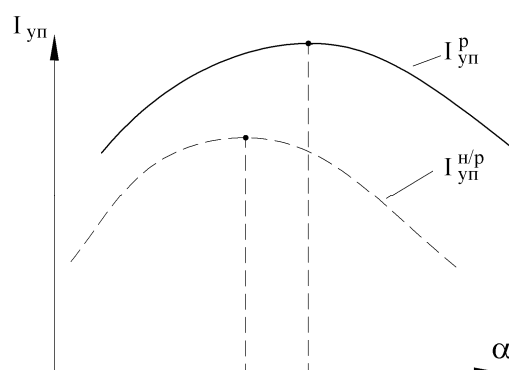


$$p_{k3} > p_{k2} > p_{k1}$$

4) Удельный импульс и расходный комплекс имеют максимум, который не совпадает по α между собой. При $\alpha_{opt} \rightarrow I_{yn} = I_{yn}^{\max}$.

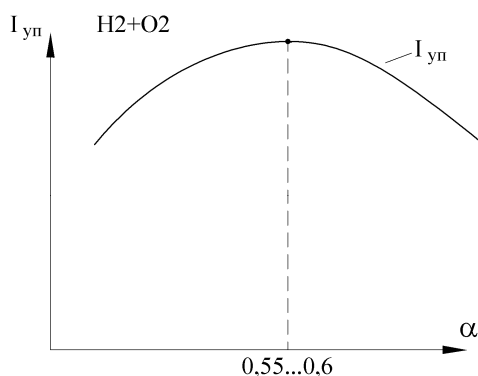


Расчет с помощью модели равновесного течения предпочтительнее по $I_{уп}$, т.к. в неравновесном течении (процессе) не учитываются реакции рекомбинации в сопле, идущие с выделением тепла



«P» – равновесный процесс, «H/P» – неравновесный процесс.

Особенностью расчета для $H_2 + O_2$ является то, что для этого топлива $\alpha_{opt} \approx 0.55...0.60$. Однако на практике закладывается $\alpha_{opt} \geq 0.60$ (≈ 0.65). Это объясняется тем, что $\rho_{H_2}^* \approx 70 \frac{кг}{м^3}$, $\rho_{O_2}^* \approx 1100 \frac{кг}{м^3}$, $\rho_{O_2} \gg \rho_{H_2}$ и бак водорода становится чрезвычайно большим и тяжелым.



Раздел 3. Характеристики неидеальной камеры.

1. Внутренние потери энергии в камере двигателя.

Процесс горения топлива в камере сгорания и ускорение продуктов сгорания в сопле сопровождаются потерями энергии, а, значит, и потерями удельного импульса. Компенсация этих потерь, при заданной величине тяги может компенсироваться только одним способом – увеличением расхода топлива над его «теоретическим» (расчетным) значением. В свою очередь, увеличение расхода требует увеличения проходной площади сопла по его длине, в т.ч. площади минимального и выходного сечений. При проектировании проточной части сопла в первую очередь определяют три параметра: $\dot{m}, F_{кр}, F_a$.

При заданных P_n, p_k, p_a в реальной камере будет:

$$T_{кд} < T_{кт}, F_{крд} > F_{крт}, F_{ад} > F_{ат}, \dot{m}_d > \dot{m}_t. \text{ Здесь:}$$

«д» - действительное, «т» - теоретическое (расчетное) значения.

Различие действительных и теоретических параметров объясняется наличием потерь энергии в реальной камере. Потери энергии в камере определяются в виде потерь удельного импульса в пустоте через коэффициент удельного импульса $\varphi_I = \frac{I_{упд}}{I_{упт}}$.

Диапазон $\varphi_I = 0,94...0,97$. С другой стороны, $\varphi_I = \varphi_k \cdot \varphi_c$, где

φ_k - коэффициент камеры сгорания (см.ниже),

φ_c - коэффициент сопла (см.ниже).

Коэффициент φ_I определяется расчетно-экспериментальным способом:

$$I_{упд} = \frac{P_{пд}}{\dot{m}_d}, \dot{m}_d - \text{из эксперимента}, \quad I_{упт} = \frac{P_{пт}}{\dot{m}_t}, \dot{m}_t - \text{из расчета}.$$

Следует учитывать, что $P_{пд} = P_{пт}$, где $P_{пд} = P_d + p_n F_a$.

В первом приближении можно допустить, что $\varphi_I \approx \frac{I_{y\partial}}{I_{yt}}$, т.к.

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}} = I_{yn} - \frac{P_n F_a}{\dot{m}}, \text{ а величина } \frac{P_n F_a}{\dot{m}} \ll I_{yn}.$$

2. Внутренние потери энергии в камере сгорания.

Причины потерь в камере сгорания:

1. Неоднородные распыливание, смешение и соотношение компонентов по поперечному сечению камеры сгорания;
2. Неполное сгорание топлива;
3. Наличие охлаждения (в первую очередь – внутреннего);
4. Высокочастотные и низкочастотные колебания при горении;
5. Другие причины.

Эти потери при заданном p_k приводят к снижению T_k . Они оцениваются через коэффициент камеры сгорания φ_k :

$$\varphi_k = \frac{C_{\partial}^*}{C_T^*}, \text{ где } C^* - \text{ характеристическая скорость, м/с. При этом:}$$

$$C_{\partial}^* = \frac{p_{kp}^o \cdot F_{kp} \cdot \mu_c}{\dot{m}_{\partial}}; \quad C_T^* = \frac{p_{kp}^o \cdot F_{kp}}{\dot{m}_T}, \text{ где}$$

p_{kp}^o - полное давление в критическом сечении,

μ_c - коэффициент расхода сопла, $\mu_c = \frac{\dot{m}_T}{\dot{m}_{\partial}}$.

Диапазоны изменения φ_k и μ_c : $\varphi_k = 0,96...0,99$, $\mu_c = 0,98...0,99$.

3. Связь между C^* и β , φ_κ и φ_β .

Можно выразить $p_{кр}^o = \sigma \cdot p_\kappa$, где $\sigma < 1$ – коэффициент потерь полного давления в дозвуковой части камеры. Эти потери вызваны «тепловым сопротивлением», которое связано с растянутостью процесса горения по длине, неоднородностью и др. Диапазон изменения σ равен 0,99...0,995.

$$\text{И тогда } C_o^* = \frac{p_{кр}^o \cdot F_{кр} \cdot \mu_c}{\dot{m}_o} = \frac{\sigma \cdot p_\kappa \cdot F_{кр} \cdot \mu_c}{\dot{m}_o} = \sigma \cdot \beta_o \cdot \mu_c.$$

$$\text{Для «теоретической» камеры } p_{кр}^o = p_\kappa, \quad \sigma = 1, \quad \mu_c = 1, \quad \beta_T = \frac{p_\kappa F_{кр}}{\dot{m}_T}, \quad C_T^* = \beta_T.$$

$$\text{Отсюда } \varphi_\kappa = \frac{C_o^*}{C_T^*} = \frac{\beta_o \cdot \sigma \cdot \mu_c}{\beta_T}, \text{ где } \beta_o = \frac{p_\kappa \cdot F_{кр}}{\dot{m}_o}, \quad \beta_o < \beta_T.$$

$$\text{Обозначим } \varphi_\beta = \frac{\beta_o}{\beta_T} - \text{коэффициент расходного комплекса. Отсюда } \varphi_\kappa = \varphi_\beta \cdot \sigma \cdot \mu_c.$$

Величина β_o определяется из эксперимента, а величина β_T - из расчета.

Величину φ_κ определить практически невозможно ни в расчете, ни в эксперименте (из-за неопределенности $p_{кр}^o$), поэтому на практике используется величина φ_β . При этом, если камера сгорания изобарическая, то можно принять $\sigma = 1$, а если камера двигателя достаточно крупногабаритная, то можно принять $\mu_c = 1$. И тогда $\varphi_\kappa = \varphi_\beta$.

4. Внутренние потери энергии в сопле.

Причины потери энергии в сопле:

1. Трение газа о стенку сопла (потери учитываются через коэффициент $\varphi_{тр}$);
2. Неоднородность потока на срезе сопла (через коэффициент φ_α);
3. Недовыделение тепла из-за химической неравновесности (через коэффициент φ_Q);
4. Наличие конденсированной фазы (через коэффициент φ_s);

5. Другие причины(через коэффициент φ_i).

Полные потери энергии в сопле учитываются через коэффициент сопла φ_c . По определению: $\varphi_c = \varphi_{тр} \cdot \varphi_\alpha \cdot \varphi_Q \cdot \varphi_s \cdot \varphi_1$.

$\varphi_c = \frac{K_{ТП_\partial}}{K_{ТП_T}}$. Диапазон значений $\varphi_c = 0,95 \div 0,99$, где

$K_{ТП} = \frac{P_\Pi}{p_K F_{KP}}$ коэффициент тяги в пустоте,

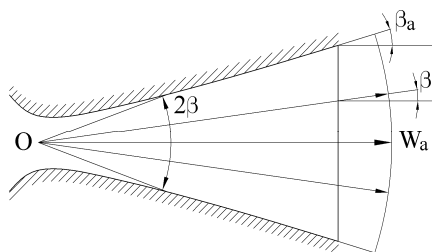
P_Π - тяга камеры в пустоте, $p_K F_{KP}$ - основная составляющая тяги.

Основными потерями являются потери на трение и неоднородность потока на срезе сопла.

В РДТТ это также потери на двухфазность (наличие К-фазы). Для ЖРД φ_c можно представить как $\varphi_c = \varphi_{тр} \cdot \varphi_\alpha$.

а) Внутренние потери на неоднородность (всередину) потока на срезе сопла.

Рассмотрим на примере конического сопла (см. рисунок).



Здесь точка О – фокус, 2β - угол раствора сопла.

По определению вектор тяги будет равен $\vec{P} = m\vec{W}_a + (\overline{p_a - p_n}) F_a$.

«Теоретически» $\vec{W}_a \parallel \vec{X}$, однако это справедливо только на оси сопла. На произвольной линии тока $W_{ai} = W_a \cdot \cos \beta_i$. Диапазон изменения β_a на практике: $\beta_{a_{кон}} = 10 \div 12^\circ$.

Для конического сопла можно точно определить коэффициент φ_α , учитывая потери на неоднородность потока на срезе как

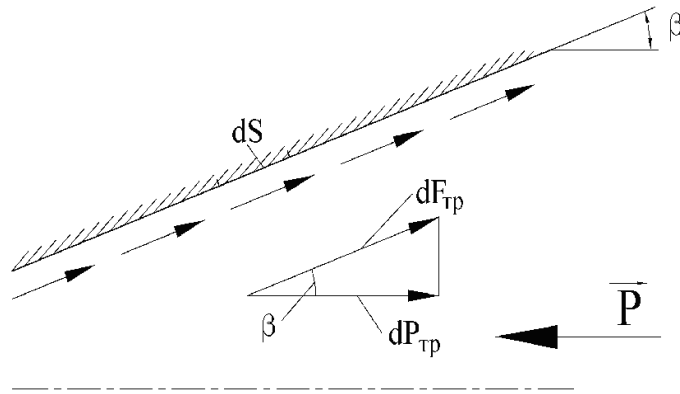
$$\varphi_{\alpha} = \frac{1 + \cos \beta_a}{\lambda}.$$

Диапазон изменения величины φ_{α} при этом будет: $\varphi_{\alpha} = 0,98 \div 0,99$.

Для профилированных сопел можно приближенно использовать эту же формулу при угле на срезе сопла $\beta_{a_{проф}} = 6 \div 10^\circ$.

б) Внутренние потери на трение потока о стенку сопла.

Рассмотрим кольцевой участок сверхзвуковой части сопла с бесконечно малой площадью dS . Вязкое трение газа о стенку создает силу трения dF_{TP} , действующую вдоль стенки, и как результат – осевую силу трения dP_{TP} , направленную против тяги.



$$dF_{TP} = C_f \cdot \frac{\rho W^2}{2} dS_{TP}, \quad dP_{TP} = dF_{TP} \cdot \cos \beta, \text{ где}$$

где C_f - коэффициент трения,

ρ, W - плотность и скорость в районе dS ,

β - угол наклона стенки к оси сопла.

$$C_f = C_{fo} \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-0.55},$$

где C_{fo} - коэффициент трения для несжимаемой жидкости,

r - коэффициент восстановления температуры, $r = \sqrt[3]{P_r}$,

M – число Маха в районе dS

Для курсового проекта принимаем $r = 0,89$. В общем случае величина $C_{fo} = 0,002 \div 0,006$. Для серийных ЖРД: $C_{fo} = 0,003$, для полированных поверхностей: $C_{fo} = 0,002$, для ЖРД малой тяги: $C_{fo} = 0,006$.

На конечном участке сопла потери тяги на трение будут равны $\Delta P_{TP} = \int dP_{TP}$.

И тогда: $P_{TP} = \sum \Delta P_{TP}$ - потери тяги на всем сопле, а коэффициент, учитывающий эти потери φ_{TP} будет определяться как

$$\varphi_{TP} = \frac{P_n - P_{TP}}{P_n}.$$

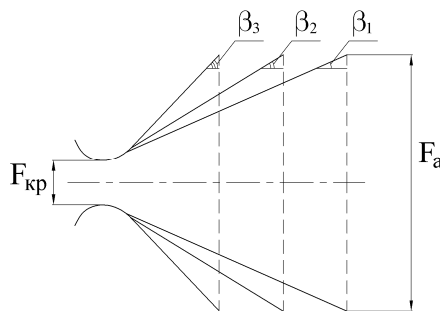
Диапазон величины φ_{TP} обычно равен $\varphi_{TP} = 0,98 \dots 0,99$.

Для определения P_{TP} следует разбить сопло на ряд участков. Чем больше участков, тем точнее расчет. На каждом из участков определяются средние для него параметры ρ , w , M . Потери тяги в дозвуковой части сопла на трение незначительны из-за малых скоростей, поэтому определяем такие потери только в сверхзвуковой части.

5. Оптимизация угла раствора конического сопла.

Рассмотрим, к примеру, три сопла с разными углами раствора. При этом:

$$\beta_1 < \beta_2 < \beta_3, F_{кр} = const, F_a = const \text{ (см. рис.)}.$$



Для идеального сопла и параметры на срезе, и тяга всех сопел будут одинаковы. В реальном сопле из-за различия угла раствора и площади боковой поверхности сопел и потери на трение, и на рассеивание будут различными. Чем меньше угол раствора, тем больше потери на трение (больше площадь трения) и меньше потери на рассеивание (меньше неоднородность на срезе).

Для определения потерь на трение каждого из сопел разобьем сверхзвуковую часть сопла на некоторое одинаковое количество участков (5 – 6).

Порядок определения оптимального угла раствора

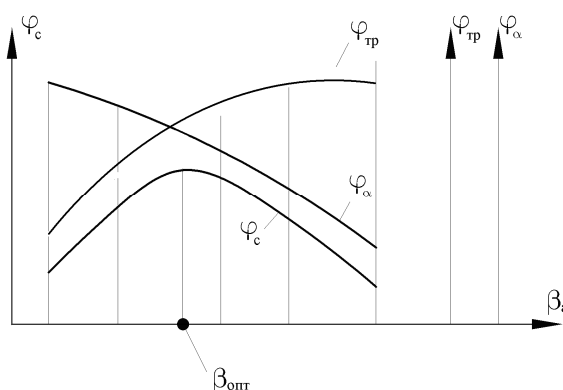
-Определить параметры на концах участков и соответствующие им «средние» параметры ρ , w , M на каждом участке.

-Выполнить расчет площади боковой поверхности участков.

-Определить φ_{TP} и φ_α на каждом участке.

-Отсюда $\varphi_c = \varphi_{TP} \cdot \varphi_\alpha$.

-По полученным данным построить графики $\varphi_c, \varphi_{TP}, \varphi_\alpha$. Одна из полученных кривых падающая, а другая возрастающая, значит произведение $\varphi_{TP} \cdot \varphi_\alpha$ даст максимальное значение φ_c , которое определяет оптимальный угол раствора сопла β_{OPT} .



В курсовом проекте принять диапазон $\beta = 8 \div 12^\circ$ (через 1°). После определения β_{OPT} округлить его значение до целого числа.

6. Определение действительных значений расхода, площадей критического и выходного сечений сопла.

а) расход топлива \dot{m} .

По определению:

$$\dot{m} = \frac{P}{I_y}, \text{ или } \dot{m}_T = \frac{P_n}{I_{yn}}.$$

Отсюда следует, что действительный расход определяется как

$$\dot{m}_\partial = \frac{P_\partial}{I_{y\partial}}, \text{ или } \dot{m}_\partial = \frac{P_{n\partial}}{I_{yn\partial}}.$$

Здесь индекс « ∂ » – действительный. При этом должно выполняться условие:

$$P_\partial = P_T, P_{n\partial} = P_{nT} = P_n, I_{y\partial} = I_{yTT} \cdot \varphi_J = I_{yTT} \cdot \varphi_K \cdot \varphi_C.$$

Здесь индекс «Т» – теоретический (расчетный, без потерь).

Удобнее определять \dot{m}_∂ через параметры в пустоте:

$$\dot{m}_\partial = \frac{P_{n\partial}}{I_{yn\partial}} = \frac{P_n}{I_{ynT} \cdot \varphi_K \cdot \varphi_C} = \frac{\dot{m}_T}{\varphi_K \cdot \varphi_C} \cdot \boxed{\dot{m}_\partial = \frac{\dot{m}_T}{\varphi_K \cdot \varphi_C}}.$$

Вывод: $\dot{m}_\partial > \dot{m}_T$, так как $\varphi_K < 1$ и $\varphi_C < 1$. Разница $(\dot{m}_\partial - \dot{m}_T)$ компенсирует потери тяги реальной камеры для достижения заданной тяги. В этой формуле не следует учитывать коэффициент расхода сопла μ_C , который участвует при определении F_{KP} .

б) площадь критического сечения сопла F_{KP} .

Известно, что равенство $\dot{m}\beta = p_K \cdot F_{KP}$ справедливо и для идеальной и для реальной камеры. Отсюда $F_{KP} = \frac{m\beta}{p_K}$.

$$\text{В реальной камере } F_{KP\partial} = \frac{\dot{m}_\partial \cdot \beta_\partial}{p_K}(1),$$

$$\text{где } \dot{m}_\partial = \frac{\dot{m}_T}{\varphi_K \cdot \varphi_C}, \beta_\partial = \varphi_\beta \cdot \beta_T; \varphi_\beta = \frac{\varphi_K}{\sigma \cdot \mu_C}; \beta_T = \frac{p_K \cdot F_{KPT}}{\dot{m}_T}, p_{\kappa\partial} = p_{\kappa T} = p_\kappa.$$

$$\text{Подставим в (1): } F_{KP\partial} = \frac{\dot{m}_T}{\varphi_K \cdot \varphi_C} \cdot \frac{\varphi_K}{\sigma \cdot \mu_C} \cdot \frac{p_K \cdot F_{KPT}}{\dot{m}_T} \cdot \frac{1}{p_K} = \frac{F_{KPT}}{\sigma \cdot \mu_C \cdot \varphi_C}.$$

$$\boxed{F_{KP\partial} = \frac{F_{KPT}}{\varphi_C \cdot \mu_C \cdot \sigma}} \quad \text{Вывод: } F_{KP\partial} > F_{KPT}, \text{ так как } \varphi_C < 1, \sigma < 1 \text{ и } \mu_C < 1.$$

Величина $F_{KP\partial}$ не зависит от φ_K . Коэффициент φ_K характеризует потери полного давления и температуры из-за несовершенства процессов в КС. Поэтому для компенсации этих потерь требуется:

- 1) с одной стороны, увеличение F_{KP} для пропускания большего расхода $\dot{m}_\partial = \frac{\dot{m}_T}{\varphi_K \cdot \varphi_C}$.
- 2) с другой стороны, для поднятия p_K (из-за этого увеличения F_{KP}) до заданного значения требуется такое же уменьшение F_{KP} .

Для крупногабаритных камер, у которых толщина пограничного слоя несопоставимо мала с геометрическими размерами, можно принять $\mu_c = 1$. Для изобарических КС ($p_K = const$, $F_K \geq 3 \dots 5 F_{KP}$) можно принять $\sigma = 1$.

И тогда
$$F_{KP\partial} = \frac{F_{KPT}}{\varphi_C}.$$

в) площадь среза сопла F_a .

Известно, что $\frac{F_a}{F_{KP}} = f\left(n, \frac{p_a}{p_K}\right)$ - однозначно (см. выше),

$$p_{a\partial} = p_{aT}, p_{K\partial} = p_{KT}. \text{ Отсюда } \left(\frac{p_a}{p_K}\right)_\partial = \left(\frac{p_a}{p_K}\right)_T.$$

Если допустить, что $n_\partial = n_T$ (что близко к действительности), то

$$\left(\frac{F_a}{F_{KP}}\right)_\partial = \left(\frac{F_a}{F_{KP}}\right)_T.$$

Вывод:
$$F_{a\partial} = \frac{F_{aT}}{\varphi_C}. F_{a\partial} > F_{aT} \text{ т.к. } \varphi_C < 1.$$

Зная величины $F_{KP\partial}$ и $F_{a\partial}$, можно спроектировать весь контур сверхзвуковой части сопла.