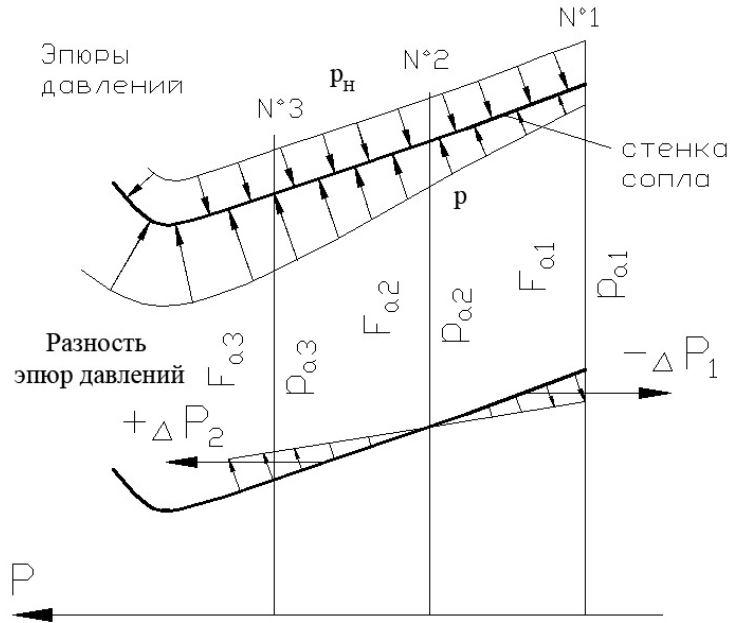


б) Нерасчетные режимы работы сопла. Влияние нерасчётности на тягу.

Рассмотрим три сопла, два из которых образуются путём последовательного укорочения сопла номер один. При этом (см.рисунок):



$$F_{a1} > F_{a2} > F_{a3}, \quad p_{a1} < p_{a2} < p_{a3}.$$

Все режимы работы сопла кроме расчётного называются нерасчётными.

Как и на расчётном режиме:

$$k, R, T_k, p_k, F_{kp}, p_n = \text{const}, \quad F_a, p_a = \text{var}.$$

Пусть $p_{\bar{e}}$ такое, чтобы $p_{a2} = p_n$. И тогда:

сопло №1 - $F_{a1} > F_{a2}, p_{a1} < p_{a2}$ - перерасширение газа на срезе сопла,

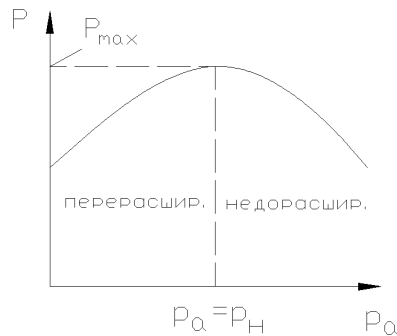
сопло №2 - $F_{a2}, p_{a2} = p_n$ - расчетный режим работы сопла,

сопло №3 - $F_{a3} < F_{a2}, p_{a3} > p_{a2}$ - недорасширение газа на срезе сопла.

Анализ:

1) сопло №1 создаёт меньшую тягу, чем сопло №2 ($P_1 < P_2$), т.к. на участке “2-1” $p_{\text{внутр}} < p_n$ и проекция сил внутреннего и наружного давлений (ΔP_1) на ось противоположна направлению тяги. Таким образом, у перерасширенного сопла №1 есть отрицательная составляющая ($-\Delta P_1$). $P_1 = P_2 - \Delta P_1$ или $\Delta P_1 = P_2 - P_1$.

2) сопло №3 создаёт меньшую тягу, чем сопло №2 ($P_3 < P_2$), т.к. на участке “3-2” $p_{внутр} > p_n$ и проекция сил внутреннего и наружного давления (ΔP_3) совпадает с направлением тяги. Таким образом, у недорасширенного сопла №3 будет недобор тяги ΔP_3 по сравнению с соплом №2. $P_3 = P_2 - \Delta P_3$ или $\Delta P_3 = P_2 - P_3$.



При прочих равных условиях максимальное значение тяги P_{max} реализуется на расчётном режиме работы сопла и тогда:

$$P = \dot{m} \cdot w_a + (p_a - p_n) \cdot F_a = \dot{m} \cdot w_a, \text{ где } w_a = w_{a \text{ расч.}}$$

$$P_{\text{расч}} = \dot{m} \cdot w_{a \text{ расч}} \text{ (см. рисунок выше).}$$

5. Составляющие тяги в пустоте и места их приложения. Коэффициент тяги в пустоте и его составляющие.

а) составляющие тяги в пустоте.

При анализе путей повышения эффективности работы камеры, анализе работы отдельных её частей, при расчёте на прочность и т. п. требуются данные о долях величины тяги, снимаемых с отдельных её частей.

В общем случае:

$$P = P_{вн} - P_{нар} = P_{вн} - p_n \cdot F_a, \quad P_{вн} = \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a. \text{ Если } p_i = 0, \text{ то } P = P_{вн}.$$

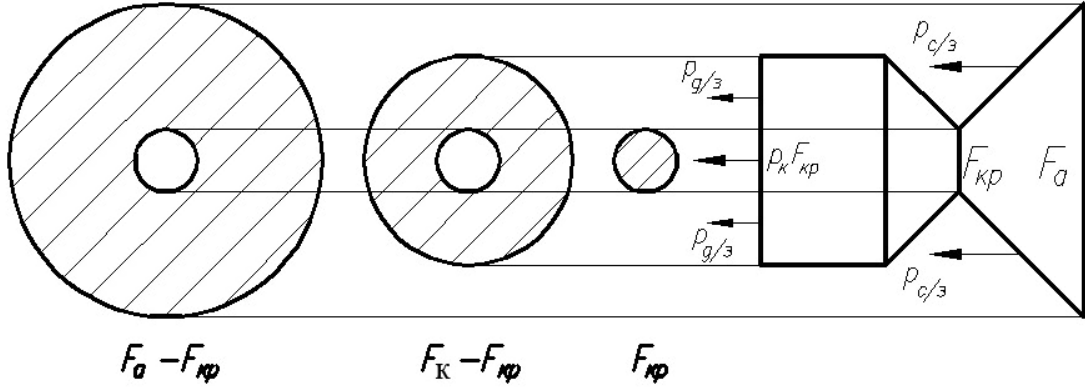
При работе в пустоте тягу называют пустотной (P_i). Очевидно, что при безотрывном течении в сопле величина $P_{вн}$ совпадает с P_n , т.е. $P_{вн} = P_n$. $P_{вн}$ более широкое понятие, чем P_n , т. к. она «существует» и при отрыве газа от стенок сопла, т.е. P_n есть частный случай $P_{вн}$.

Для анализа составляющих тяги можно использовать любой из видов уравнения тяги, но здесь удобнее выражение:

$$P = 2 \cdot p_k \cdot F_{кр} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a - p_n \cdot F_a, \text{ где } p_k \cdot F_{кр} - \text{сила, имеющая размерность.}$$

Так как при $p_n = const \rightarrow p_n \cdot F_a = const$, то для удобства анализа используем лишь тягу в пустоте в виде $P_n = 2 \cdot p_k \cdot F_{кр} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a = P_{вн}$.

Величину $p_k \cdot F_{кр}$ принято называть основной составляющей тяги, хотя она не обязательно больше суммы остальных составляющих. Далее см. рисунок.



$p_k \cdot F_{кр}$ - составляющая P_n , приложенная к центральному кругу на днище камеры сгорания с площадью $F_{кр}$. Сила $p_k \cdot F_{кр}$ является критерием при сравнительных оценках.

Пусть $P_n = p_k \cdot F_{кр} + P_{д/з} + P_{с/з}$.

$P_{д/з}$ - доля пустотной тяги, снимаемая с периферийной дозвуковой части камеры. Она приложена к кольцу днища с площадью $(F_k - F_{кр})$. В свою очередь:

$$P_{д/з} = \Delta P_{днища} - \Delta P_{сужающ},$$

$$\Delta P_{днища} = p_k \cdot (F_k - F_{кр}) - \text{положительная составляющая } P_{д/з},$$

$\Delta P_{сужающ} = -\bar{p}_{сужающ} \cdot (F_k - F_{кр})$, где $\bar{p}_{сужающ}$ - среднее давление в сужающейся части сопла. $\Delta P_{сужающ}$ - отрицательная составляющая $P_{д/з}$. Очевидно, что $p_{кр} \leq p_{суж} \leq p_k$, поэтому $\Delta P_{днища} > \Delta P_{сужающ}$.

$$\text{Таким образом } P_{д/з} = (p_k - \bar{p}_{сужающ}) \cdot (F_k - F_{кр}).$$

$P_{с/з}$ - это положительная доля P_n , создаваемая с/з частью сопла и приложена к площади $(F_a - F_{кр})$.

б) коэффициент тяги в пустоте $K_{ТП}$.

В некоторых расчётах удобнее пользоваться не абсолютным значением тяги в пустоте, а относительным, в виде $K_{ТП}$.

$$K_{ТП} = \frac{P_n}{p_\kappa \cdot F_{кр}} - \text{коэффициент тяги в пустоте, относительная безразмерная тяга.}$$

$$\text{Если } P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{кр} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a = P_{вн},$$

$$\text{то } K_{ТП} = \frac{2 \cdot p_\kappa \cdot F_{кр} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a}{p_\kappa \cdot F_{кр}} = 2 \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a.$$

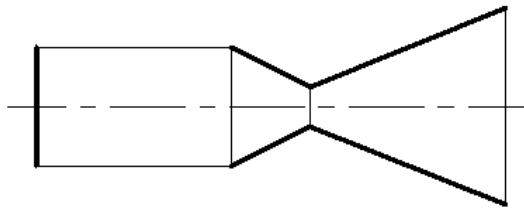
В общем виде:

$$P_n = p_\kappa \cdot F_{кр} + P_{\partial/з} + P_{с/з},$$

$$K_{ТП} = 1 + \frac{P_{\partial/з}}{p_\kappa \cdot F_{кр}} + \frac{P_{с/з}}{p_\kappa \cdot F_{кр}} = 1 + K_{ТП}^{\partial/з} + K_{ТП}^{с/з}.$$

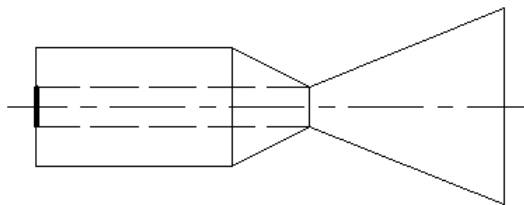
Рассмотрим некоторые конкретные составляющие $K_{ТП}$. На рисунке жирными линиями показаны «места» приложения составляющих P_n :

1) P_n – полная:



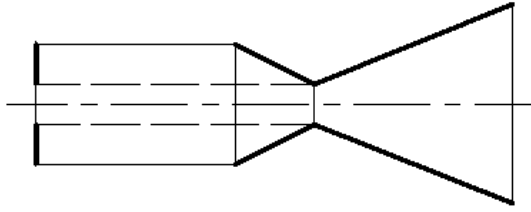
$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{кр} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a, \quad K_{ТП} = 2 \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a.$$

2) P_n – основная составляющая:



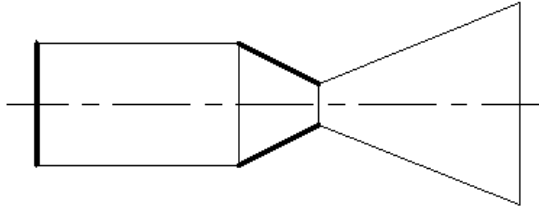
$$P_n = p_\kappa \cdot F_{кр}, \quad K_{ТП} = 1.$$

3) P_n , создаваемая с помощью сопла:



$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a - p_\kappa \cdot F_{\kappa p}, \quad K_{\text{ТП}} = 2 \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a - 1.$$

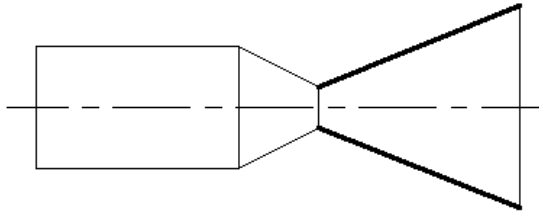
4) P_n , создаваемая дозвуковой частью камеры:



$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) \cdot z(1), \quad z(1) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{1}\right) = 1.$$

$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1), \quad K_{\text{ТП}} = 2 \cdot \varepsilon(1).$$

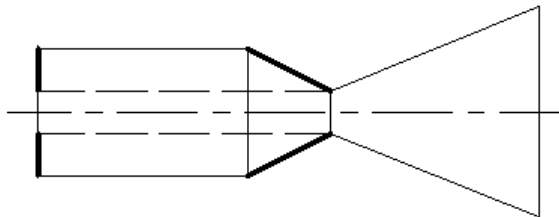
5) P_n , создаваемая сверхзвуковой частью сопла:



$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) \cdot z_a - 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) \cdot (z_a - 1),$$

$$K_{\text{ТП}} = 2 \cdot \varepsilon(1) \cdot (z_a - 1).$$

6) P_n , создаваемая периферийной дозвуковой частью камеры:



$$P_n = 2 \cdot p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot \varepsilon(1) - p_\kappa \cdot F_{\kappa p} = p_\kappa \cdot F_{\kappa p} \cdot [2 \cdot \varepsilon(1) - 1], \quad K_{\text{ТП}} = [2 \cdot \varepsilon(1) - 1].$$

Абсолютное значение доли $K_{ТП}$:

$$1) p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p} \rightarrow K_{ТП} = 1,$$

$$2) P_{n\partial/3} \rightarrow K_{ТП}^{\partial/3} = 0,2 \div 0,3,$$

$$3) P_{nc/3} \rightarrow K_{ТП}^{c/3} = 0,3 \div 0,6,$$

$$4) P_{n\text{сопла}} = P_{\partial/3} + P_{c/3} \rightarrow K_{ТП}^{\text{сопла}} = 0,5 \div 1,0.$$

Таким образом $K_{ТП} = 1,5 \div 2,0$ (или чуть больше).

Видно, что доля сопла (дозвуковой и сверхзвуковой части) может быть соизмерима с основной составляющей тяги $(p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p})$. Чем больше F_a , тем эта доля больше (при $p_H = 0$).

Коэффициент тяги камеры K_T

$$P = P_n - p_n F_a \rightarrow K_T = \frac{P_n}{p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}} - \frac{p_n F_a}{p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}} = K_{ТП} - \frac{p_n F_a}{p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}};$$

$$K_{ТП} = \text{const} \neq f(p_n); K_T = \text{var} = f(p_n).$$

В учебниках имеются конкретные формулы для $K_T = f(p_n)$.

6. Удельный импульс тяги камеры двигателя.

Если тяга P , то $I_y = \frac{P}{\dot{m}}$, где I_y - удельный импульс тяги – отношение тяги камеры

к её секундному расходу газа. Он является основным и универсальным параметром камеры, который характеризует эффективность и(или) экономичность работы камеры.

Удельный импульс зависит от параметров газа в камере сгорания $(k, R, T_{\kappa}, p_{\kappa})$ и от

степени его расширения в сопле $\left(\frac{F_a}{F_{\kappa p}} \text{ или } \frac{p_{\kappa}}{p_a} \right)$.

1) Зависимость I_y от параметров.

Если $P = \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a - p_n \cdot F_a$, то

$$I_y = w_a + \frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}.$$

Величина I_y определяется, в основном, величиной w_a , так как две другие его составляющие сравнительно малы и, к тому же имеют противоположные знаки.

$$w_a = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_\kappa \cdot \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_\kappa} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \neq f(p_\kappa), \text{ т.к. } p_a = \pi_a \cdot p_\kappa,$$

$$\frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} \neq f(p_\kappa), \text{ т.к. } p_a \sim p_\kappa, \quad \dot{m} = \frac{p_\kappa \cdot F_{кр}}{\beta} \sim p_\kappa.$$

$$\frac{p_H \cdot F_a}{\dot{m}} = f(p_\kappa), \text{ т.к. } \dot{m} = f(p_\kappa). \text{ Чем больше } p_\kappa \text{ тем меньше } \frac{p_H \cdot F_a}{\dot{m}}.$$

$$w_a = f\left(\frac{p_a}{p_\kappa}\right). \text{ Чем больше } \left(\frac{p_\kappa}{p_a}\right), \text{ тем больше } w_a, \text{ тем больше } I_y.$$

$$w_a = f(R, T_\kappa). \text{ Чем они больше, тем больше } w_a, \text{ тем больше } I_y.$$

Удельный импульс растёт при увеличении $R, T_\kappa, \frac{p_\kappa}{p_a}, \frac{F_a}{F_{кр}}$ и при увеличении p_κ за

счет уменьшения отрицательного значения $\frac{p_H \cdot F_a}{\dot{m}} \dots$

Таким образом, для более высокого значения I_y желательно использовать малоатомный газ (с большей R), с большими значениями p_κ, T_κ и большую степень расширения сопла $\frac{F_a}{F_{кр}}$.

2) Внутренний и пустотный удельный импульс.

$$P = P_n - p_n \cdot F_a; \text{ или } P = P_{вн} - p_n \cdot F_a. \text{ При } p_n = 0 \rightarrow P_{вн} = P_n.$$

$$P_{вн} = \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a, \quad I_{y\text{вн}} = w_a + \frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} = I_{yn}.$$

$$\text{Т.к. } w_a \neq f(p_\kappa), \quad \frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} \neq f(p_\kappa), \rightarrow I_{y\text{вн}} = I_{yn} \neq f(p_\kappa) = \text{const.}$$

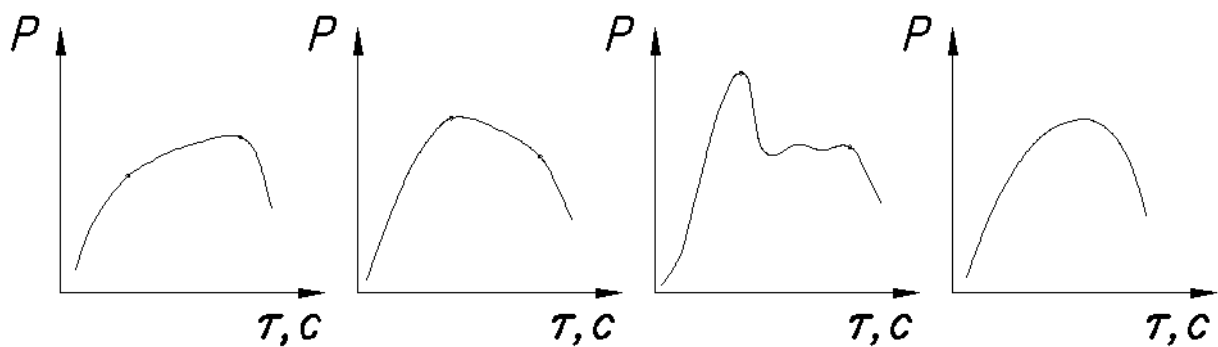
3) Удельный импульс на расчётном режиме работы сопла ($p_a = p_n$).

$$P = \dot{m} \cdot w_a + (p_a - p_n) \cdot F_a = \dot{m} \cdot w_a,$$

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}} = w_a, \quad I_{y\text{расч}} = w_{a\text{расч}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_\kappa \cdot \left[1 - \left(\frac{p_H}{p_\kappa} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}.$$

4) Удельный импульс для РДТТ.

В отличие от ЖРД тяга РДТТ во времени может заметно изменяться по величине. Например:



Введём понятие - полный импульс тяги I_{Σ} .

$$I_{\Sigma} = \int P d\tau \cong P \cdot \tau, \quad \text{И тогда} \quad I_y = \frac{I_{\Sigma}}{M} \cong \frac{\int_0^{\tau} P \cdot \tau}{\int_0^{\tau} \dot{m} \cdot \tau} - \text{это средний по времени}$$

удельный импульс РДТТ, где M – масса заряда, τ – время работы РДТТ. Если $P = const$, то

$$I_y = \frac{P}{\dot{m}}, \text{ как и для ЖРД.}$$

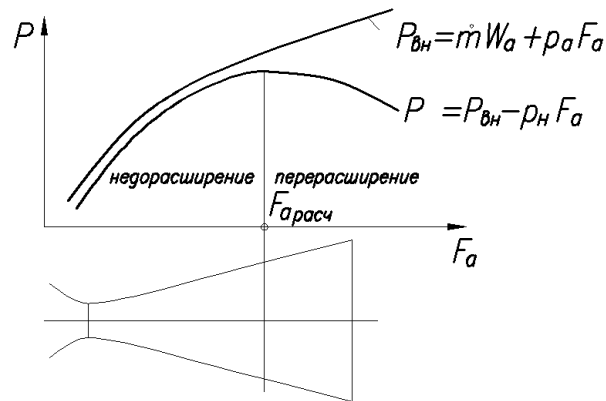
5) Размерность удельного импульса.

$$I_y \left[\frac{M}{с} \right], \text{ т.к. } P \rightarrow H = \frac{\kappa \mathcal{E} \cdot M}{c^2}; \dot{m} \rightarrow \frac{\kappa \mathcal{E}}{c}, \text{ то } I_y = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{\kappa \mathcal{E} \cdot M}{c^2} \cdot \frac{c}{\kappa \mathcal{E}} = \frac{M}{с}, \text{ т.е. } I_y \text{ имеет}$$

размерность скорости. Это очевидно и из уравнения I_y .

7. Влияние степени расширения сопла на тягу. Сопловые насадки.

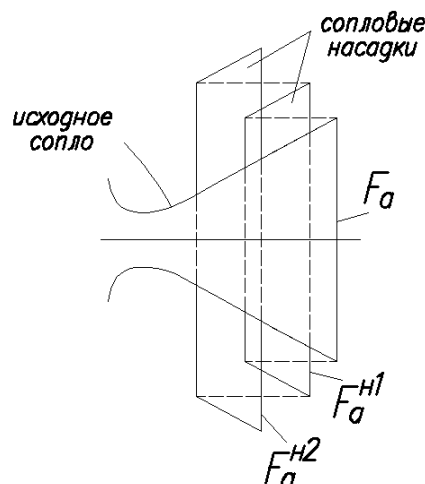
При анализах и оптимизации сопла вместо изменения параметра p_a можно использовать изменение площади среза сопла F_a , что адекватно. Качественная зависимость $P = f(F_a)$ показана на рисунке.



Анализ:

- 1) зависимость $P = f(F_a)$, как и $P = f(p_a)$ имеет максимум, который соответствует расчётному режиму работы сопла ($p_a = p_{a\text{расч}} = p_n$, или $F_a = F_{a\text{расч}}$).
- 2) кривая $P = f(F_a)$ несимметрична относительно максимума. Левая ветвь обычно более крутая, чем правая. Это означает, что потеря тяги при недорасширении больше, чем при перерасширении, т.е. выгоднее работать на режимах перерасширения.
- 3) величина $P_{вн}$ монотонно увеличивается с ростом F_a , т.к. в идеальной камере отсутствуют всякие потери энергии на (трение и т. д.).

Рассмотрим использование сопловых насадок для увеличения тяги (см.рисунок).



Здесь индекс «н» означает «насадок». При этом: $F_a < F_a^{n1} < F_a^{n2}$.

Поскольку $P_{вн}$ растёт с увеличением F_a , то при подъёме ракеты (с уменьшением p_n) расчётный режим сдвигается в сторону меньшего значения p_a и было бы желательно увеличить F_a . Увеличения F_a можно достичь с помощью сопловых насадков. Они служат для увеличения суммарного импульса тяги ($I_\Sigma = P \cdot \tau$) на режимах значительного недорасширения газа в исходном сопле при уменьшении p_n . Например, при вертикальном полёте одной ступени от Земли до больших высот, используя ряд сопловых насадков, можно добиться на всей траектории полёта режима, близкого к расчётному.

В многоступенчатой ракете, при переходе с одной ступени на другую выполняются две задачи: частичное снижение массы поднимаемого груза за счёт сброса пустой ступени и переход на другое сопло с увеличенной степенью расширения сопла последующей ступени.

Опыт показал, что на сравнительно небольших перепадах высот более оптимальным является использование сопловых насадков. Здесь весь участок полёта разделён на несколько участков по давлению p_i . Для каждого из них определяются более выгодные давления $p_a(m.e. F_a)$.

На первом участке работает исходное сопло, на втором подстыковывается 1-ый насадок, на третьем – 2-ой насадок. Чем больше насадков, тем оптимальнее работа камеры. При этом:

$$P = \dot{m} \cdot w_a + (p_a - p_n) \cdot F_a \text{ - исходное сопло;}$$

$$P = \dot{m} \cdot w_a^H + (p_a^H - p_n) \cdot F_a^H \text{ - сопло с насадком;}$$

$$w_a^H > w_a; \quad p_a^H < p_a; \quad F_a^H > F_a; \quad P^H > P.$$

8. Дроссельная (расходная) характеристика идеальной камеры.

Дроссельная характеристика – это зависимость тяги и удельного импульса от расхода или давления в камере сгорания при прочих равных условиях, т.е.:

$$P, I_y = f(p_k, \dot{m}) \quad \text{при} \quad k, R, T_k, F_{кр}, F_a, p_n = const.$$

а) аналитическое выражение.

$$\begin{cases} P = \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a - p_n \cdot F_a, \\ I_y = w_a + \frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}. \end{cases}$$

$$\dot{m} \sim p_\kappa, \quad p_a \sim p_\kappa, \quad \dot{m} = \frac{p_\kappa \cdot F_{\kappa p}}{\beta}, \quad p_a = \frac{p_a}{p_\kappa} \cdot p_\kappa. \text{ Подставим:}$$

$$\begin{cases} P = \frac{p_\kappa \cdot F_{\kappa p}}{\beta} \cdot w_a + \frac{p_a}{p_\kappa} \cdot p_\kappa \cdot F_a - p_n \cdot F_a, \\ I_y = w_a + \frac{\frac{p_a}{p_\kappa} \cdot p_\kappa \cdot F_a}{\frac{p_\kappa \cdot F_{\kappa p}}{\beta}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\frac{p_\kappa \cdot F_{\kappa p}}{\beta}}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} P = p_\kappa \left(\frac{F_{\kappa p} \cdot w_a}{\beta} + \frac{p_a}{p_\kappa} \cdot F_a \right) - p_n \cdot F_a, \\ I_y = w_a + \frac{p_a}{p_\kappa} \frac{F_a}{F_{\kappa p}} \beta - \frac{1}{p_\kappa} \cdot \frac{F_a}{F_{\kappa p}} \cdot p_n \cdot \beta. \end{cases}$$

$$p_n, F_{\kappa p}, F_a, \beta = \frac{\sqrt{R \cdot T_\kappa}}{A_k} = const \text{ по условию,}$$

$$w_a = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_\kappa \cdot \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_\kappa} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = f \left(\kappa, R, T_\kappa, \frac{p_a}{p_\kappa} \right) = const, w_a \neq f(p_\kappa).$$

Обозначим:

$$c_1 = \left(\frac{F_{\kappa p} \cdot w_a}{\beta} + \frac{p_a}{p_\kappa} \cdot F_a \right), c_2 = p_n \cdot F_a,$$

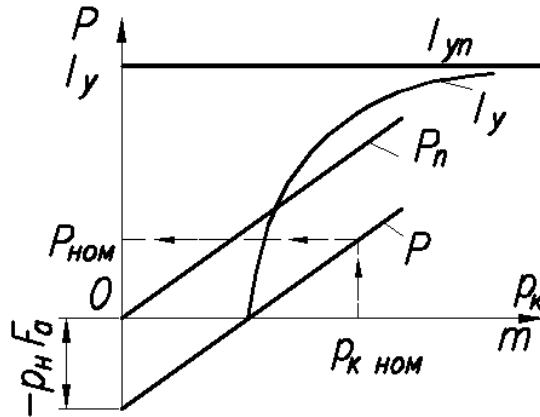
$$c_3 = \left(w_a + \frac{p_a}{p_\kappa} \frac{F_a}{F_{\kappa p}} \beta \right) = I_{yn} = I_{yвн}, c_4 = \frac{F_a}{F_{\kappa p}} \cdot p_n \cdot \beta.$$

Тогда:

$$\begin{cases} P = c_1 \cdot p_k - c_2, & \text{или } P = P_n - p_n \cdot F_a, \\ I_y = c_3 - \frac{1}{p_k} \cdot c_4, & \text{или } I_y = I_{yn} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}. \end{cases} \quad - \text{ аналитическое выражение}$$

дроссельной характеристики, где c_1, c_2, c_3, c_4 – константы, имеющие размерности и независимые от p_k .

б) графическое представление.



Характерные точки:

$(p_{k \text{ ном}}, P_{\text{ном}})$ – номинальная, т. е. рабочая точка режима. Она задаётся.

$(0, -p_n \cdot F_a)$ – мнимая точка при $p_k = 0$.

По этим двум или любым другим двум точкам можно построить характеристику $P = f(p_k)$.

Анализ:

- 1) дроссельная характеристика $P = f(p_k)$ линейная, сдвинутая вниз от $P_n = f(p_k)$ относительно начала координат на величину $c_2 = p_n \cdot F_a$;
- 2) с ростом p_k тяга увеличивается. При $p_k = 0$ характеристика отсекает на ординате мнимую отрицательную величину $(-p_n \cdot F_a)$;
- 3) располагая заданной номинальной точкой, можно построить характеристику во всём диапазоне p_k ;
- 4) при $p_n = 0$ $P_n = P_{\text{вн}}$;

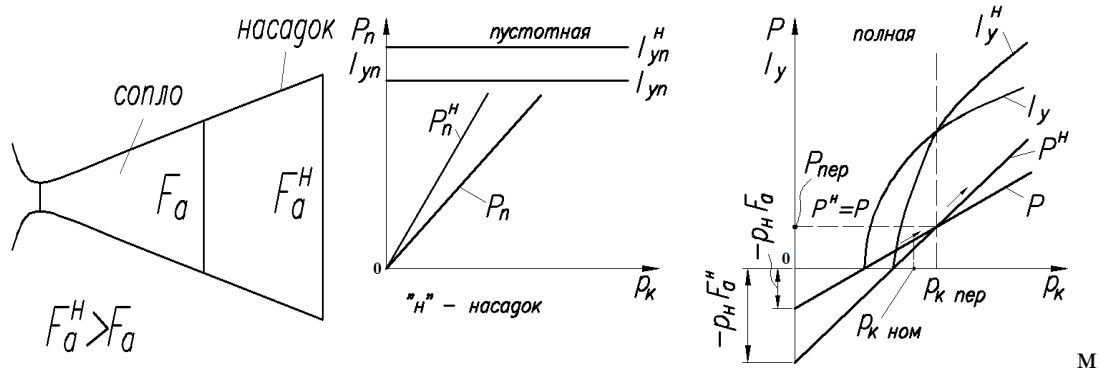
$$5) \quad P \parallel P_n; \quad P_n = c_1 \cdot p_k;$$

$$6) \quad \text{зависимость } I_y = f(p_k) \text{ нелинейная. С увеличением } p_k \text{ она растёт, стремясь к своему максимальному значению } c_3 = I_{yn} \text{ за счёт снижения отрицательной величины } \frac{1}{p_k} \cdot c_4;$$

$$7) \quad \text{при } p_n = 0 \rightarrow I_y = I_{yn} = c_3.$$

Дроссельная характеристика, как и высотная, относится к основным статическим характеристикам камеры двигателя, с помощью которой выбираются необходимые режимы работы камеры применительно к изделию (ракете).

в) сопло с насадком.



$$P = P_n - p_n \cdot F_a = \underbrace{\dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a}_{P_n} - p_n \cdot F_a,$$

$$P^H = P_n^H - p_n \cdot F_a^H = \underbrace{\dot{m} \cdot w_a^H + p_a^H \cdot F_a^H}_{P_n^H} - p_n \cdot F_a^H,$$

$$P_n = c_1 \cdot p_k, P_n^H = c_1^H \cdot p_k,$$

$$F_a^H > F_a, \quad c_1^H > c_1, \quad P_n^H > P_n,$$

$$P = P_n - p_n \cdot F_a, P^H = P_n^H - p_n \cdot F_a^H.$$

Отрицательная доля $p_n \cdot F_a^H$ у сопла с насадком больше, чем у сопла без насадка $p_n \cdot F_a$. Значит всегда существует такое значение p_k , при котором увеличение P_n за счёт насадка компенсируется отрицательным влиянием наружной составляющей $p_n \cdot F_a^H$. Это означает, что дроссельные характеристики камеры с исходным соплом и с соплом с насадком обязательно пересекутся между собой. Точка пересечения называется точкой

переключения с менее выгодного режима работы на более выгодный. При снижении p_k от $p_{k\text{ пер}}$ более выгодно работать на исходном сопле, при повышении p_k – на сопле с насадком.

Определение точки переключения.

Т. к. $P = c_1 \cdot p_k - c_2$, то при $P = P^H$ будет:

$$c_1 \cdot p_k - c_2 = c_1^H \cdot p_k - c_2^H,$$

$$c_2^H - c_2 = p_k \cdot (c_1^H - c_1),$$

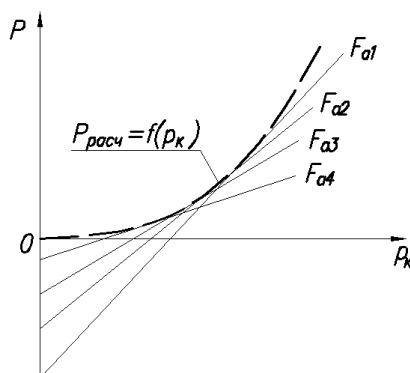
$$p_k = p_{k\text{ пер}} = \frac{c_2^H - c_2}{c_1^H - c_1}.$$

г) сопло с идеально регулируемой F_a .

Это такое сопло, у которого при $p_k = \text{var}$ $p_a = p_{a\text{ расч}} = p_n$, т. е. $F_a = F_{a\text{ расч}}$ на всех режимах по p_k (при любом значении p_k), т.е. всегда соблюдается расчетный режим работы сопла.

Рассмотрим семейство дроссельных характеристик с $F_a = \text{var}$ (см. рисунок).

Найдём на каждой из этих характеристик расчётные точки ($F_{a1} > F_{a2} > F_{a3} > F_{a4}$).



При бесконечном числе характеристик автоматически образуется огибающая кривая, проходящая через расчётные точки.

Эту кривую можно рассчитать.

В общем случае $P = \dot{m} \cdot w_a + (p_a - p_n) \cdot F_a$.

Т. к. $p_a = p_n$, то $P_{\text{расч}} = \dot{m} \cdot w_{a\text{ расч}}$,

$$\dot{m} = \frac{p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}}{\beta}, \quad w_{a \text{ расч}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_{\kappa} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_{\kappa}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \text{ то}$$

$$P_{\text{расч}} = \frac{p_{\kappa} \cdot F_{\kappa p}}{\beta} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_{\kappa} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_{\kappa}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = f \left(p_{\kappa}; \frac{1}{p_{\kappa}} \right).$$

9. Высотная характеристика идеальной камеры.

Высотная характеристика – это зависимость тяги и удельного импульса камеры от давления окружающей среды (высоты, глубины) при прочих равных условиях. Т.е. $P, I_y = f(p_n)$ при $k, R, T_{\kappa}, F_{\kappa p}, F_a, p_{\kappa} = \text{const}$.

Высотной эта характеристика называется потому, что первые ракеты совершали полёты только в атмосфере, меняя высоту H , а, значит, и давление p_n . Кроме атмосферы может быть и движение ракеты под водой на глубине h .

а) аналитическое выражение.

$$\begin{cases} P = \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a - p_n \cdot F_a = P_{\text{вн}} - p_n \cdot F_a = f(p_n), \\ I_y = w_a + \frac{p_a \cdot F_a}{\dot{m}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}} = I_{y \text{ вн}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}} = f(p_n). \end{cases}$$

При безотрывном течении в сопле $P_{\text{вн}} = P_n$, $I_{y \text{ вн}} = I_{y n}$, тогда:

$$\begin{cases} P = P_n - p_n \cdot F_a, \\ I_y = I_{y n} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}. \end{cases}$$

Обозначим:

$$P_n = \text{const} = c_1; \quad F_a = \text{const} = c_2 \text{ (здесь } c_1, c_2 \neq f(p_n));$$

$$I_{y n} = \text{const} = c_3; \quad \frac{F_a}{\dot{m}} = \text{const} = c_4 \text{ (здесь } c_3, c_4 \neq f(p_n));$$

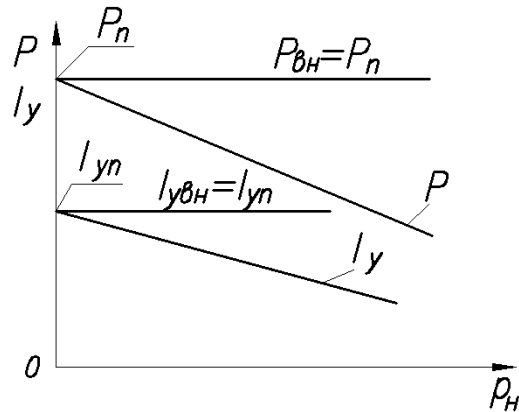
C_1, C_2, C_3, C_4 – константы, имеющие размерность и независимые от p_n

Итак:

$$\begin{cases} P = c_1 - p_n \cdot c_2, \text{ или } P = P_n - p_n F_a \\ I_y = c_3 - p_n \cdot c_4, \text{ или } I_y = I_{y n} - p_n \frac{F_a}{\dot{m}} \end{cases} - \text{аналитическое выражение высотной}$$

характеристики.

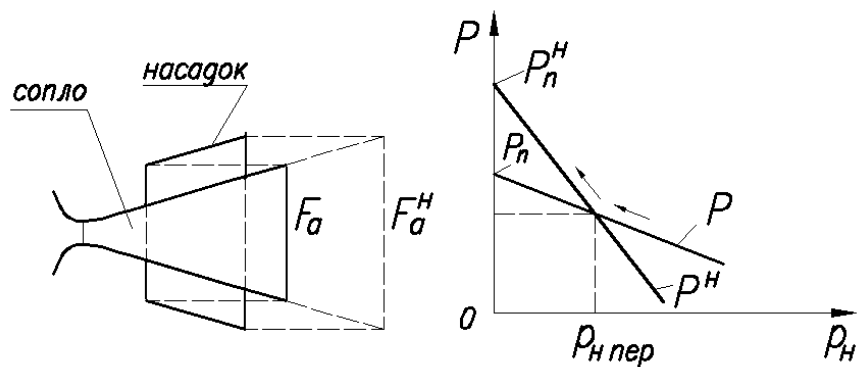
б) графическое представление.



Анализ:

1. Очевидно, что это – линейные зависимости от p_n .
2. Зная P_n и тягу при любом значении p_n можно построить характеристики $I_y, P = f(p_n)$. С ростом p_n обе характеристики падают.
3. Характеристики $P = f(p_n)$ и $I_y = f(p_n)$ не параллельные.

в) сопло с насадком.



$$P = c_1 - c_2 \cdot p_n$$

$$P^H = c_1^H - c_2^H \cdot p_n$$

При $p_n = 0$:

$$\left. \begin{aligned} P = c_1 = P_n &= \dot{m} \cdot w_a + p_a \cdot F_a \\ P^H = c_1^H = P_n^H &= \dot{m} \cdot w_a^H + p_a^H \cdot F_a^H \end{aligned} \right\} \dot{m} = \text{const} \neq f(p_n)$$

$$w_a^H > w_a, \quad \text{т.к.} \quad F_a^H > F_a.$$

Таким образом, $c_1^H > c_1$, т.е. $P_n^H > P_n$.

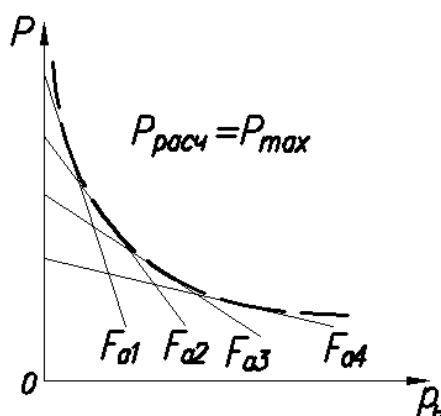
Однако, собственно тяга P^H не всегда больше тяги P . При увеличении p_n отрицательная составляющая тяги $p_n \cdot F_a^H$ может стать больше $p_n F_a$. Это означает, что характеристики камеры без насадка и с насадком пересекаются, т.к. характеристика с насадком падает более интенсивно за счёт неравенства $p_n F_a^H > p_n F_a$.

При их пересечении $P = P^H$, т.е. $c_1 - c_2 \cdot p_n = c_1^H - c_2^H \cdot p_n$;

$$p_n \cdot (c_2^H - c_2) = p_n \cdot (c_1^H - c_1); \quad p_n = p_{n\text{пер}} = \frac{c_1^H - c_1}{c_2^H - c_2} \quad - \text{ точка переключения с}$$

менее выгодного режима на более выгодный. Так, при подъёме в атмосфере до $p_{n\text{пер}}$ выгоднее работать без насадка, после $p_{n\text{пер}}$ - с насадком.

г) сопло с идеально регулируемой F_a .



$$F_{a1} > F_{a2} > F_{a3} > F_{a4}$$

Рассмотрим семейство сопел с разными F_a (см. рисунок). Идеально регулируемое по F_a сопло – это сопло, у которого $p_a = p_n$ при $p_n = \text{var}$ за счёт $F_a = \text{var}$ (при $p_k = \text{const}$).

Анализ:

1. При ограниченном числе сопел всегда есть участок характеристики, на котором выгодно какое-либо одно сопло. При этом самым выгодным режимом на этом участке будет расчётный ($p_a = p_n$).
2. При неограниченном числе сопел – эти участки превратятся в точки, которые будут соответствовать расчётным режимам работы сопла по p_n .

3. Кривая, проведенная через эти расчётные точки будет высотной характеристикой сопла с идеально регулируемой F_a .

При $p_a = p_n$ будет:

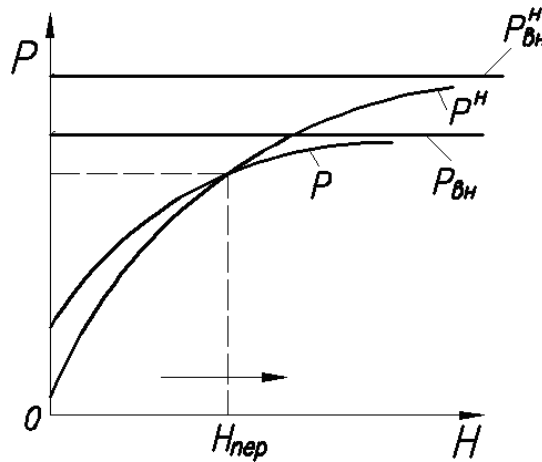
$$P = \dot{m} \cdot w_a + (p_a - p_n) \cdot F_a = \dot{m} \cdot w_a, \quad \text{т.е.} \quad P_{расч} = \dot{m} \cdot w_{a\ расч},$$

$$\dot{m} = \frac{p_\kappa \cdot F_{кр}}{\beta} = const, \quad w_{a\ расч} = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_\kappa \cdot \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_\kappa} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = f(p_n).$$

$$\text{И тогда: } P_{расч} = \dot{m} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T_\kappa \cdot \left[1 - \left(\frac{p_n}{p_\kappa} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = f(p_n).$$

Характеристики P и I_y отличаются между собой только масштабом с коэффициентом, равным \dot{m} и непараллельны друг другу.

д) в атмосфере и в воде.



Иногда удобнее высотную характеристику выражать так:

$$P, I_y = f(H), \quad \text{где } H - \text{высота в атмосфере (см. рисунок), или:}$$

$$P, I_y = f(h), \quad \text{где } h - \text{глубина в воде.}$$

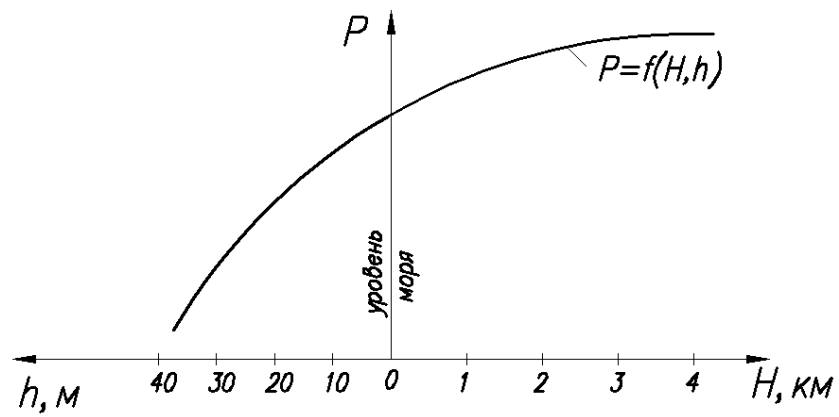
Давление p_n и высота H в атмосфере сведены в физических справочниках. Для первого приближения можно воспользоваться зависимостью:

$$H, м \cong 8000 \cdot \lg \frac{p_o}{p}, \quad \text{где } p_o \approx 0,1 \text{ МПа} - \text{давление на уровне моря.}$$

$$\text{В воде: } p_n = p_o + \rho_s \cdot g \cdot h.$$

Отсюда: $h = \frac{p_n - p_o}{\rho_{\text{в}} \cdot g}$, где $\rho_{\text{в}}$ - плотность воды, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Качественный совмещенный характер представления зависимости $P = f(H, h)$ показан на рисунке.



ЧАСТЬ II. НЕИДЕАЛЬНАЯ КАМЕРА РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

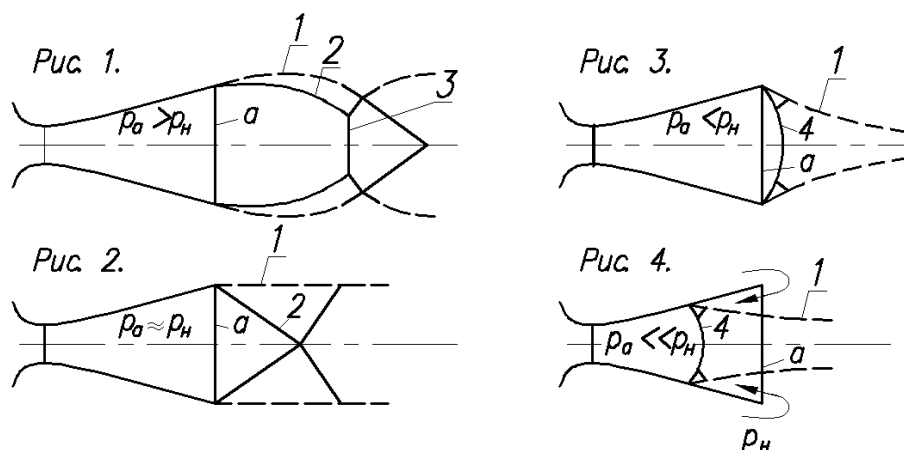
Раздел 1. Характеристики камеры на режиме перерасширения со скачком уплотнения в сопле.

ЛЕКЦИЯ №20.

1. Причины возникновения скачков в сверхзвуковом потоке.

Скачок уплотнения – это волна возмущения сверхзвукового потока, при переходе через которую параметры газа изменяют свои значения скачком, т.е. мгновенно. При этом статические значения давления, температуры и плотности увеличиваются, а скорость уменьшается. Энтальпия считается неизменной, а энтропия растёт. Причинами появления скачков являются твёрдые, жидкие или газообразные препятствия. В соплах это газовые рули, щитки, боковые струи и глубокое перерасширение потока ($p_a \ll p_n$). Торможение сверхзвукового потока может происходить только с помощью скачков уплотнения. Без скачков сверхзвуковой поток существует только при его непрерывном ускорении.

2. Характер течения струи за соплом и в сопле со скачком уплотнения.



- 1 – граница струи – крайняя линия тока,
- 2 – бочкообразный висячий скачок уплотнения (“бочка”),
- 3 – прямой скачок, диск Маха,
- 4 – мостообразный скачок,
- a – срез сопла.

Рис. 1 ($p_a > p_n$) - режим недорасширения.

Давление в струе за срезом сопла должно стать равным p_n , поэтому струя продолжает расширяться. Диаметр первого участка струи (до диска Маха) больше диаметра среза. Скорость струи растёт, а давление в ней становится меньше, чем p_n . Таким образом, за соплом струя перерасширяется на первом участке, поэтому она начинает сужаться, т. к. вокруг неё давление p_n становится больше давления внутри струи. Струя должна тормозиться в неподвижной атмосфере и это торможение обязательно сопровождается появлением в ней системы скачков уплотнения. При переходе через эту систему часть энергии струи теряется, однако её остаётся достаточно для повторного ускорения струи на втором участке, и так – до полного затухания и смешения струи с атмосферой.

Рис. 2. ($p_a = p_n$) - расчётный режим работы сопла.

Диск Маха уменьшается до точки. «Бочка» становится похожа на конус. Диаметр струи равен диаметру среза сопла. Торможение струи в целом аналогично рис. 1.

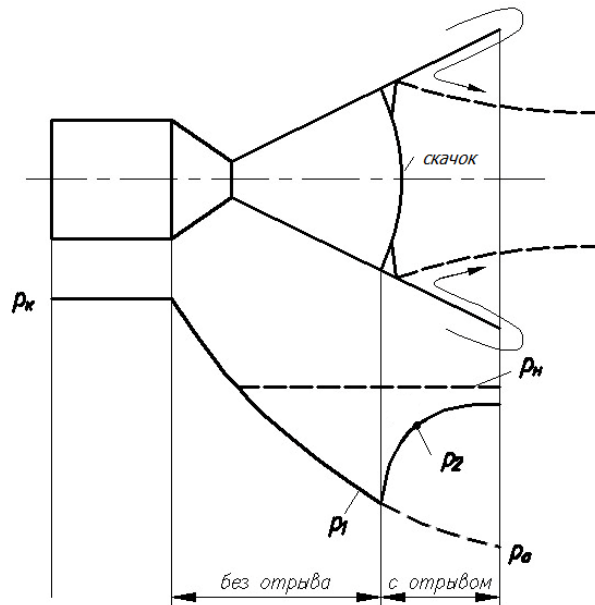
Рис. 3. ($p_a < p_n$) - режим перерасширения.

С уменьшением p_a может наступить момент, когда прежняя система скачков уже не в состоянии затормозить струю. (Интенсивность скачков не позволяет её затормозить). Тогда появится более интенсивная система скачков, или мостообразный скачок, который можно назвать ударной волной. Предельное положение этого скачка – на срезе сопла. Оно определяет то минимальное значение p_a , при котором течение в сопле идёт без нарушения идеального процесса, без отрыва потока от стенки сопла, без скачков. Такое значение p_a определяет условие входа скачка в сопло. До момента входа скачка в сопло можно использовать уравнения для идеальной камеры.

Рис. 4. ($p_a \sim p_n$) - режим глубокого перерасширения.

Под величиной p_a здесь считается теоретическое значение p_a , которое было бы при течении в сопле без скачка. Дальнейшее снижение p_a приводит к входу скачка в сопло. Чем меньше теоретическое p_a , тем глубже входит скачок в сопло. Скачок значительно изменяет течение, отрывает поток от стенки, резко изменяет параметры газа за скачком и тягу. Все уравнения для идеальной камеры становятся несправедливыми.

Рассмотрим особенности этого течения (см. рисунок).



p_1 - давление невозмущенного потока в точке отрыва потока от стенки;

p_2 - характерное давление за скачком;

p_n - давление окружающей среды;

p_k - давление в камере сгорания;

p_a - теоретическое давление на срезе (без скачка в сопле).

Давление в оторванном потоке стремится повыситься до давления p_n . Однако внутри сопла всё же не достигает его. Участок " $p_1 - p_2$ " - крутой подъём, далее – плавный подъём.

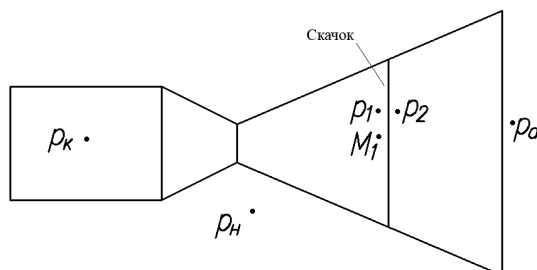
Точка p_2 - особая точка. Если поток не присоединится вновь к стенке сопла, то отношение давлений $\frac{p_2}{p_1}$ называется критическим. Как правило, поток не присоединяется

повторно к стенке. И тогда для отношения $\frac{p_2}{p_1}$ можно использовать одно из известных эмпирических соотношений, например:

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = 0,73 \cdot M_1 + 0,39 ,$$

где M_1 - число Маха невозмущенного потока в сечении скачка (в месте отрыва).

Доказано, что $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр}$ практически не зависит от k .

3. Характерные соотношения давлений при наличии в сопле скачка уплотнения.

Для конкретной камеры двигателя можно доказать, что положение скачка уплотнения зависит только от p_k и p_n . Удобнее эту зависимость выражать в виде отношения $\frac{p_k}{p_n}$. Представим это отношение в виде:

$$\frac{p_k}{p_n} = \frac{p_k}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{p_2}{p_n}. \quad (1)$$

$$\text{Известно, что } \frac{p_k}{p_1} = \frac{1}{\pi(M_1)} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \quad (2)$$

где $\pi(M_1)$ - ГДФ. Принимаем, что

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)_{кр} = \frac{1}{0,73 \cdot M_1 + 0,39}. \quad (3)$$

Для отношения $\frac{p_2}{p_n}$ известно эмпирическое выражение:

$$\frac{p_2}{p_n} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0,192}{\sin \beta} - 0,7\right) \cdot \left(1 - \frac{M_1}{M_a}\right)}, \quad (4)$$

где β - угол полураствора конического сопла,

M_a - мнимое (теоретическое) значение M_a , если бы течение в сопле было безотрывное, без скачка.

Подставим (2), (3), (4) в (1) и получим:

$$\frac{p_k}{p_n} = \frac{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{(0,73 \cdot M_1 + 0,39) \cdot \left[1 + \left(\frac{0,192}{\sin \beta} - 0,7\right) \cdot \left(1 - \frac{M_1}{M_a}\right)\right]}. \quad (5)$$

Величина M_1 однозначно определяет положение (геометрическое) скачка в сопле.

Задавая M_1 , определяем q_1 (ГДФ), где $q_1 = \frac{F_{kp}}{F_1}$ (F_1 - площадь поперечного сечения

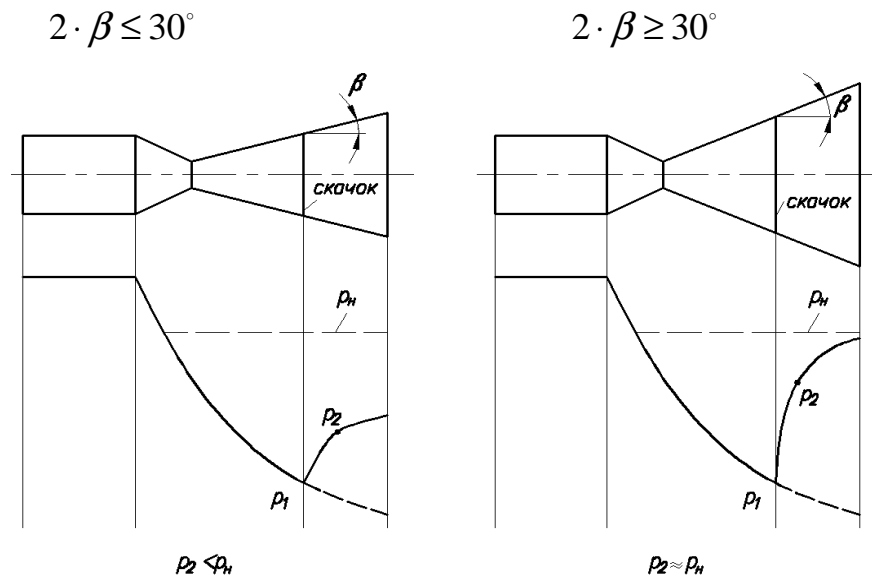
сопла в месте скачка). Тогда диаметр в месте скачка $D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}}$. Местоположение

скачка $x_1 = f(D_1)$ определяем геометрически на контуре сопла. Опыт показал, что в

конических соплах с углами раствора $2 \cdot \beta \geq 30^\circ \rightarrow p_2 \approx p_n$, т. е. $\frac{p_2}{p_n} \approx 1$. И тогда

$$\frac{p_k}{p_n} = \frac{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{0,73 \cdot M_1 + 0,39}. \quad (6)$$

Некоторое различие характера изменения давления за скачком для различных углов раствора сопла показано на рисунке.



Для положения скачка на срезе сопла (любого):

$$\frac{p_k}{p_n} = \frac{\left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_a^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{0,73 \cdot M_a + 0,39}. \quad (7)$$

Уравнение (7) можно использовать для определения характерных скачковых точек как в дроссельной, так и в высотной характеристиках $(p_{K_{ск}}, p_{H_{ск}})$.

$$p_{K_{ск}}, p_{H_{ск}} = f\left(\frac{p_k}{p_n}\right)_{ск}.$$

$p_{кск}, p_{нск}$ - давления, которые разделяют течение в сопле на два режима:

- безотрывное ($p_k > p_{кск}; p_n < p_{нск}$);
- отрывное ($p_k < p_{кск}; p_n > p_{нск}$).

Для сопел с углами $2 \cdot \beta < 30^\circ$ следует пользоваться уравнением (5), а для сопел с углами $2 \cdot \beta > 30^\circ$ - уравнением (6).

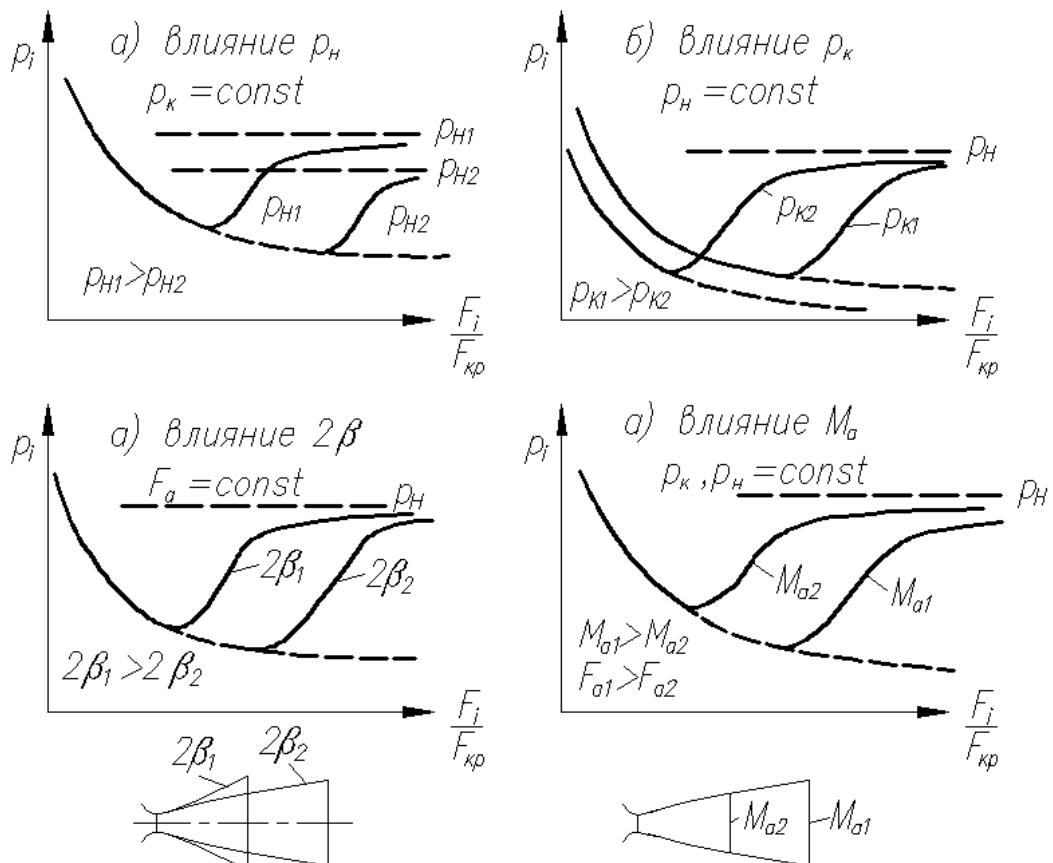
Если скачок на срезе, то $p_1 = p_a$, $p_2 = p_n$, $M_1 = M_a$.

$$\text{И тогда } \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{кр} = \frac{p_n}{p_a} = 0,73 \cdot M_a + 0,39. \quad (8)$$

Здесь p_n и p_a можно так же назвать скачковыми. Уравнения (7) и (8) равносильны для определения скачковых точек.

3. Влияние основных параметров на положение скачка в сопле.

На положение скачка и характер кривой давления за скачком в общем случае влияют все газодинамические и геометрические параметры. Однако, при турбулентном течении ($Re > 5 \cdot 10^5$), характерном для ракетных сопел, основными влияющими параметрами являются только 4: $p_k, p_n, 2 \cdot \beta, M_a$ (см. рисунок).



Анализ:

1. влияние p_k и p_n одинаково, но противоположно, поэтому их влияние оценивается универсально, как влияние $\frac{p_k}{p_n}$ или $\frac{p_n}{p_k}$.

2. Характер кривой давления за скачком зависит и от самого положения скачка в сопле. Чем ближе скачок к срезу, тем более крутой характер у кривой. Чем дальше скачок от среза, тем ближе давление в струе на срезе к давлению окружающей среды p_n .

3. Представление результатов расчёта (эксперимента) обычно даётся в относительных координатах $\pi_i = f(\bar{F}_i)$, где $\pi_i = \frac{p_i}{p_k}$, а $\bar{F}_i = \frac{F_i}{F_{кр}} = \frac{1}{q_i}$.

4. Все основные сведения в разделе о скачках уплотнения в сопле относятся к коническим соплам, но в первом приближении их можно использовать и для профилированных сопел, у которых β - полуугол на срезе сопла.

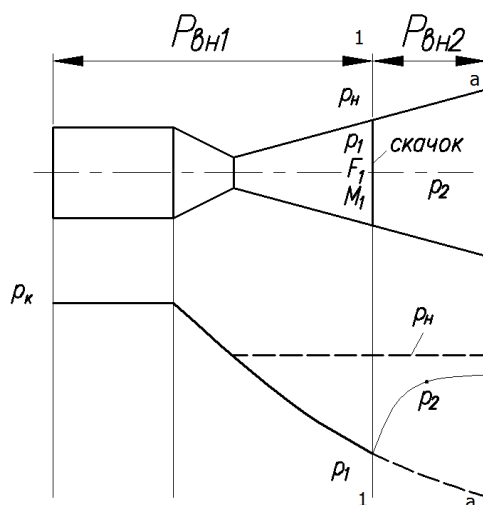
5. Чем больше p_k и M_a , тем ближе скачок к срезу сопла.

6. Чем больше p_n и β , тем дальше скачок от среза сопла.

ЛЕКЦИЯ №22.

4. Тяга камеры при наличии в сопле скачка уплотнения.

Течение с отрывом потока от стенки сопла из-за скачка уплотнения – это течение с потерей энергии потока, с одной стороны, и влиянием окружающей среды, с другой стороны. Решение этой проблемы по строгим газодинамическим законам невозможно, поэтому для определения тяги используются эмпирические соотношения (см. выше). Тягу камеры здесь можно представить как сумму двух тяг: тягу до скачка и тягу после скачка.



Всегда: $P = P_{вн} + P_{нар}$, где

$P_{нар} = -p_n \cdot F_a$, и тогда представим:

$$P_{вн} = P_{вн1} + P_{вн2}.$$

Характер течения до скачка безотрывный, поэтому можно использовать один из видов уравнения внутренней тяги для идеальной камеры, в которой течение считается одномерным, изоэнтропическим, бескачковым. Например:

$P_{вн1} = p_1 \cdot F_1 \cdot (1 + \kappa \cdot M_1^2)$, где p_1, F_1, M_1 - параметры невозмущенного потока в сечении, где расположен скачок.

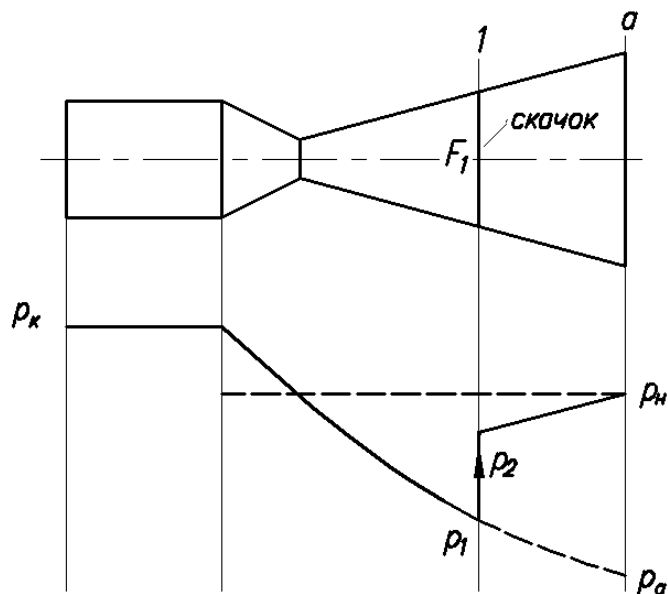
Характер изменения давления за скачком (p_{1-a}) для каждого сопла и газа индивидуальный. Этому вопросу посвящено много исследований, даны рекомендации, но они не всегда верны (не универсальны). Поэтому предлагаются более простые решения (расчетные модели).

Расчётная модель №1. Эту модель рекомендуется использовать для сопел со сравнительно малыми углами раствора, т.е. там, где p_2 заметно меньше p_H . Среднее давление за скачком здесь равно его среднеарифметическому значению, т.е.

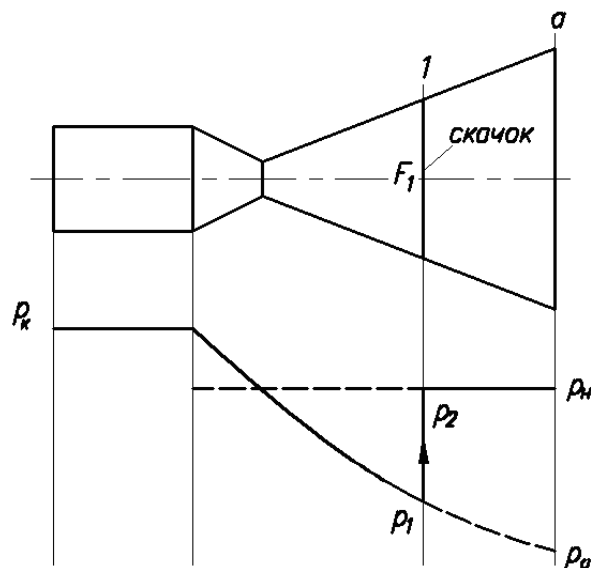
$$p_{1-a} = \frac{1}{2} \cdot (p_2 + p_H) \text{ (см. рисунок).}$$

$$\text{Тогда } P_{вн2} = \int_1^a p_{1-a} \cdot dF = \frac{1}{2} \cdot (p_2 + p_H) \cdot (F_a - F_1),$$

$$P = p_1 \cdot F_1 \cdot (1 + \kappa \cdot M_1^2) + \frac{1}{2} \cdot (p_2 + p_H) \cdot (F_a - F_1) - p_H \cdot F_a.$$



Расчётная модель №2. Эта модель рекомендуется для сравнительно больших углов раствора сопла, где можно допустить, что $p_2 = p_H$, т.е. $p_{1-a} = p_H$ (см. рисунок).

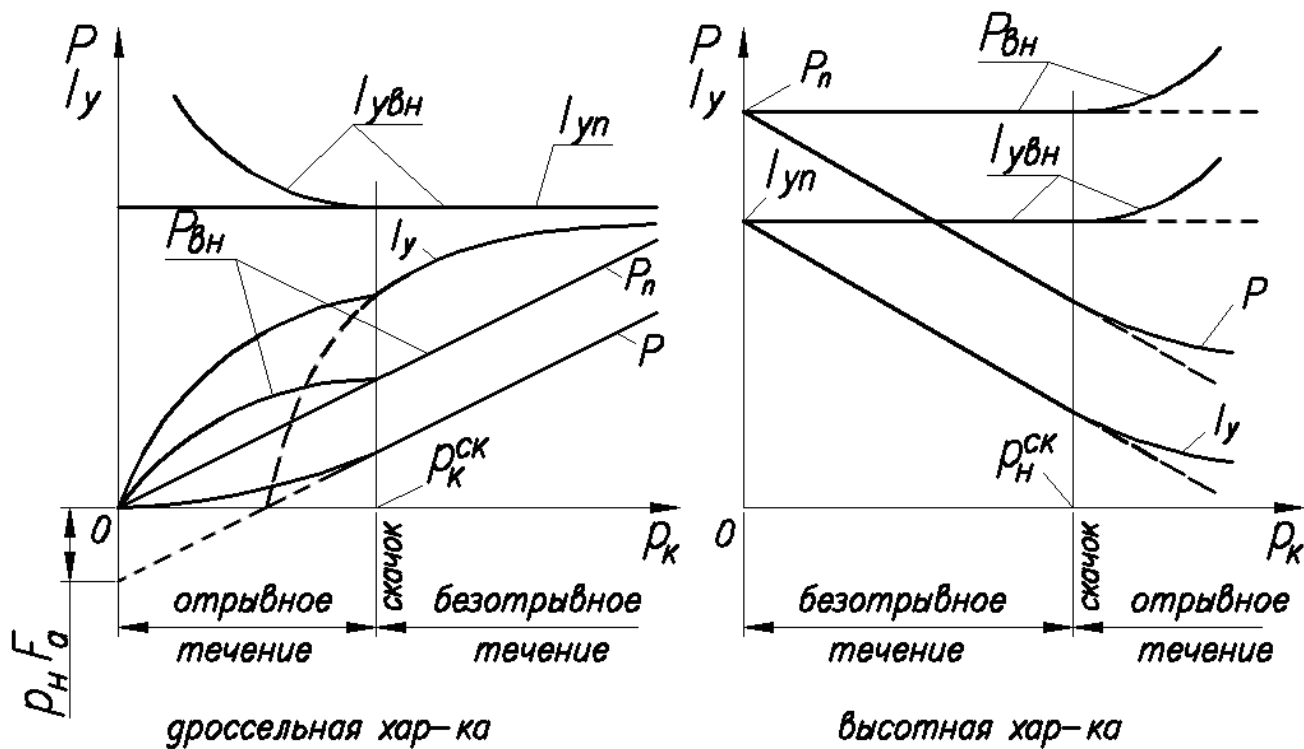


Тогда $P_{вн2} = \int_1^a p_{1-a} \cdot dF = p_n \cdot (F_a - F_1),$

$$P = p_1 \cdot F_1 \cdot (1 + \kappa \cdot M_1^2) + p_n \cdot (F_a - F_1) - p_n \cdot F_a = p_1 \cdot F_1 \cdot (1 + \kappa \cdot M_1^2) + p_n \cdot F_a - p_n \cdot F_1 - p_n \cdot F_a = p_1 \cdot F_1 \cdot (1 + \kappa \cdot M_1^2) - p_n \cdot F_1.$$

Отсюда следует, что часть сопла, расположенная за скачком, как бы не участвует в создании тяги.

5. Дроссельная и высотная характеристики камеры при наличии в сопле скачка уплотнения.



Анализ:

1. Характер зависимости выражает собой реальное изменение тяги и удельного импульса в отличие от идеальной камеры;
2. До некоторых значений p_k и p_n , при которых скачок располагается на срезе, характеристики определяются по уравнениям для безотрывного течения в сопле;
3. При $p_k < p_k^{ск}$ или $p_n > p_n^{ск}$ следует пользоваться эмпирическими зависимостями. Эмпирические зависимости близки к действительным в диапазоне $M_1 = 1,5 \dots 5,0$;
4. При наличии скачка в сопле характеристики выше, чем без скачка – это вызвано тем, что давление за скачком выше, чем при безотрывном течении. Однако, в целом это не является преимуществом. Если при изменении p_k или p_n соответственно изменять F_a , то характеристики будут выше, чем при наличии скачка в сопле.

ЛЕКЦИЯ №23.

6. Дроссельная характеристика многокамерного двигателя (связки камер) при поочередном и одновременном дросселировании камер.

1. В общем случае:

$$P = P_{вн} - p_n \cdot F_a; \quad I_y = I_{y_{вн}} - \frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}.$$

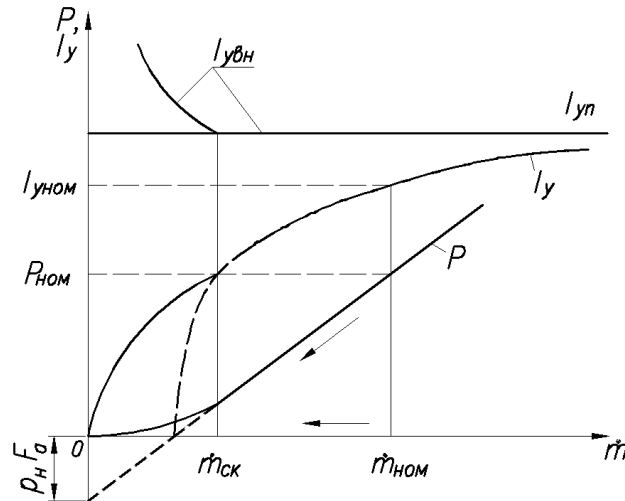
Из дроссельной характеристики камеры следует, что заданное снижение расхода (дросселирование) сопровождается снижением удельного импульса за счет возрастания отрицательной величины $\frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}$. При этом, чем больше площадь среза сопла F_a , тем больше потерь удельного импульса I_y при прочих равных условиях.

2. Отсюда следует, что можно использовать вместо одной «большой» камеры несколько «маленьких» с теми же суммарными значениями тяги P_Σ и расхода \dot{m}_Σ и геометрически подобных «большой» камере. При этом снижение тяги можно проводить за счет снижения тяги одной из «маленьких» камер, а отрицательная составляющая

удельного импульса $\frac{p_n \cdot F_a}{\dot{m}}$ уменьшится во столько раз, во сколько раз меньше F_a одной

«маленькой» дросселируемой камеры по сравнению с F_a одной «большой» камеры.

3. Вначале обратимся к дроссельной характеристике одной камеры в виде $P, I_{yвн} = f(\dot{m})$. Т.к. $\dot{m} \sim p_k$, то её вид аналогичен зависимости $P, I_y = f(p_k)$ (см. рисунок).



4. Рассмотрим работу двигателя состоящего из n камер и двигателя с одной эквивалентной камерой. Эквивалентность означает равенства

$F_{кр\Sigma} = n \cdot F_{кр}; F_{a\Sigma} = n \cdot F_a; P_{\Sigma} = n \cdot P; \dot{m}_{\Sigma} = n \cdot \dot{m}; I_{y\Sigma} = I_y$ и геометрическое подобие «большой» и «маленьких» камер. Только такое сопоставление справедливо. Итак:

$$n = 1, 2, \dots, (i-1), i, (i+1), \dots, n,$$

где n – число «маленьких» камер, i – номер дросселируемой камеры ($\dot{m} = \text{var}$),

$1, 2, \dots, (i-1)$ – камеры работают на номинальном режиме ($\dot{m} = \text{const}$),

$(i+1), \dots, n$ – камеры отключены ($\dot{m} = 0$). И тогда:

$$P_{\Sigma} = P_{ном} \cdot (i-1) + P_i,$$

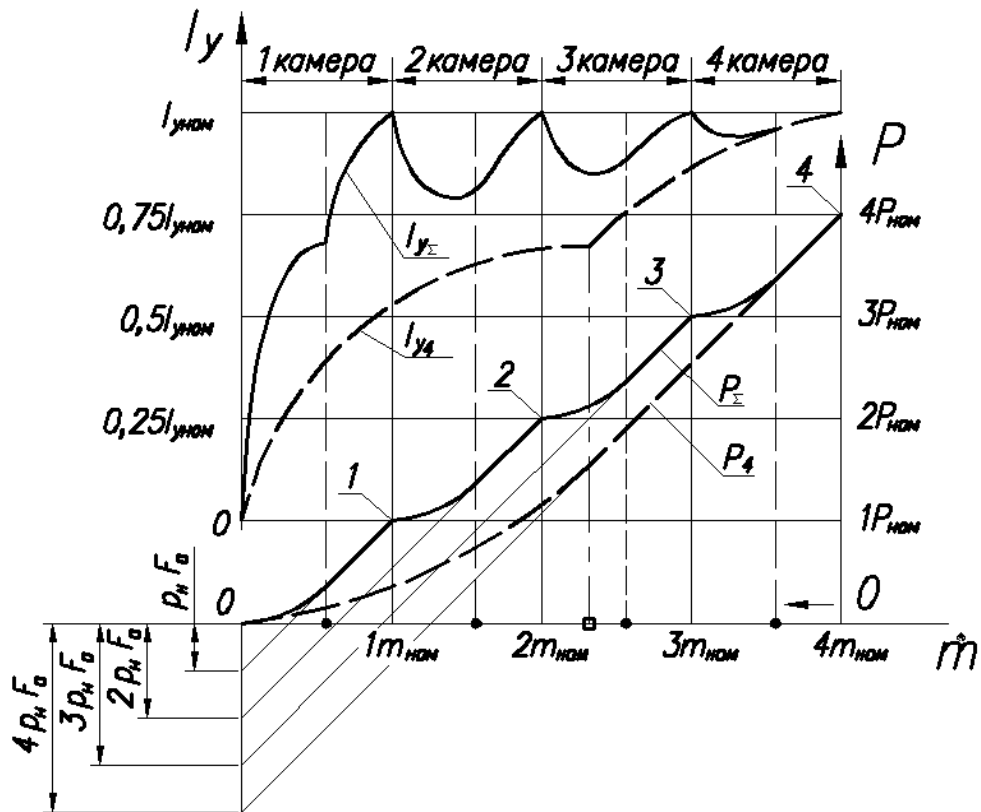
$$\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{ном} \cdot (i-1) + \dot{m}_i,$$

$$I_{y\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\dot{m}_{\Sigma}} = \frac{P_{ном} \cdot (i-1) + P_i}{\dot{m}_{ном} \cdot (i-1) + \dot{m}_i},$$

где $P_{ном}, \dot{m}_{ном}, I_{уном}$ – параметры одной камеры на номинальном режиме,

P_i, \dot{m}_i – параметры дросселируемой камеры.

5. В качестве примера рассмотрим сравнительные дроссельные характеристики связки из 4-х камер при одновременном ("4") и поочередном ("Σ") снижении расхода от номинального значения ($4 \cdot \dot{m}_{ном}$) до нуля при $p_n > 0$ (см. рисунок).



$P_{ном}, I_{уном}, \dot{m}_{ном}$ - параметры одной камеры на номинальном режиме работы.

$P_{\Sigma}, I_{у\Sigma}, \dot{m}_{\Sigma}$ - параметры связки 4-х камер при их поочерёдном дросселировании.

$P_4, I_{у4}, \dot{m}_4$ - параметры связки 4-х камер при их одновременном дросселировании.

• - скачок уплотнения на срезе сопла при поочерёдном дросселировании.

□ - скачки уплотнения на срезах 4-х сопел при одновременном дросселировании (или эквивалентного им «большого» сопла).

$$\text{Здесь } \dot{m}_4 = 4 \cdot \dot{m}_i; \quad P_4 = 4 \cdot P_i; \quad I_{у4} = \frac{P_4}{\dot{m}_4}.$$

На рисунке:

• штриховой линией показана характеристика при одновременном дросселировании 4-х камер (или одной «большой»);

- сплошной линией – при очередном дросселировании, начиная с последней (4-ой) камеры до полного выключения каждой камеры.

Пример: дросселируется 4-ая камера:

$$I_{y\Sigma} = \frac{3 \cdot P_{ном} + P_4}{3 \cdot \dot{m}_{ном} + \dot{m}_4}, \text{ где } P_{ном}, \dot{m}_{ном} = const; I_{y\Sigma} \leq I_{уном}.$$

Выводы:

1. На номинальном режиме (точка 4) характеристики одинаковы.
2. До вхождения скачка в 4-ое сопло характеристики одинаковы.
3. После вхождения скачка в любое дросселируемое сопло $I_{y\Sigma}$ продолжает падать, но менее интенсивно, чем I_{y4} . Он достигает минимума и вновь возрастает до $I_{уном}$.

Минимум $I_{y\Sigma}$ не совпадает по значению расхода с моментом входа скачка в сопло.

Подъем $I_{y\Sigma}$ после минимума вызван тем, что доля I_y дросселируемой камеры в $I_{y\Sigma}$ снижается, а при полном выключении она равно нулю.

Основной вывод: на всем участке дроссельной характеристики связки камер при поочередном дросселировании (или отключении камер) тяга и удельный импульс выше, чем при одновременном дросселировании (или дросселировании одной эквивалентной камеры).

4. Меньшему количеству дросселированных (отключенных) камер соответствует большее значение $I_{y\Sigma}$, то есть, чем больше число недросселированных камер, тем больше $I_{y\Sigma}$.
5. При полном отключении любого количества камер $I_{y\Sigma}$ становится равным $I_{уном}$.
6. Процесс частичного дросселирования одной из камер приводит к частичному снижению $I_{y\Sigma}$, а выключение любого числа камер его не меняет ($I_{y\Sigma} = I_{уном}$).
7. Основные способы понижения тяги многокамерного двигателя:
 - 1) поочередное выключение камер, при этом $I_{y\Sigma} = I_{уном}$. Недостаток – скачкообразное изменение тяги;
 - 2) поочередное дросселирование камер до их выключения. Недостаток – периодическое снижение $I_{y\Sigma}$;
 - 3) Одновременное (синхронное) дросселирование всех камер. Недостаток – значительное снижение $I_{y\Sigma}$.

Раздел 2. Термогазодинамический расчет.

1. Цель расчета. Фазовый состав продуктов сгорания. Реакции диссоциации и рекомбинации. Принцип Ле-Шателье.

Топливо состоит из горючего и окислителя. После химических реакций, т. е. горения топлива в камере сгорания образуются продукты сгорания (ПС) с параметрами p_k, T_k . Ускорение в сопле ПС происходит за счет непрерывного снижения p и T по закону процесса расширения. Одновременно меняются свойства и химический состав ПС.

Целью термогазодинамического расчета является:

- 1) определение параметров ПС в произвольных сечениях камеры;
- 2) определение химического состава ПС (там же).

Параметры и химический состав ПС зависят от:

- 1) природы топлива;
- 2) исходных данных в камере сгорания (p_k);
- 3) исходных данных в нужном сечении (p).

Природа топлива характеризуется:

- химическим составом горючего и окислителя;
- полной энтальпией горючего и окислителя (H_{II}^e, H_{II}^o).

Фазовый состав ПС в общем случае ПС включают в себя:

- 1 – газовую фазу;
- 2 – конденсированную фазу (К- фаза);
- 3 – ионизированную фазу.

Газовая фаза является основной, если не единственной, она включает в себя все газообразные окислы и свободные химические элементы.

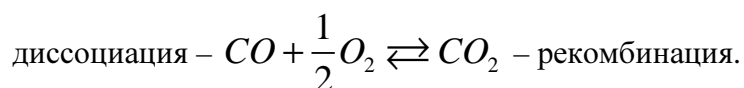
К – фаза может состоять из мелких жидких капель (например H_2O), или жидких, или твердых окислов металлов (например Al_2O_3). Размеры капель и частиц колеблются от долей микрона до сотен микрон.

Ионизированная фаза может возникать при температуре $T_k > 5000K$, когда атомы теряют электроны (отрицательные) и превращаются в ионы (положительные). В ракетных двигателях $T_k \leq 4000K$, поэтому реакции ионизации в расчетах не учитываются. (При полной ионизации наступает 4-е состояние вещества – плазма).

Реакции диссоциации и рекомбинации.

При $T > 2000K$ колебания атомов в молекулах могут привести к преодолению сил притяжения между атомами. При этом молекула распадается на более простые молекулы или атомы. Этот процесс называется реакцией диссоциации. Диссоциация сопровождается понижением температуры, т. е. снижением энтальпии ПС, а, значит, и снижением скорости ПС и удельного импульса I_y . Так, если бы не было диссоциации, то T_k равнялась бы, например, $T_k \cong 4500...5000K$, а в действительности $T_k \cong 3500...4000K$. Снижение температуры из-за диссоциации приводит к соответствующему снижению давления, т. е. в целом – к снижению энергетических возможностей ПС. С другой стороны, при достаточно продолжительном времени пребывания ПС в камере двигателя и благоприятных условиях возникают реакции, противоположные диссоциации, т. е. реакции объединения молекул или атомов в более «крупные» – это называется рекомбинацией. Если диссоциация идет с поглощением тепла, то рекомбинация – с выделением такого же количества тепла.

Рекомбинация – это не горение, а повторное объединение распавшихся в КС атомов и молекул. Если диссоциации свойственна высокая температура, то рекомбинации – низкая. Снижение температуры по длине сопла способствует рекомбинации. В камере сгорания идут одновременно две обратимые реакции: диссоциации и рекомбинации. При этом между ними устанавливается динамическое равновесие. Процессы не прекращаются и идут с одинаковой скоростью в обоих направлениях. Например:



Однако, это равновесие в камере сгорания наступает тогда, когда общее число актов диссоциации значительно превзойдет число актов рекомбинации. Поэтому можно считать, что в камере сгорания преобладают акты диссоциации.

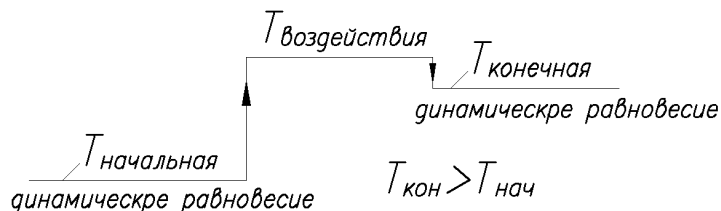
Вдоль по соплу температура ПС снижается, что способствует рекомбинации и выделению тепла. Т. е. соплу характерен процесс рекомбинации. При этом в сопле может выделяться такое же количество тепла, которое было поглощено в камере сгорания (это возможно, если сопло достаточно «длинное» и время пребывания ПС в сопле достаточное). В малогабаритных соплах реакции рекомбинации успевают пройти лишь частично.

Другим фактором, влияющим на рекомбинацию и диссоциацию, является давление. Чем выше давление, тем меньше скорость диссоциации и выше скорость рекомбинации. Например, повышение p_k с 2 до 20МПа приводит к повышению T_k на

величину $\Delta T_k = 300...350 K$. Однако, значительно превалирующим параметром на эти процессы является температура.

Принцип Ле-Шателье.

Внешнее воздействие на процесс, находящийся в динамическом равновесии, вызывает одноименную обратную реакцию, которая ослабляет это воздействие. Процесс приобретает вновь динамическое равновесие, но уже на другом уровне. Например:



2. Допущения в расчетах. Расчетные модели процесса течения в сопле.

Наличие обратимых реакций диссоциации и рекомбинации означает, что продукты сгорания – это химически активная смесь. При течении по соплу изменяются температура, давление и химический состав ПС. Меняются и теплофизические свойства ПС. Для основных расчетных моделей можно выделить общие для них допущения:

1. Температура и химический состав ПС в камере сгорания определяются в термогазодинамическом расчете с учетом реакции диссоциации и рекомбинации и наступлением химического равновесия между ними.

2. Доля каждой фазы ПС и энергия колебательного движения частиц соответствуют местным значениям температуры и давления по всей длине камеры двигателя (фазовое и энергетическое равновесие).

3. Полная энтальпия продуктов сгорания в камере сгорания равна полной энтальпии топлива ($H_{\text{П}}^{\text{ПС}} = H_{\text{П}}^{\text{T}}$).

4. Параметры ПС подчиняются уравнению состояния идеального газа.

5. Другие допущения – из определения идеальной камеры (см. выше).

Кроме того, в каждой из расчетных моделей имеются свои собственные допущения, касающиеся процесса расширения в сопле.

1) **Модель идеального процесса расширения.** Химический состав газа (μ) и его теплофизические свойства c_p, c_v , приобретенные в камере сгорания, по длине сопла не изменяются. Показатель процесса n на любом участке сопла остается постоянным и равным отношению $k = \left(\frac{c_p}{c_v} \right)$.

$$\text{Итак: } R = \frac{R_0}{\mu} = \text{const}, C_p = \text{const}, C_v = \text{const}, n = k.$$

Этот процесс можно назвать условно предельно неравновесным. Такая модель расчета позволяет создать теорию идеальной камеры двигателя (сопла).

2) **Модель химически неравновесного процесса расширения** Химический состав ПС, приобретенный в КС, по длине сопла не изменяется («заморожен»), но его теплофизические свойства в каждом сечении сопла соответствует местным значениям давления и температуры. Показатель процесса расширения на каждом участке сопла определяется из уравнения $\frac{P}{\rho^n} = \text{const}$, как осреднённый для двух крайних значений параметров – в КС и в заданном сечении.

$$\text{Итак, } R = \text{const}; \quad c_p = \text{var}; \quad c_v = \text{var}; \quad n = \frac{\lg\left(\frac{p_\kappa}{p}\right)}{\lg\left(\frac{\rho_\kappa}{\rho}\right)} = \frac{\lg\left(\frac{p_\kappa}{p}\right)}{\lg\left(\frac{p_\kappa \cdot R \cdot T}{p \cdot R \cdot T_\kappa}\right)} = \frac{\lg\left(\frac{p_\kappa}{p}\right)}{\lg\left(\frac{p_\kappa \cdot T}{p \cdot T_\kappa}\right)}.$$

3) **Модель химически равновесного процесса расширения.** Химический состав ПС, приобретенный в КС, и его теплофизические свойства в каждом сечении сопла соответствует местным значениям давления и температуры. Показатель процесса n на каждом участке определяется из уравнения процесса $\frac{P}{\rho^n} = \text{const}$, как осреднённый для двух крайних значений параметр - в камере сгорания и в заданном сечении.

$$\text{Итак: } R = \text{var}, \quad c_p = \text{var}, \quad c_v = \text{var}, \quad n = \frac{\lg\left(\frac{p_\kappa}{p}\right)}{\lg\left(\frac{p_\kappa \cdot T \cdot R}{p \cdot T_\kappa \cdot R_\kappa}\right)}.$$

Здесь скорость прохождения химических реакций бесконечно большая, поэтому химический состав и свойства мгновенно отслеживают изменение давления и температуры. Этот процесс можно условно назвать предельно равновесным.

4) Модель равновесно-неравновесного процесса расширения. Например, до критического сечения процесс равновесный, после - неравновесный. (Промежуточная модель между 2-ой и 3-ей моделями).

В действительном процессе ни одно из перечисленных допущений не выполняется полностью. Здесь реакции рекомбинации в сопле идут обязательно, но не во всём объёме. Таким образом, характеристики действительного процесса находятся в «коридоре» между неравновесным и равновесным процессами расширения.

Использование модели равновесного процесса предпочтительно, т.к. она учитывает реальное изменение состава ПС и корректирует параметры. Естественно, энергетические параметры в равновесном процессе (T, W, H) выше, чем в неравновесном. Для малогабаритных сопел более точен неравновесный процесс, т. к. время пребывания в сопле ПС незначительно и реакции рекомбинации почти не реализуются, для крупногабаритных – равновесный процесс.

Существует много программ термогазодинамического расчёта. Одной из основных является программа "Астра" ("ASTRA"), разработанная в МГТУ профессором Трусовым. Она основана на универсальном методе, базирующемся на принципе максимальной энтропии, которая определяется для КС и остается неизменной до среза сопла. При определении параметров в любом сечении предусматривается двухшаговый процесс:

- определяются параметры в КС для заданных условий;
- по полученной величине энтропии (S) в камере сгорания и одному из заданных параметров в нужном сечении определяются все остальные.

Типовые исходные данные (например, для ЖРД):

- давление в КС и в произвольном сечении сопла,
- условные химические формулы и полные энтальпии компонентов топлива,
- коэффициент избытка окислителя.

ЛЕКЦИИ №26, 27.

3. Термохимические характеристики топлива или его компонентов. Соотношение расходов компонентов, их величина и полная энтальпия.

Под термохимическими характеристиками подразумеваются условные химические формулы (УХФ) с условными молекулярными массами компонентов или топлива, действительное или теоретически необходимое количество окислителя для сгорания горючего, полные энтальпии топлива или отдельных его компонентов и другие показатели.

а. Условная химическая формула (УХФ) и молекулярная масса (μ).

$$\mu = \sum \mu_i b_i,$$

где μ_i - молекулярная масса "i"-го химического элемента,

b_i - число грамм-атомов элемента,

μ - кажущаяся (условная) молекулярная масса топлива или отдельного компонента.

В расчётах используется только УХФ. По своему виду она может совпадать с простой химической формулой.

Например: $H_2 \rightarrow H2$; $H_2O \rightarrow H2O$.

Пусть в компоненте или в топливе имеются элементы: C, H, O, N . Тогда УХФ будет: $C_{bC}H_{bH}O_{bO}N_{bN}$, где b – условное число атомов этих элементов, которое зависит от массовых долей q вещества в смеси и их молекулярных масс μ .

Пример для окислителя АК-27:

$$\left. \begin{array}{ll} N_2O_4 - 27\%, & m.e. \quad q_{N_2O_4} = 0,27 \\ HNO_3 - 70\%, & m.e. \quad q_{HNO_3} = 0,70 \\ H_2O - 3\%, & m.e. \quad q_{H_2O} = 0,03 \end{array} \right\} \text{ известно при изготовлении АК-27.}$$

Молекулярные массы веществ в смеси АК-27:

$$\mu_{N_2O_4} = 2 \cdot 14 + 4 \cdot 16 = 92,$$

$$\mu_{HNO_3} = 1 \cdot 1 + 1 \cdot 14 + 3 \cdot 16 = 63,$$

$$\mu_{H_2O} = 2 \cdot 1 + 1 \cdot 16 = 18.$$

Определим, сколько молей двух веществ приходится на одну долю третьего вещества. В качестве третьего вещества возьмём один моль N_2O_4 . На него приходится x молей HNO_3 и y молей H_2O . И тогда:

$$N_2O_4 + x \cdot HNO_3 + y \cdot H_2O = \sum \text{молей в АК-27}.$$

Для определения x и y составим пропорции:

$$\left. \begin{array}{l} 1 \cdot 92 N_2O_4 - 0,27 \\ x \cdot 63 HNO_3 - 0,7 \\ y \cdot 18 H_2O - 0,03 \end{array} \right\}$$

Следовательно:

$$x = \frac{92 \cdot 0,7}{63 \cdot 0,27} = 3,786 \text{ моль}, \quad y = \frac{92 \cdot 0,03}{18 \cdot 0,27} = 0,568 \text{ моль}.$$

Отсюда:

$$b_N = 2 + 3,786 \cdot 1 + 0 = 5,786,$$

$$b_O = 4 + 3,786 \cdot 3 + 0,568 \cdot 1 = 15,926,$$

$$b_H = 0 + 3,786 \cdot 1 + 0,568 \cdot 2 = 4,922.$$

И тогда УХФ для АК-27 будет (для молей): $N 5.786 O 15.926 H 4.922$.

Удобнее выражать УХФ не через моли, а через килограммы. Для этого полученный результат следует умножить на соотношение $\frac{1000}{\mu_\Sigma}$ и тогда для АК-27 она будет выглядеть

так: $N 16.97 O 46.72 H 14.44$.

Пользоваться можно любой из этих формул.

б. Соотношение расходов компонентов. Коэффициенты соотношения. Зависимость расходов компонентов от соотношения.

Горючее содержит в основном горючие элементы (окисляемые элементы), а окислитель – окисляющие. Однако, в обоих компонентах могут присутствовать элементы противоположного назначения. Например: HNO_3 - окислитель, но Н – горючий элемент, N – нейтральный элемент. Чтобы обеспечить полное сгорание, т. е. полное окисление горючих элементов, нужно обеспечить полное замещение наивысших валентностей окисляющих элементов валентностями окисляемых элементов. У окисляющих, как правило, положительная валентность, а у окисляемых - отрицательная.

Полное окисление: $C \rightarrow CO_2$; $H \rightarrow H_2O$.

В действительности из-за диссоциации наряду с полными окислами могут быть и неполные, например: CO, OH и другие. Могут так же образоваться и окислы NO , хотя теоретически азот является нейтральным. Горючее и окислитель применяются в определённом соотношении расходов. Наилучшее соотношение называется стехиометрическим. Под этим соотношением понимается отношение теоретически минимального количества $[кг]$ окислителя, необходимое для полного окисления $1[кг]$ горючих элементов топлива.

$$K_{то} = \frac{1 \text{ кг окислителя}}{1 \text{ кг горючих элементов топлива}} - \text{коэффициент стехиометрического}$$

соотношения компонентов.

$K_{то}$ - условный, теоретический коэффициент. Он необходим для относительной оценки действительного процесса горения. Его величина определяется двумя способами.

Один из них:

$$K_{mo} = -\frac{\mu_o}{\mu_z} \cdot \frac{(\sum b_i \nu_i)_z}{(\sum b_i \nu_i)_o},$$

где μ_o, μ_z - молекулярные массы окислителя и горючего по УХФ;

b_i - число грамм-атомов "i"-го элемента в УХФ;

ν_i - наивысшая валентность "i"-го элемента.

Знак минус необходим для получения положительного значения K_{mo} .

Наивысшие валентности некоторых химических элементов:

элемент	H	C	N	F	Cl	Al	B	O	Be	Li	Na	K	Mg
валентность	-1	-4	0	+1	+1	-3	-3	+2	-2	-1	-1	-1	-2

Действительное соотношение расходов компонентов определяется как:

$$K_m = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_z} \text{ - коэффициент действительного соотношения компонентов,}$$

где \dot{m}_o - расход окислителя, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$,

\dot{m}_z - расход горючего, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$.

Другой способ определения K_{mo} будет изложен в курсе «Топливо и рабочие процессы» (8-й семестр).

Вместо K_m удобнее использовать коэффициент избытка окислителя $\alpha = \frac{K_m}{K_{mo}}$.

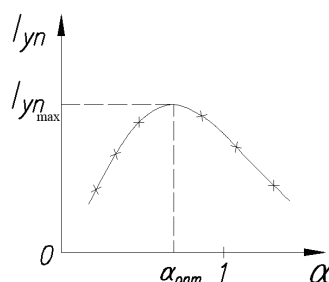
Если $\alpha < 1$ - топливо с недостатком окислителя;

$\alpha > 1$ - топливо с избытком окислителя;

$\alpha = 1$ - стехиометрическое соотношение компонентов топлива;

α_{opt} - термодинамически оптимальное соотношение компонентов, при котором

$I_{yn} = I_{yn}^{\max}$. И здесь график будет выглядеть так:



в. Связь величин расходов компонентов с K_m и α .

$$\dot{m} = \dot{m}_o + \dot{m}_z; \quad K_m = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_z}; \quad \alpha = \frac{K_m}{K_{m0}}.$$

$$\dot{m}_o = K_m \cdot \dot{m}_z; \quad \dot{m} = \dot{m}_z \cdot (1 + K_m); \quad \dot{m}_z = \frac{\dot{m}}{1 + K_m};$$

$$\dot{m}_o = \dot{m} - \dot{m}_z = \dot{m} - \frac{\dot{m}}{1 + K_m} = \frac{K_m \cdot \dot{m}}{1 + K_m}. \text{ И так:}$$

$$\dot{m}_z = \frac{\dot{m}}{1 + K_m}, \quad \dot{m}_o = \frac{K_m \cdot \dot{m}}{1 + K_m}, \text{ или } \dot{m}_z = \frac{\dot{m}}{1 + \alpha \cdot K_{m0}}; \quad \dot{m}_o = \frac{\alpha \cdot K_{m0} \cdot \dot{m}}{1 + \alpha \cdot K_{m0}}.$$

г. Полная энтальпия топлива и компонентов H_n .

$$H_n = H + U_{\text{хим}},$$

где $H = c_p \cdot T$ - энтальпия,

$U_{\text{хим}}$ - химическая энергия компонентов или топлива.

Под $U_{\text{хим}}$ понимается то количество теплоты, которое либо выделяется, либо поглощается при образовании (создании) данного вещества из исходных (стандартных) веществ.

Химическая энергия стандартных веществ принимается за нуль отсчёта. В качестве стандартных веществ берутся газы, имеющиеся в «природном» состоянии, или металлы – в кристаллическом состоянии (O , H , Al , Mg , B и т.д.). Если известны полные энтальпии компонентов, то полная энтальпия топлива будет равна

$$H_n^T = \frac{H_n^z + K_m \cdot H_n^o}{1 + K_m}.$$

Системы отсчёта H_i (в зависимости от T).

Исторически существуют три системы отсчета величины H_n :

1) $20^\circ\text{C} (293\text{K})$; 2) $25^\circ\text{C} (298\text{K})$; 3) $-273^\circ\text{C} (0\text{K})$.

Значения полных энтальпий даются в справочниках.

Для получения достоверных результатов термодинамического расчета следует «привести» значения H_i компонентов в одну из этих систем. Ниже в таблице приведены основные сведения для отдельных компонентов ЖРД:

	Компонент	Условная химическая формула	Полная энтальпия, кДж/кг	Плотность кг/м ³	Температура, К
1	Кислород жидкий	O ₂	-398.3	1135	90
2	Азотная кислота АК-27	H14.44O46.72N16.98	-2377.3	1596	298
3	Азотная кислота HNO ₃ -100%	H1N1O3	-2756	1504	298
4	Азотный тетраоксид	N ₂ O ₄	-212.5	1443	294
5	Фтор жидкий	F ₂	-339.3	1507	85
6	Перекись водорода – 100%	H ₂ O ₂	-5520.4	1442	298
7	Керосин	C _{7.21} H _{13.29}	-1958.1	830	298
8	Несимметричный диметилгидразин (НДМГ)	C ₂ N ₂ H ₈	842	786	298
9	Гидразин	N ₂ H ₄	1559.3	1004	298
10	Аммиак жидкий	N ₁ H ₃	-4185	682	239.7
11	Метан жидкий	C ₁ H ₄	-5566	424	112
12	Аэрозин – 50	H15.5N5.75C2	1198.8	884	298
13	Тонка – 250		-774.2	840	298
14	Водород жидкий	H ₂	-4353.9	70.76	20
15	Этиловый спирт – 95%		-6495.7	803.5	298