

Раздел 4. Проектирование проточной части камеры двигателя.

1. Определение размеров камеры сгорания.

1) Объем КС (на примере ЖРД).

ЛЕКЦИЯ № 34, 35.

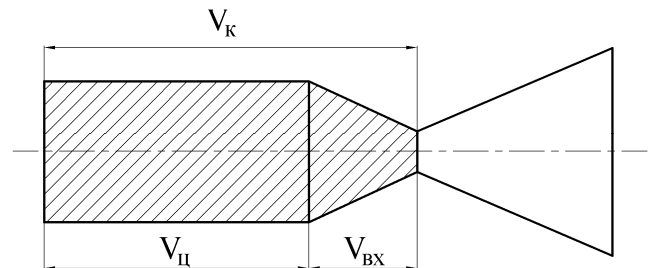
Под объемом КС при проектировании понимается условный объем камеры двигателя до критического сечения сопла, т.е. объем собственно КС + объем докритической части сопла:

$$V_K = V_{\text{ц}} + V_{\text{вх}} \text{ (см. рисунок), где}$$

V_K – условный объём КС,

$V_{\text{ц}}$ – объем КС (цилиндра),

$V_{\text{вх}}$ – объем входной части сопла.



Теоретические методы определения V_K отсутствуют, поэтому используют опытные данные. В РДТТ топливо размещается в КС, поэтому ее объем и форма выбираются из конструкторских и других соображений. Для определения V_K ЖРД используются несколько методов:

1. По времени пребывания ПС в КС;
2. По приведенной длине КС;
3. Другие методы.

а) V_K по времени пребывания.

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{M_K}{\dot{m}}, \text{ где } M_K \text{ – масса продуктов сгорания в КС [кг], } \tau_{\text{пр}} \text{ – условное время,}$$

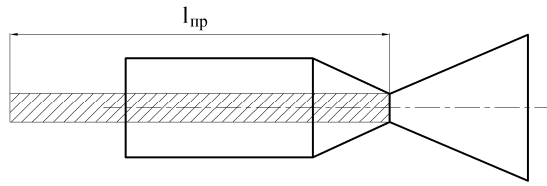
необходимое для завершения всех процессов в КС (для ЖРД это распыливание, испарение, смешение, горение, в РДТТ – подогрев, горение и т.д.) Диапазон величины $\tau_{\text{пр}} = 0,0015 \div 0,005 [с]$.

В курсовом проекте (для начала) принять $\tau_{\text{пр}} = 0,003\text{с}$.

$M_K = V_K \rho_K$, где ρ_K - плотность ПС в КС. $\rho_K = \frac{p_K}{R_K \cdot T_K}$, подставим в $\tau_{\text{пр}}$:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{M_K}{\dot{m}} = \frac{V_K \cdot \rho_K}{\dot{m}} = \frac{V_K \cdot p_K}{R_K \cdot T_K \cdot \dot{m}}. \text{ Отсюда } V_K = \frac{\tau_{\text{пр}} \cdot R_K \cdot T_K \cdot \dot{m}}{p_K}.$$

б) V_K по приведенной длине КС – $l_{\text{пр}}$.



$l_{\text{пр}}$ – условная величина длины КС (см. рисунок).

$$l_{\text{пр}} = \frac{V_K}{F_{\text{кр}}} \rightarrow V_K = l_{\text{пр}} \cdot F_{\text{кр}}.$$

Для различных видов топлив величина $l_{\text{пр}}$ колеблется в диапазоне 0,5...2,5м.

$l_{\text{пр}} = f(p_K)$ - с ростом p_K , а, значит, с повышением интенсивности рабочих процессов в КС объем V_K и $l_{\text{пр}}$ снижаются, но не линейно. Зависимость $\tau_{\text{пр}} = f(p_K)$ аналогичная.

в) связь между $\tau_{\text{пр}}$ и $l_{\text{пр}}$

$V_K = f(\tau_{\text{пр}})$ и $V_K = f(l_{\text{пр}})$. В обоих случаях V_K должен быть один и тот же, значит должна существовать однозначная связь между $l_{\text{пр}}$ и $\tau_{\text{пр}}$.

Известно, что: $l_{\text{пр}} = \frac{V_K}{F_{\text{кр}}}$, где $F_{\text{кр}} = \frac{m\beta}{p_K}$. И тогда

Отсюда $l_{\text{пр}} = \frac{V_K p_K}{\dot{m}\beta}$, где $\beta = \frac{\sqrt{R_K T_K}}{A_K}$, отсюда

$$l_{\text{ПР}} = \frac{V_K \cdot p_K \cdot A_K}{\dot{m} \sqrt{R_K T_K}}. \text{ Известно, что } V_K = \frac{\tau_{\text{ПР}} \cdot R_K \cdot T_K \cdot \dot{m}}{p_K}.$$

$$\text{Отсюда } l_{\text{ПР}} = \frac{\tau_{\text{ПР}} \cdot R_K \cdot T_K \cdot \dot{m} \cdot p_K \cdot A_K}{p_K \cdot \dot{m} \cdot \sqrt{R_K T_K}} = \tau_{\text{ПР}} \sqrt{R_K T_K} \cdot A_K.$$

Так как $R_K, T_K, A_K = \text{const}$ для данных условий, то $l_{\text{ПР}} = \tau_{\text{ПР}} \cdot \text{const}$.

Задаваясь $l_{\text{ПР}}, \tau_{\text{ПР}}$ определим величину V_K .

2. Определение поперечных размеров КС.

Площадь поперечного сечения F_K определяется с помощью её относительной площади \bar{F}_K , где

$$\bar{F}_K = \frac{F_K}{F_{KP}} \rightarrow F_K = \bar{F}_K \cdot F_{KP}. \text{ Величина } \bar{F}_K - \text{ берется из опыта, при этом } \bar{F}_K = 3 \dots 5.$$

Если $\bar{F}_K < 3$ - КС неизобарическая, при $F_K = 1$ - камера называется скоростной.

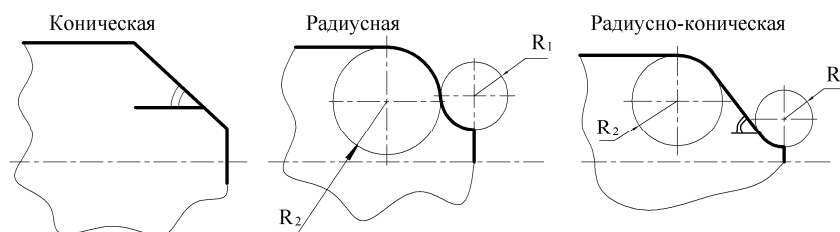
При проектировании следует находиться во всех рекомендуемых диапазонах $\tau_{\text{ПР}}, l_{\text{ПР}}, \bar{F}_K$.

2) Проектирование дозвуковой части сопла.

Форма КС может быть цилиндрической, конической, сферической и комбинированной. Она выбирается из конструкторских и технологических соображений, эффективности рабочих процессов, прочности и др.

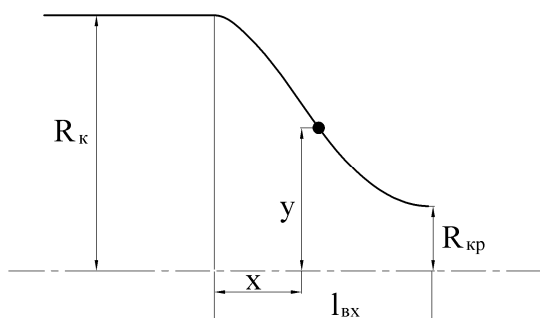
Форма дозвуковой части сопла бывает (см. рисунки):

- Конической, радиусной, радиусно-конической, либо задана по аналитическим зависимостям.



В курсовом проекте принимаем радиусную форму.

Профиль Витошинского (аналитическая зависимость):



$$y = \frac{R_{KP}}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_{KP}}{R_K} \right)^2 \frac{\left[1 - \left(\frac{x}{l_{ex}} \right)^2 \right]^2}{\left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{x}{l_{ex}} \right)^2 \right]^3} \right]}}$$

x, y - текущие координаты, R_K, R_{KP} - из расчета, l_{ex} - выбирается ($l_{ex} \geq 2R_K$).

Профиль Витошинского часто используется в РДТТ с «утопленным» соплом наряду с эллипсной формой. Кроме того, сопло Витошинского используется на стендах как расходомерное. Недостаток: большая длина.

Рассмотрим только один вариант профилирования докритической части камеры двигателя.

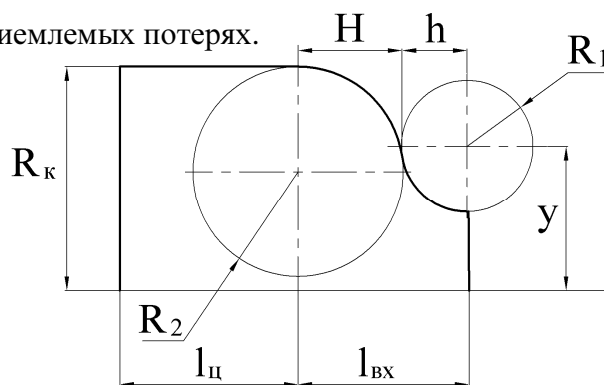
КС – цилиндр, днище – плоское, входная часть – радиусная.

Радиусная форма самая короткая при приемлемых потерях.

R_K, R_{KP} - из расчета,

R_1, R_2 - задаются,

$R_1 = f(\mu_c)$. Обычно $R_1 = 2R_{KP}$,



$R_2 = f(p_K)$ При этом величину R_2 можно выразить через $\rho_K = \frac{R_2}{R_K}$:

если $p_K \leq 4 \text{ МПа} \rightarrow \rho_K = 1$,

если $p_K = 4 \dots 20 \text{ МПа} \rightarrow \rho_K = 0,25 \cdot p_K$ (где p_K в МПа),

если $p_K > 20 \text{ МПа} \rightarrow \rho_K = 5$ (но может быть и меньше).

Рабочие формулы при проектировании:

$$l_{\text{ex}} = R_{KP} \sqrt{\left(2 + \rho_K \sqrt{F_K}\right)^2 - \left[(\rho_K - 1) \sqrt{F_K} + 3\right]^2},$$

$$H = l_{\text{ex}} - h; \quad h = \frac{2l_{\text{ex}}}{2 + \rho_K \sqrt{F_K}}, \quad y = \frac{R_{KP}}{l_{\text{ex}}} \left(h \sqrt{F_K} + H\right) - \text{координаты точки сопряжения}$$

двух окружностей,

$$l_{\text{ц}} = \frac{V_{\text{ц}}}{F_K} = \frac{V_K - V_{BX}}{F_K}, \quad V_{BX} = ?, \quad \text{где } V_{BX} - \text{объем входной дозвуковой части.}$$

$$V_{BX} = \frac{1}{6} F_{KP} \left[2H (2\bar{F}_K + \bar{y}^2) + h (\bar{y}^2 + \bar{y} + 4) \right], \quad \text{где } \bar{y} = \frac{y}{R_{KP}}$$

$$l_{\text{ц}} \approx (1 \dots 1,1) D_K - \text{рекомендуемая длина цилиндра при проектировании.}$$

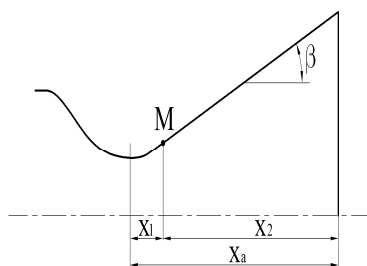
Для радиусного сопла все формулы, кроме V_{BX} , являются точными. Поверхность входной части криволинейная, поэтому ее объем можно вычислить точно, но только путем интегрирования. Здесь дана приближенная формула для V_{BX} .

3) Проектирование сверхзвуковой части сопла.

Цель проектирования – получение наибольшего значения $I_{y_{\text{max}}}$ при минимальных габаритах. Выбор контура определяется тактико-техническими, конструктивно-технологическими и экономическими требованиями к двигателю и всей ракете.

а) виды контуров

Конический (см. рисунок):



β – угол полураствора сопла,

M – точка сопряжения контуров,

$x_a = x_1 + x_2$ – длина сверхзвуковой части,

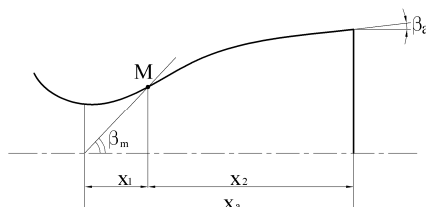
x_1 – криволинейный участок (чаще – радиусный),

x_2 – конический участок.

(В курсовом проекте точка M «стоит» в критическом сечении).

Оптимизацию угла растворов конического сопла изложена выше. Преимущества: простота и дешевизна изготовления. Недостатки: большие продольные габариты, чем у профилированного контура и большие потери I_y . Используется для тактических и оперативных ракет (малых и средних).

Профилированный (см. рисунок):



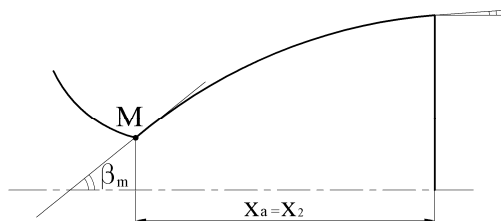
Сверхзвуковая часть сопла представляет собой криволинейную поверхность, образованную вращением контура вокруг оси сопла. Контур участка x_2 близок к параболе и определяется, как правило, методом характеристик. Преимущества и недостатки соответственно противоположны коническим соплам. Здесь:

β_a – угол между касательной к контуру на срезе и осью сопла, $\beta_a = 6...9^\circ$,

β_m – максимальный угол наклона профиля к оси сопла,

M – точка сопряжения контуров.

Если перенести точку M в критическое сечение, то получится предельный случай профилированного контура. Такое сопло называется **соплом с угловым входом (угловой точкой)** в критическом сечении (см. рисунок). Очевидно, что это самое короткое сопло при $F_{KP}, F_a, \beta_a = const$ (это преимущество).



Недостаток: большие потери за счет вихревого отрывного течения за критическим сечением.

**б) приближенное проектирование сверхзвуковой части сопла с угловым входом
(точкой) в критическом сечении**

Типовые исходные данные:

$n, R_{кр}, R_a$ – из расчета, β_a – выбирается из рекомендуемого диапазона,

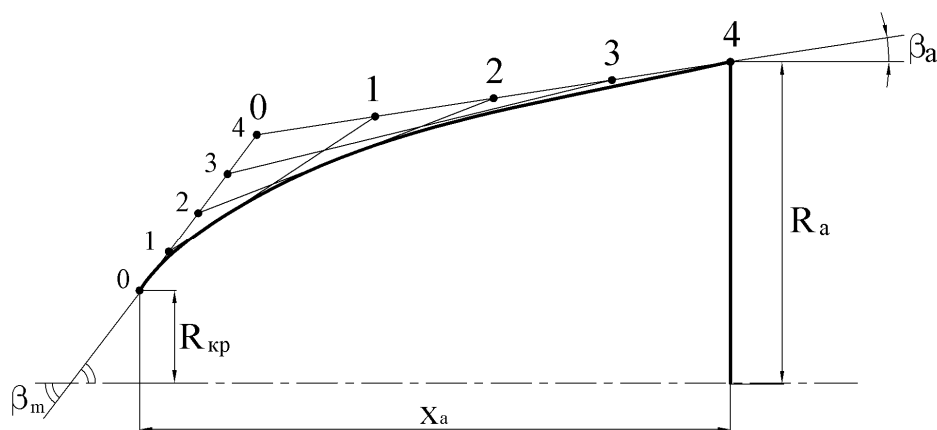
x_a, β_m – неизвестные, для их определения проводятся предварительные расчеты контуров на ЭВМ, результаты сводятся в таблицах и графиках.

Для курсового проекта взять таблицу 10.3 в книге Кудрявцева В.М. Для пользования

таблицей нужно знать: n, β_a и $\bar{D}_a = \frac{D_a}{D_{кр}}$. Отсюда по таблице $\rightarrow \bar{x}_a$ и β_m , β_m – в

радианах (перевести в градусы), где $\bar{x}_a = \frac{x_a}{R_{кр}}$, $\rightarrow x_a = \bar{x}_a R_{кр}$.

Построение контура



1. Проводится ось сопла,
2. Откладывается длина x_a ,
3. На концах длины откладываются радиусы $R_{кр}, R_a$
4. Строятся лучи под углами β_m, β_a ,
5. Лучи разбиваются на участки – равное число и их нумерация,
6. Соединить одноименные точки,

7. Проводится огибающая кривая.

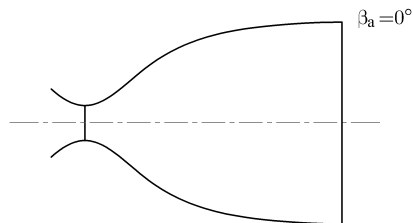
Для принятия граничных условий данная кривая близка к параболе.

При выборе величины β_a следует учитывать, что чем меньше p_a или чем больше

$\frac{F_a}{F_{кр}}$, тем больше выбирается β_a .

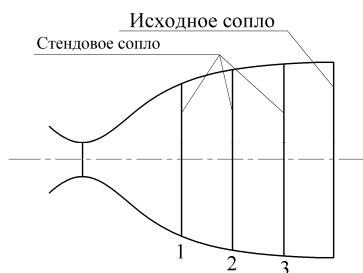
в) исходное, укороченное и оптимальное сопло

1. Исходное сопло



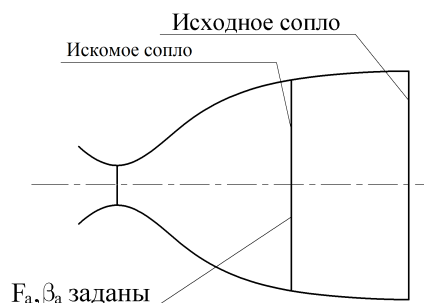
Исходное (базовое) сопло с заданной площадью среза – это сопло с одномерным потоком на выходе ($\beta_a = 0$). В ракетных двигателях оно не используется из-за габаритов и массы, и применяется для создания одномерного сверхзвукового потока в аэродинамических трубах.

2. Укороченное стендовое сопло



Это сопло, получаемое простым уменьшением длины исходного сопла $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$. Такие сопла используются на ранней стадии стендовой отработки двигателя (или камеры), исходя из экономических соображений, без использования эжектора (газодинамической трубы). Например: если измерение P требуется, то для высотного двигателя на Земле это невозможно без дорогостоящего эжектора. Он предназначен для создания на срезе сопла пониженного давления, при котором в сопло не входит скачок уплотнения. Здесь к измеренной на стенде тяге камеры с укороченным соплом добавляется расчетное значение доли тяги, которую могла бы дать отрезанная часть сопла.

3. Искомое укороченное сопло



Все искомые сопла получены из исходных путем укорочения единственно возможного исходного сопла так, чтобы $F_a = F_{a_{\text{задан.}}}$, $\beta_a = \beta_{a_{\text{задан.}}}$.

Для выполнения обоих условий нужно из всех расчетных исходных контуров с заведомо большей F_a выбрать единственный, который удовлетворяет не только F_a , но и β_a .

4. Оптимальное сопло

- 1- тяга без учета трения,
- 2- тяга с учетом трения,
- 3 - контур сопла,
- 4- тяга исходного сопла,
- 5- тяга оптимального сопла.

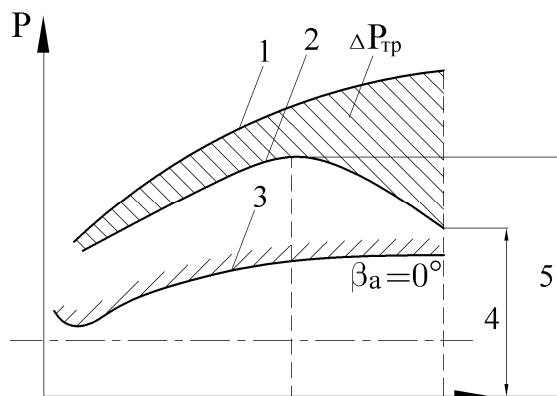


График тяги 2 ниже графика 1 по всей длине из-за трения газа о стенку: $\Delta P_{\text{тр}} = P_1 - P_2$. График 2 имеет максимум. Поскольку тяга есть проекция интеграла сил давления, то хвостовой участок сопла вносит тем меньшую долю тяги, чем он ближе к срезу. С некоторого момента прирост тяги от хвостового участка не может компенсировать прирост потерь от трения. Сопло с $P = P_{\text{max}}$ называется оптимальным для заданного контура.

г) схема течения в сопле с исходным контуром ($\beta_a = 0$)

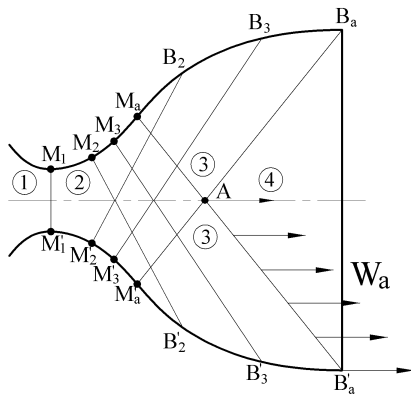
Исходные контуры определяются в расчетах методом характеристик. Результаты расчетов сведены в таблицы в относительных координатах контура. Однако, это справедливо лишь для газового потока в ЖРД. Для РДТТ при наличии в потоке К-фазы используются специальные программы профилирования сопел, предотвращающие высадку К-фазы на стенку.

Характеристика – это бесконечно слабая волна разряжения, при переходе через которую изменяется и величина, и направление скорости. Эти характеристики возможны только в сверхзвуковом потоке. Использование характеристик в расчетах – это условный прием, позволяющий получить достаточно точный контур сопла.

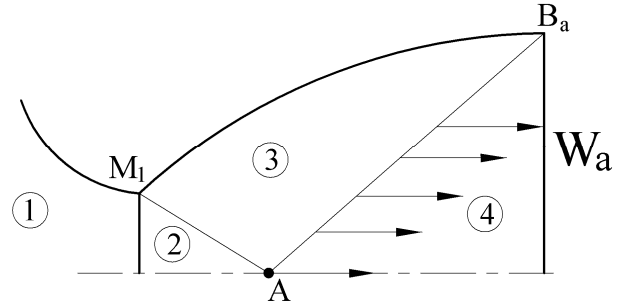
Рассмотрим упрощенные схемы течения в обычном сопле и сопле с угловой точкой в критическом сечении (см. рисунки).

Схема течения с исходным контуром ($\beta_a = 0$)

а) Обычное сопло



б) Сопло с угловой точкой



MB - характеристики разрежения,

$M.M'_1$ - входная характеристика ($W = W_{кр}$),

$M_a B'_a, M'_a B_a$ - выходная, последняя характеристика ($W = W_a$),

п. M_a, M'_a - точка перегиба профиля ($\beta = \beta_m$),

п. \dot{R} - скорость потока равна W_a ,

1) - область дозвукового течения ($W < W_{кр}$),

2) - $M.M_a A M'_a M'_1$ - область предварительного расширения,

3) - $M_a B_a A B'_a M'_a$ - область выравнивания потока,

4) - $B_a A B'_a$ - область одномерного потока ($W = W_a$).