

Исходные данные для курсового проектирования:

**Дано:**

Основные характеристики УБР

$L_{max} := 6000 \text{ km}$  - дальность полета

$n_{ББ} := 4$  - число боевых блоков (ББ)

Параметры поражаемых целей

Точечная цель

$\Delta P_{\phi} := 8 \text{ MPa}$  - давление во фронте ударной волны, требуемое для поражения точечной цели

$P_{1mp}' := 0.9$  - требуемая вероятность поражения точечной цели

$\sigma_r := 0.15 \text{ km}$  - среднеквадратичное отклонение точки падения боевого блока от точки прицеливания

Площадная цель

$\Delta p_{\phi} := 0.03 \text{ MPa}$  - давление во фронте ударной волны, требуемое для поражения площадной цели

$M_{1mp}' := 0.9$  - требуемое математическое ожидание поражения части площадной цели

$R_{\psi} := 3 \text{ km}$  - требуемый радиус поражения площадной цели

$\Delta L := 200 \text{ km}$  - параметры разведения боевых блоков

$\Delta B := 100 \text{ km}$

Требования к УБР

$\tau_{\Sigma} := 125 \text{ s}$  - суммарное время работы ДУ маршевых ступеней, не более

$h_k := 100 \text{ km}$  - высота окончания АУТ, не более

$n_{x,max} := 20$  - допустимая осевая перегрузка, не более

$T_{экснл} := 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$        $T_{min} := -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$        $T_{max} := 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$  - температурный режим эксплуатации

$\Delta T := 40$

Характеристики топлива

$J_{1T.0} := 2520 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  - удельный импульс при стандартных условиях.

$\rho_T := 1.81 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$  - плотность топлива

$u_{min} := 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$        $u_{max} := 13 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  - диапазон скоростей горения топлива при стандартных условиях

$\nu := 0.25$  - показатель степени в законе горения

$K_T := 0.0015$  - коэффициент теплопроводности топлива

$\Delta u'_1 = \frac{\Delta u_1}{u_1}$        $\Delta u'_1 := 0.02$  - разброс скоростей горения топлива

$\Delta_{cl} := 0.035$  - случайная составляющая отклонения давления от номинального значения

$k := 1.15$  - показатель адиабаты продуктов сгорания

$z := 0.33$  - массовая доля конденсированной фазы в продуктах сгорания

$J_{1ДУ} := 2100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  - удельный импульс топлива доводочной ДУ

**Базирование: мобильное (ПГРК)**

**Материалы:**

- органопластик

$\sigma_K := 130 \text{ km}$  - удельная прочность материала силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

$\rho_{cp} := 1.1 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$  - средняя плотность ТЗП силовых оболочек корпусов ДУ ступеней

## 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

### 1.1 Определение требуемых значений параметров боевого оснащения

Стрельба по точечной цели:

$$K_u := 0.97 \cdot \left( \frac{\Delta P_\phi}{\text{МПа}} \right)^{-0.37} = 0.449 \quad - \text{коэффициент защищенности точечной цели}$$

$$q_{1\text{норм.пл}} := \left( \frac{2}{n_{\text{ББ}}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{\sigma_r}{K_u} \right)^3 \cdot \left( \ln \left( \frac{1}{1 - P_{1\text{мп}'}} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\text{км}^3} = 0.046$$

Стрельба по площадной цели:

$$K_u := 0.78 \cdot \left( \frac{\Delta p_\phi}{\text{МПа}} \right)^{-0.5} = 4.503 \quad - \text{коэффициент защищенности площадной цели}$$

$$q_{1\text{норм.пл}} := \left( \frac{M_{1\text{мп}'}}{n_{\text{ББ}}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left( \frac{R_u}{K_u} \right)^3 \cdot \frac{1}{\text{км}^3} = 0.032$$

Выберем большее значение потребной мощности:

$$q_{1\text{норм}} := 0.046$$

|                      |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q, Мт                | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,5 |
| m <sub>ББ</sub> , кг | 100 | 135 | 185 | 270 | 320 | 450 |

Из таблицы выберем ближайшее большее значение массы ББ:

$$m_{\text{ББ}} := 100 \text{ кг} \quad (\text{при } q = 0.1)$$

Теперь определим геометрические характеристики ББ:

$$d_{\text{ББ}} := 0.037 \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{ББ}}}{\text{кг}}} \text{ м} = 0.37 \text{ м} \quad - \text{диаметр ББ}$$

$$l_{\text{ББ}} := 3.5 \cdot d_{\text{ББ}} = 1.3 \text{ м} \quad - \text{длина ББ}$$

$$R := 0.1 \cdot d_{\text{ББ}} = 0.037 \text{ м} \quad - \text{радиус закругления носка ББ}$$

$$m_{\text{БО}} := n_{\text{ББ}} \cdot m_{\text{ББ}} = 400 \text{ кг} \quad - \text{масса боевого оснащения}$$

### 1.2 Боевая ступень

$$m_{\text{ПЛ}} := 10 \text{ кг} \cdot n_{\text{ББ}} + 0.1 \cdot m_{\text{БО}} = 80 \text{ кг} \quad - \text{масса платформы разведения}$$

$$m_{\text{СУ}} := 95 \text{ кг} + \sqrt[2]{n_{\text{ББ}}} \cdot 5 \text{ кг} = 105 \text{ кг} \quad - \text{масса системы управления и приборного отсека}$$

$$m_{\text{КБС}} := 45 \text{ кг} + 0.06 \cdot m_{\text{БО}} = 69 \text{ кг} \quad - \text{масса конструкции боевой ступени (приборный и агрегатный отсеки)}$$

Параметры доводочной ДУ

В качестве начального значения массы полезной нагрузки примем ее следующее приближенное значение, полученное по алгоритму из пособия [2].

$K_3 := 1.10$  - коэффициент учета затрат массы на защиту УБР от ПФЯВ и ОНФП

$K_S := 1.00$  - коэффициент учета влияния размера зоны разведения УБР с РГЧ

$K_L := \left( \frac{10000 \cdot m}{L_{max}} \right)^{0.15} = 0.383$  - коэффициент учета значения максимальной дальности стрельбы

Приближенное значение массы полезной нагрузки:

$$m'_{\Pi H} := K_3 \cdot (155 \cdot kg \cdot n_{ББ}^{0.156} + 1.16 m_{БО}) \left( 1 + 0.132 \cdot (2 \cdot n_{ББ} - 1) \cdot \frac{K_S \cdot K_L}{n_{ББ}} \right) = 785.958 \text{ kg}$$

$$m_{\Pi H} := m'_{\Pi H}$$

Полный запас топлива двухрежимной доводочной ДУ с РГЧ

$$\omega = \Delta\omega_{zap} + \sum_{q=1}^q \Delta\omega_{нав1} + \sum_{p=1}^p \Delta\omega_{раз1}$$

где  $\sum_{q=1}^q \Delta\omega_{нав1}$  и  $\sum_{p=1}^p \Delta\omega_{раз1}$  - затраты топлива на участках наведения и разведения (переприцеливания);

q и p - число участков наведения и операций разведения

$$L'_{V_k} := 2.78 \cdot \frac{km}{\frac{m}{s}} \quad \text{- производная дальность по конечной скорости}$$

$$B'_{VB} := 0.97 \cdot \frac{km}{\frac{m}{s}} \quad \text{- производная бокового отклонения по боковой скорости}$$

$$\Delta L_{zap} := 0.04 \cdot L_{max} = 240 \text{ km}$$

$$\Delta V_{zap} := \frac{\Delta L_{zap}}{L'_{V_k}} = 86.331 \frac{m}{s} \quad \text{- необходимая величина приращения скорости для компенсации максимального недолета на участке работы маршевых ступеней}$$

$$\Delta V_{\Delta L1} := \frac{\Delta L}{L'_{V_k}} = 71.942 \frac{m}{s} \quad \text{- необходимая величина приращения скорости для единичной операции разведения ББ по дальности на величину } \Delta L$$

$$\Delta V_{\Delta B1} := \frac{\Delta B}{B'_{VB}} = 103.093 \frac{m}{s} \quad \text{- необходимая величина приращения скорости для единичной операции разведения ББ в боковом направлении на величину } \Delta B$$

$$\alpha := 15^\circ \quad \text{- угол наклона прямых сопел доводочной ДУ к оси БС}$$

Тогда потребные затраты топлива доводочной ДУ на компенсацию погрешностей работы маршевых ступеней:

$$\Delta\omega_{zap}(m_{\Pi H}) := \Delta V_{zap} \cdot \frac{m_{\Pi H}}{J_{1ДУ} \cdot \cos(\alpha)}$$

$$\Delta\omega_{zap}(m_{\Pi H}) = 33.451 \text{ kg}$$

Единичные операции разведения элементов БО по дальности и в боковом направлении:

$$\Delta\omega_{L1} = \Delta V_{\Delta L1} \cdot \frac{m_{\Pi H\lambda}}{J_{1ДУ} \cdot \cos(\alpha)} \quad , \text{ где } m_{\Pi H\lambda} \text{ и } m_{\Pi H\rho} - \text{ текущее значение массы полезной нагрузки в начале единичной операции разведения ББ по } \lambda - \text{ направлению (дальности) и по } \rho - \text{ направлению (по боку)}$$

$$\Delta\omega_{B1} = \Delta V_{\Delta B1} \cdot \frac{m_{\Pi H\rho}}{J_{1ДУ} \cdot \cos(\alpha)}$$

Расчет  $\sum_{q=1}^q \Delta\omega_{нав1}$  выполняем с учетом четырех участков наведения одного ББ на одну цель

(по числу ББ)

$$P_{\min}(m_{\Pi H}) := 0.5 \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m_{\Pi H}$$

- уровень тяги доводочных ДУ с РГЧ на пониженном режиме

$$P_{\max}(m_{\Pi H}) := 2.5 \cdot \frac{m}{s^2} \cdot m_{\Pi H}$$

- уровень тяги доводочных ДУ с РГЧ на повышенном режиме

$$t_{\text{нав1}} := 20 \cdot s$$

- продолжительность каждого участка

$$\beta := 25^\circ$$

- угол наклона обратных сопел к оси БС

$$\Delta\omega_{\text{нав1}}(m_{\Pi H}) := P_{\min}(m_{\Pi H}) \cdot \frac{t_{\text{нав1}}}{J_{\text{ДУ}} \cdot \cos(\beta)}$$

$$\sum_{q=1}^4 \Delta\omega_{\text{нав1}}(m_{\Pi H}) = 16.518 \text{ kg}$$

Расчет  $\sum_{p=1}^p \Delta\omega_{\text{разв1}}$  проводим для единичных операций разведения по дальности и в боковом направлении по следующей схеме:

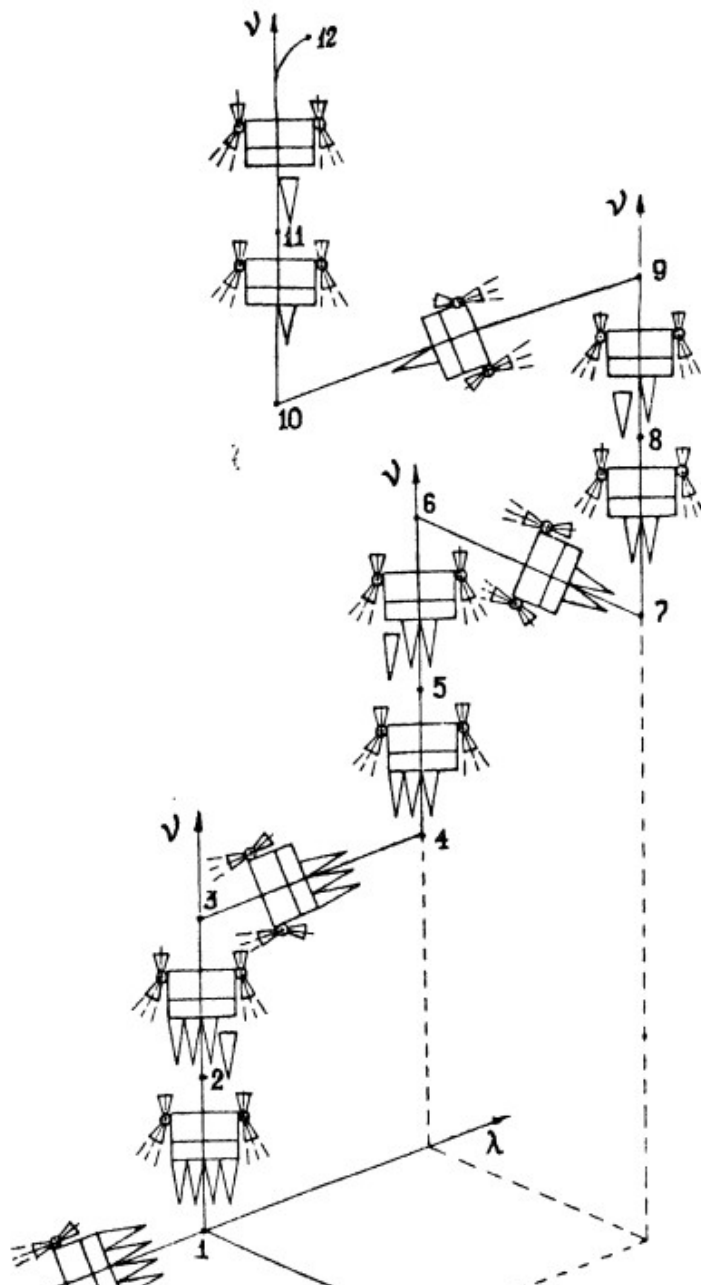


Рис. 7.6. Схема функционирования полезной нагрузки УБР с РГЧ ( $n_{\text{ББ}} = 4$ ) на участке работы доводочной ДУ:  
 0-I - компенсация недолета маршевых ступеней; I-2, 4-5, 7-8, 10-II - разворот и стабилизация движения по V-направлению; 2-3 - отход от ББ № I и разворот на  $\lambda$ -направление; 3-4 - разведение (перенацеливание) на 2-ю цель ( $\Delta V_{\Delta L}$ ); 5-6 - отход от ББ № 2 и разворот на  $\rho$ -направление; 6-7 - разведение (перенацеливание) на 3-ю цель ( $\Delta V_{\text{В}}$ ); 8-9 - отход от ББ № 3 и разворот на  $\lambda$ -направление; 9-10 - разведение (перенацеливание) на 4-ю цель ( $\Delta V_{\Delta L}$ ); II-12 - отход от ББ № 4 и ввод БС;  
 2 - отделение ББ № I;  
 5 - отделение ББ № 2;  
 8 - отделение ББ № 3;



11  
ББ № 4 - отделение

$$\sum_{p=1}^p \Delta \omega_{раз1} = \sum_{p=1}^{p_L} \Delta \omega_{L1} + \sum_{p=1}^{p_B} \Delta \omega_{B1} \quad , \text{ где } p_L \text{ и } p_B - \text{ число реализуемых операций перенацеливания по дальности и в боковом направлении}$$

$$\text{Так как } m_{ПН\lambda}(m_{ПН}) := m_{ПН} - \Delta \omega_{гор}(m_{ПН}) - m_{ББ}$$

$$\Delta \omega_{L1}(m_{ПН}) := \Delta V_{\Delta L1} \cdot \frac{m_{ПН\lambda}(m_{ПН})}{J_{1ДУ} \cdot \cos(\alpha)}$$

$$m_{ПН\lambda}(m_{ПН}) = 652.508 \text{ kg}$$

$$\Delta \omega_{L1}(m_{ПН}) = 23.142 \text{ kg}$$

$$\text{Соответственно } m_{ПН\rho}(m_{ПН}) := m_{ПН\lambda}(m_{ПН}) - \Delta \omega_{L1}(m_{ПН}) - m_{ББ}$$

$$\Delta \omega_{B1}(m_{ПН}) := \Delta V_{\Delta B1} \cdot \frac{m_{ПН\rho}(m_{ПН})}{J_{1ДУ} \cdot \cos(\alpha)}$$

$$m_{ПН\rho}(m_{ПН}) = 529.365 \text{ kg}$$

$$\Delta \omega_{B1}(m_{ПН}) = 26.904 \text{ kg}$$

$$\Delta \omega_{раз1}(m_{ПН}) = 73.189 \text{ kg}$$

$$\text{Тогда } \sum_{p=1}^3 \Delta \omega_{раз1}(m_{ПН}) := \sum_{p=1}^2 \Delta \omega_{L1}(m_{ПН}) + \sum_{p=1}^1 \Delta \omega_{B1}(m_{ПН})$$

Общий запас топлива доводочной ДУ :

$$\omega(m_{ПН}) := \Delta \omega_{гор}(m_{ПН}) + \sum_{q=1}^4 \Delta \omega_{наг1}(m_{ПН}) + \sum_{p=1}^1 \Delta \omega_{раз1}(m_{ПН})$$

$$\omega_{ДУБС}(m_{ПН}) := \omega(m_{ПН}) - \text{масса топлива доводочной ДУ БС}$$

$$m_K(m_{ПН}) := 13.8 \text{ kg}^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{\omega_{ДУБС}(m_{ПН})}$$

- масса конструкции доводочной ДУ

$$m_{ДУБС}(m_{ПН}) := 13.8 \text{ kg}^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{\omega_{ДУБС}(m_{ПН})} + \omega_{ДУБС}(m_{ПН})$$

- масса доводочной ДУ БС

$$m_{ДУБС}(m_{ПН}) = 191.817 \text{ kg}$$

$$\text{где } \omega_{ДУБС}(m_{ПН}) = 123.158 \text{ kg} - \text{масса топлива доводочной ДУ БС}$$

$$m_K(m_{ПН}) = 68.659 \text{ kg}$$

$$\omega_{ДУБС}(m_{ПН}) = 123.158 \text{ kg}$$

$$m_{ПНn}(m_{ПН}) := K_3 \cdot (m_{БО} + m_{ПЛ} + m_{СУ} + m_{КБС} + m_{ДУБС}(m_{ПН}))$$

- масса полезной нагрузки

$$m_{ПН1} := m_{ПНn}(m_{ПН}) = 930.399 \text{ kg}$$

Полученное значение массы полезной нагрузки отличается от значения первого приближения  $m'_{ПН} = 785.958 \text{ kg}$  на  $m_{ПН1} - m_{ПН} = 144.441 \text{ kg}$ , поэтому требуется второе приближение.

Второе приближение:

$$m_{ПН} := 935 \text{ kg}$$

$$m_{ПНn}(m_{ПН}) = 964.737 \text{ kg}$$

$$m_{ПНn}(m_{ПН}) - m_{ПН} = 29.737 \text{ kg}, \text{ поэтому требуется третье приближение.}$$

Третье приближение:

$$m_{ПН} := 970 \text{ kg}$$

$$m_{ПНn}(m_{ПН}) = 972.712 \text{ kg}$$

$$\text{Окончательно примем } m_{ПН} := 975 \text{ kg}$$

$$R_{minДД} := 0.5 \cdot \frac{N}{kg} \cdot m_{ПН} = 487.5 \text{ N}$$

- тяга двигателя доводки в пониженном режиме

$$R_{maxДД} := 2.5 \cdot \frac{N}{kg} \cdot m_{ПН} = (2.438 \cdot 10^3) \text{ N}$$

- тяга двигателя доводки в повышенном режиме

$$m'_{\min DD} := \frac{R_{\min DD}}{J_{1DU}} = 0.232 \frac{kg}{s} \quad - \text{секундные массовый расход в пониженном режиме}$$

$$m'_{\max DD} := \frac{R_{\max DD}}{J_{1DU}} = 1.161 \frac{kg}{s} \quad - \text{секундные массовый расход в повышенном режиме}$$

## 2. ПРИБЛИЖЕННОЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

2.1 Определение требуемого значения скорости в конце АУТ и характеристической скорости по заданной дальности

Для дальности 6000 км из таблицы 2 следует:

Баллистические параметры ракет для различных дальностей полета

| $L$ ,<br>км | $h_k$ ,<br>км | $l_k$ ,<br>км | $\theta_k^*$ ,<br>град | $V_k$ ,<br>м/с | $\partial L / \partial V_k$ ,<br>км/м/с | $\partial L / \partial h_k$ ,<br>км/км | $\Delta V_c$ ,<br>м/с |
|-------------|---------------|---------------|------------------------|----------------|---|--|-----------------------|
| 500         | 50            | 46            | 43,9                   | 1986           | 0,42                                    | 0,96                                   | 1150                  |
| 1000        | 70            | 60            | 42,7                   | 2817           | 0,66                                    | 1,08                                   | 1150                  |
| 2500        | 100           | 130           | 38,4                   | 4318           | 1,234                                   | 1,52                                   | 1150                  |
| 4500        | 135           | 200           | 34,9                   | 5476           | 2,06                                    | 2,17                                   | 1100                  |
| 6000        | 150           | 250           | 31,5                   | 6049           | 2,78                                    | 2,83                                   | 1100                  |
| 8000        | 150           | 300           | 27,0                   | 6606           | 4,04                                    | 3,88                                   | 1100                  |
| 10000       | 150           | 350           | 22,5                   | 7012           | 5,69                                    | 5,33                                   | 1000                  |
| 12000       | 150           | 370           | 18,0                   | 7303           | 8,0                                     | 7,43                                   | 1000                  |

$$L'_{VKM} := [0.66 \quad 1.23 \quad 2.05 \quad 2.78 \quad 4.04 \quad 5.69 \quad 8]^T \frac{km}{m/s}$$

$$\theta'_{KM} := [42.7 \quad 38.4 \quad 34.9 \quad 31.5 \quad 27 \quad 22.5 \quad 18]^T deg$$

$$L_M := [1000 \quad 2500 \quad 4500 \quad 6000 \quad 8000 \quad 10000 \quad 12000]^T km$$

$$h_k := 150 km \quad \Delta V_C := 1100 \frac{m}{s} \quad R := 6371 km$$

$$r_k := R + h_k = (6.521 \cdot 10^3) km \quad \mu_0 := 3.986 \cdot 10^5 \frac{km^3}{s^2}$$

$$V_1 := \sqrt[2]{\frac{\mu_0}{r_k} \cdot \frac{1}{1 + \frac{h_k}{L_{max}}}} = (7.628 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$V_k := V_1 \cdot \left( 1 - \tan \left( \frac{\pi}{4} \cdot \left( 1 - \frac{L_{max}}{\pi \cdot R} \right) \right)^2 \right)^{0.5} = (6.026 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$K_V V_K := V_k + \Delta V_C = (7.126 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

2.2 Распределение относительных масс топлива по ступеням ракеты:

Необходимо нулевое приближение:

$$\mu_{cp} = \mu_1 = \mu_2$$

Из опыта ракетостроения можно принять в рамках приближенного проектирования следующие значения:

$$\mu_1 = 0.9 \cdot \mu_{cp} \quad \mu_2 = 1 - \frac{\exp \left( -\frac{K_V V_K}{J_{1cp}} \right)}{(1 - \mu_1)}$$

Тогда

$$J_{1\Gamma 1} := 1.095 \cdot J_{1T,0} = (2.759 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$J_{1\Gamma 2} := 1.135 \cdot J_{1T,0} = (2.86 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$J_{1cp} := \frac{J_{1\pi 1} + J_{1\pi 2}}{2} = (2.81 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$\mu := 1 - \sqrt[2]{\exp\left(-\frac{K_V V_K}{J_{1cp}}\right)} = 0.719$$

$$\mu_1 := 0.9 \cdot \mu = 0.647$$

$$\mu_2 := 1 - \frac{\exp\left(-\frac{K_V V_K}{J_{1cp}}\right)}{(1 - \mu_1)} = 0.776$$

2.3 Время работы ДУ ступеней, уточнение коэффициентов  $\mu_i$

Из рекомендаций:  $\tau_{N1} = 55 \dots 60 \text{ s}$   $\tau_{N2} = 50 \dots 55 \text{ s}$

Необходимо соблюдение условия в связи с отклонением среднего давления от номинального значения:

$$\Sigma \tau_{Ni} \leq \tau_{\Sigma} \cdot \left(1 - \frac{\Delta p}{p_N}\right) \quad \frac{\Delta p}{p_N} = \Delta p p_N \quad \Delta T := 40$$

$$\Delta p p_N := \frac{1}{1 - \nu} \cdot \sqrt[2]{(\Delta u'_1)^2 + \Delta_{cn}^2 + (K_T \cdot \Delta T)^2} = 0.096$$

$$\Sigma \tau_{Ni} := \tau_{\Sigma} \cdot (1 - \Delta p p_N) = 112.953 \text{ s}$$

Примем, что  $\tau_{N1} := 57 \text{ s}$   $\tau_{N2} := 55 \text{ s}$

Теперь при принятом времени работы каждой ступени необходимо проверить соответствие коэффициентов  $\mu_i$  на ограничение осевой перегрузки для 2 ступени:

$$\mu_i \leq \frac{\tau_{Ni} \cdot g \cdot n_{x,max} \left(1 - \frac{\Delta p}{p_N}\right)}{J_{1\pi i} + \tau_{Ni} \cdot g \cdot n_{x,max} \left(1 - \frac{\Delta p}{p_N}\right)}$$

Тогда для второй ступени

$$\frac{\tau_{N2} \cdot g \cdot n_{x,max} \cdot (1 - \Delta p p_N)}{J_{1\pi 2} + \tau_{N2} \cdot g \cdot n_{x,max} \cdot (1 - \Delta p p_N)} = 0.773 \quad \mu_2 = 0.776 \quad - \text{условие не выполняется}$$

Переопределим  $\mu_2$  из полученных условий. Запишем в блок решения необходимые ограничения для  $\mu_2$  в виде:

Настройка ограничений

$$\mu_1 := 0.647$$

$$\frac{\tau_{N2} \cdot g \cdot n_{x,max} \cdot (1 - \Delta p p_N)}{J_{1\pi 2} + \tau_{N2} \cdot g \cdot n_{x,max} \cdot (1 - \Delta p p_N)} \geq \mu_2 \quad (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) = \exp\left(-\frac{K_V V_K}{J_{1cp}}\right)$$

$$\text{Find } (\mu_1, \mu_2) = \begin{bmatrix} 0.651 \\ 0.773 \end{bmatrix}$$

Окончательно примем  $\mu_1 := 0.651$   $\mu_2 := 0.773$

Для справки приведем значения осевых перегрузок

$$n_{x,max1} := \frac{J_{1\pi 1} \cdot \mu_1}{\tau_{N1} \cdot (1 - \Delta p p_N) \cdot g \cdot (1 - \mu_1)} = 10.19$$

$$n_{x,max2} := \frac{J_{1\pi 2} \cdot \mu_2}{\tau_{N2} \cdot (1 - \Delta p p_N) \cdot g \cdot (1 - \mu_2)} = 19.984$$

### 2.3 Величина стартовой массы ракеты и величины ее относительной грузоподъемности

$$\Lambda_0 := 1.65$$

$$m_0 := \Lambda_0 \cdot m_{\Pi H} \cdot \exp\left(\frac{K_V V_K}{J_{1cp}}\right) + 0.01 \cdot \left(\frac{L_{max}}{km}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{tonne} = 23.623 \text{ tonne}$$

$$m'_{\Pi H} := \frac{m_{\Pi H}}{m_0} = 0.041$$

### 2.4 Относительные массы конструкций ступеней ракеты

Обобщенная относительная масса конструкции

$$\alpha := \frac{1 - \mu - \sqrt[2]{m'_{\Pi H}}}{\mu} = 0.109$$

С учетом масштабного эффекта

$$\alpha_1 := 0.9 \cdot \alpha = 0.098$$

$$\alpha_2 := \frac{1 - \mu_2}{\mu_2} - \frac{m'_{\Pi H}}{\mu_2 \cdot (1 - \mu_1 \cdot (1 + \alpha_1))} = 0.106$$

### 2.5 Определение других параметров

Среднее давление в камерах сгорания двигателей ступеней

$$p_{N1} := 12 \text{ MPa} \quad l'_{y1} := 0.15$$

$$p_{N2} := 10 \text{ MPa} \quad l'_{y2} := 0.1$$

Определим массовые и тяговые характеристики ракеты по ступеням

$$\omega_1 := \mu_1 \cdot m_0 = 15.378 \text{ tonne}$$

$$m_{K1} := \omega_1 \cdot \alpha_1 = 1.506 \text{ tonne}$$

$$m'_1 := \frac{\omega_1}{\tau_{N1}} = 269.795 \frac{kg}{s}$$

$$P_{\Pi 1} := m'_1 \cdot J_{1\Pi 1} = 744.473 \text{ kN}$$

Масса второй ступени:

$$m_{02} := m_0 \cdot (1 - \mu_1 \cdot (1 + \alpha_1)) = 6.738 \text{ tonne}$$

$$\omega_2 := \mu_2 \cdot m_{02} = 5.209 \text{ tonne}$$

$$m_{K2} := \omega_2 \cdot \alpha_2 = 0.555 \text{ tonne}$$

$$m'_2 := \frac{\omega_2}{\tau_{N2}} = 94.7 \frac{kg}{s}$$

$$P_{\Pi 2} := m'_2 \cdot J_{1\Pi 2} = 270.861 \text{ kN}$$

Диаметры ступеней

$$D_1 := 0.52 \cdot \sqrt[3]{\frac{m_0}{\text{tonne}}} \text{ m} = 1.492 \text{ m}$$

$$D1_1 := 1.5 \text{ m}$$

- данное значение принимаем в результате уточнения времени работы ДУ ступеней в пункте 2.6. Переопределенные значения времени работы второй ступени в дальнейшем так же удовлетворяют ранее принятому значению  $\tau_{N2}$

$$D_2 := 0.85 \cdot D_1 = 1.268 \text{ m}$$



Размеры сопел

$$d'_{a1} := \sqrt[2]{0.9 \cdot \frac{p_{N1}}{\text{MPa}}} + 5 = 3.975 \quad - \text{степень расширения сопла первой ступени}$$

Диаметры среза сопел второй ступени рассчитаем из условия их размещения в переходных отсеках

$$d_{a2} := 0.85 \cdot D_1 = 1.268 \text{ м}$$

Диаметры критических сечений сопел маршевых ДУ ступеней выразим из следующего соотношения:

$$m'_i \cdot \beta = p_{Ni} \cdot F_{kpi} \quad - \text{расходный комплекс в зависимости от теоретического}$$

$$\beta := 0.651 \cdot J_{1T.0} = (1.641 \cdot 10^3) \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad \text{удельного импульса в стандартных условиях}$$

$F_{kpi}$  - площадь критического сечения сопла двигателя данной ступени

$$F_{kp1} := \frac{m'_1 \cdot \beta}{p_{N1}} = 0.037 \text{ м}^2 \quad d_{kp1} := \sqrt[2]{\frac{4 \cdot F_{kp1}}{\pi}} = 21.671 \text{ см} \quad d_{kp1} = 0.217 \text{ м}$$

$$F_{kp2} := \frac{m'_2 \cdot \beta}{p_{N2}} = 0.016 \text{ м}^2 \quad d_{kp2} := \sqrt[2]{\frac{4 \cdot F_{kp2}}{\pi}} = 14.064 \text{ см} \quad d_{kp2} = 0.141 \text{ м}$$

Рассчитаем диаметр выходного сечения сопла первой ступени, а также степени расширения сопла второй ступени

$$d_{a1} := d'_{a1} \cdot d_{kp1} = 0.861 \text{ м}$$

$$d'_{a2} := \frac{d_{a2}}{d_{kp2}} = 9.017$$

Зная значения степеней расширения сопел ДУ каждой ступени, можем рассчитать значение практического удельного импульса в пустоте каждого РДТТ

$$J_{1Ti} = J_{1Ti} \cdot (1 - \zeta_i) \quad , \text{ где } \zeta_i - \text{суммарные потери удельного импульса}$$

$$\zeta_i = 0.025 \cdot \frac{d'_{ai}{}^{1.25} - 1}{d'_{ai}} \cdot \left( 1 + \frac{11.6 \cdot z}{\sqrt[3]{d_{kpi}}} \right)$$

$$J_{1Ti} = J_{1T.0} \cdot \left( \frac{1.57}{\sqrt[2]{k}} - \frac{0.66}{\sqrt[3]{d'_{ai}{}^2}} \right) \quad - \text{теоретическое значение удельного импульса в пустоте в зависимости от степени расширения сопла}$$

$$J_{1T1} := J_{1T.0} \cdot \left( \frac{1.57}{\sqrt[2]{k}} - \frac{0.66}{\sqrt[3]{d'_{a1}{}^2}} \right) = 3026.547 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$J_{1T2} := J_{1T.0} \cdot \left( \frac{1.57}{\sqrt[2]{k}} - \frac{0.66}{\sqrt[3]{d'_{a2}{}^2}} \right) = 3305.455 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\zeta_1 := 0.025 \cdot \frac{d'_{a1}{}^{1.25} - 1}{d'_{a1}} \cdot \left( 1 + \frac{11.6 \cdot z}{\sqrt[3]{\frac{d_{kp1}}{\text{см}}}} \right) = 0.069$$

$$\zeta_2 := 0.025 \cdot \frac{d'_{a2}{}^{1.25} - 1}{d'_{a2}} \cdot \left( 1 + \frac{11.6 \cdot z}{\sqrt[3]{\frac{d_{kp2}}{\text{см}}}} \right) = 0.105$$

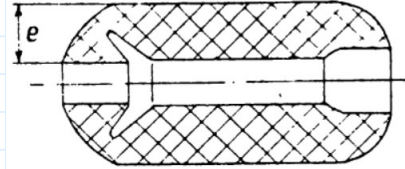
$$J_{1\pi 1} := J_{1T1} \cdot (1 - \zeta_1) = (2.818 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$J_{1\pi 2} := J_{1T2} \cdot (1 - \zeta_2) = (2.959 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

2.6 Уточнение времени работы ДУ всех ступеней или их калибров.

Максимальное и минимальное время работы ДУ:

$$\tau_{Nmaxi} = \frac{e'_{\partial on i} \cdot D_i}{u'_{min} \cdot p_{Ni}^{\nu}} \quad \tau_{Nmaxi} = \frac{e'_{\partial on i} \cdot D_i}{u'_{max} \cdot p_{Ni}^{\nu}}$$



$$e'_{\partial on i} = \frac{e_i}{D_i} \quad - \text{ относительный свод горения}$$

$u'_{min}$  и  $u'_{max}$  вычисляются по заданным минимальному и максимальному значению скорости горения при  $p=4 \text{ МПа}$ :

$$u_{min} = 0.005 \frac{m}{s} \quad p_0 := 4 \text{ МПа} \quad u_{max} = 0.013 \frac{m}{s}$$

$$u'_{min} := \frac{\frac{u_{min} \cdot s}{mm}}{\left(\frac{p_0}{\text{МПа}}\right)^{\nu}} = 3.536 \quad u'_{max} := \frac{\frac{u_{max} \cdot s}{mm}}{\left(\frac{p_0}{\text{МПа}}\right)^{\nu}} = 9.192$$

Определим относительный свод горения для каждой ступени из следующей системы уравнений:

$$(\varepsilon_T + \varepsilon_p) \cdot f \leq \varepsilon_{\partial on}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot (2 \cdot M^2 - \mu_T) \cdot (M^2 + 1)}{(M^2 \cdot (1 - 2 \mu_T) + 1)}$$

$$\varepsilon_p = \frac{p_{maxi} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \mu_T) \cdot (M^2 - 1)}{E_T \cdot (M^2 \cdot (1 - 2 \mu_T) + 1)}$$

$$e'_{\partial on i} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{M} \right)$$

$$M = \frac{\frac{p_{maxi}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot \mu_T + \frac{\varepsilon_{\partial on}}{f}}{\frac{p_{maxi}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot (2 - \mu_T) - \frac{\varepsilon_{\partial on}}{f} \cdot (1 - 2 \mu_T)} \quad - \text{ формула для } M, \text{ получаемая при решении системы}$$

$$\alpha_K := 1 \cdot \frac{10^{-5}}{K} \quad - \text{ коэффициент температурного расширения конструкции двигателя}$$

$$\alpha_T := 1 \cdot \frac{10^{-4}}{K} \quad - \text{ коэффициент температурного расширения топлива}$$

$$\mu_T := 0.495 \quad - \text{ коэф. Пуассона топлива}$$

$$T_p := 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T := (T_p - T_{min}) = 90 \text{ K}$$

$$E_T := 7.5 \text{ МПа} \quad - \text{ модуль Юнга топлива}$$

$$\varepsilon_{\partial on} := 0.4 \quad - \text{ допускаемая деформация топлива}$$

$$f := 1.35 \quad - \text{ коэф. запаса по деформации}$$

Вычислим М для ДУ первой ступени:

$$p_{max1} := 1.31 \cdot p_{N1} = 15.72 \text{ МПа}$$

$$M_1 := \sqrt[2]{\frac{\frac{p_{max1}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot \mu_T + \frac{\varepsilon_{don}}{f}}{\frac{p_{max1}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot (2 - \mu_T) - \frac{\varepsilon_{don}}{f} \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T)}} = 4.472$$

Вторая ступень:

$$p_{max2} := 1.31 \cdot p_{N2} = 13.1 \text{ МПа}$$

$$M_2 := \sqrt[2]{\frac{\frac{p_{max2}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot \mu_T + \frac{\varepsilon_{don}}{f}}{\frac{p_{max2}}{E_T} \cdot (1 + \mu_T) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T) + \Delta T \cdot (\alpha_K - \alpha_T) \cdot (2 - \mu_T) - \frac{\varepsilon_{don}}{f} \cdot (1 - 2 \cdot \mu_T)}} = 5.39$$

Тогда относительные своды горения будут равны:

Диаметры каналов зарядов ДУ:

$$e'_{don1} := \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{M_1} \right) = 0.388$$

$$d_{KAH1} := \frac{D_1}{M_1} = 0.334 \text{ м}$$

$$e'_{don2} := \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{M_2} \right) = 0.407$$

$$d_{KAH2} := \frac{D_2}{M_2} = 0.235 \text{ м}$$

Скорости горения топлива ДУ:

$$u_{1min} := u'_{min} \cdot \left( \frac{p_{N1}}{\text{МПа}} \right)^\nu \cdot \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 6.58 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

$$u_{2min} := u'_{min} \cdot \left( \frac{p_{N2}}{\text{МПа}} \right)^\nu \cdot \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 6.287 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

$$u_{1max} := u'_{max} \cdot \left( \frac{p_{N1}}{\text{МПа}} \right)^\nu \cdot \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 17.109 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

$$u_{2max} := u'_{max} \cdot \left( \frac{p_{N2}}{\text{МПа}} \right)^\nu \cdot \frac{\text{мм}}{\text{с}} = 16.347 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

Тогда максимальное и минимальное время работы ДУ каждой ступени будет равно:

$$\tau_{Nmax1} := \frac{e'_{don1} \cdot D_1}{u_{1min}} = 88.019 \text{ с}$$

$$\tau_{Nmin1} := \frac{e'_{don1} \cdot D_1}{u_{1max}} = 33.854 \text{ с}$$

$$\tau_{Nmax2} := \frac{e'_{don2} \cdot D_2}{u_{2min}} = 82.147 \text{ с}$$

$$\tau_{Nmin2} := \frac{e'_{don2} \cdot D_2}{u_{2max}} = 31.595 \text{ с}$$

### 3. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА МАССОВО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ УБР

#### 3.1 Расчет массы и размеров элементов корпусов РДТТ маршевых ступеней

##### Масса корпусов РДТТ

Корпус рассчитывается на максимальное давление. Его предел прочности приведен в начале записки.

$$S_{max} S_{cp} := 1.15 \quad f := 1.15 \quad K_{\sigma} := 1.05$$

$$P_{MAX1} := f \cdot p_{N1} \cdot (1 + \Delta p p_N) \cdot S_{max} S_{cp}^{\frac{1}{1-\nu}} \cdot K_{\sigma} = 19.141 \text{ MPa}$$

$$P_{MAX2} := f \cdot p_{N2} \cdot (1 + \Delta p p_N) \cdot S_{max} S_{cp}^{\frac{1}{1-\nu}} \cdot K_{\sigma} = 15.951 \text{ MPa}$$

Массу кокона для каждой ступени можно рассчитать по следующей зависимости:

$$m_{CKi} = 3 \cdot K_{CKi} \cdot P_{MAXi} \cdot \frac{\omega_i}{\sigma'_K \cdot \rho_T} \quad \sigma'_K := \sigma_K \cdot g = (1.275 \cdot 10^6) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$K_{CKi} = \frac{K_{\omega i}}{\eta_{\omega i}} + \frac{K_{Vi} \cdot \pi \cdot R_i^3}{\omega_i} \cdot \rho_T \quad \sigma'_K \cdot 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = (1.721 \cdot 10^3) \text{ MPa}$$

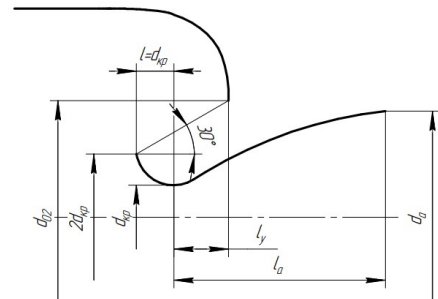
$$\eta_{\omega i} = 0.985 \cdot \eta'_{\omega i} \quad \eta'_{\omega i} = 4 \cdot e'_{\partial \text{oni}} \cdot (1 - e'_{\partial \text{oni}}) \quad \text{- коэффициент объемного заполнения топливом ДУ } i\text{-ой ступени}$$

$R_i$  - радиус  $i$ -ой ступени

Значения  $K_{\omega}$ ,  $K_l$ ,  $K_V$  определяются из таблицы для принятого относительного диаметра заднего полюсного отверстия корпуса ДУ.

Значения коэффициентов

| $\bar{d}_{02}$ | $K_{\omega}$ | $K_V$ | $K_l$ |
|----------------|--------------|-------|-------|
| 0,2            | 1,148        | 0,505 | 0,89  |
| 0,3            | 1,17         | 0,514 | 0,902 |
| 0,4            | 1,20         | 0,533 | 0,922 |
| 0,5            | 1,26         | 0,546 | 0,954 |
| 0,6            | 1,335        | 0,564 | 1,012 |
| 0,7            | 1,466        | 0,601 | 1,109 |



$$d'_{02i} = \frac{d_{02i}}{D_i} \quad \text{- относительный диаметр заднего полюсного отверстия ДУ ступени}$$

Диаметр заднего полюсного отверстия можно определить приближенно из схемы, показанной выше.

$$d_{02i} = 2 \cdot d_{kpi} + 2 \cdot (l_{yi} + d_{kpi}) \cdot \tan(30^\circ), \text{ где } l_{yi} \text{ - длина утолщенной части сопла (его сверхзвуковой части)}$$

$$l_{yi} = l'_{yi} \cdot l_{ai}, \text{ где } l_{ai} \text{ - длина сверхзвуковой части сопла}$$

$$\text{Принимаем } l_{ai} = d_{ai}$$

$$l_{a1} := d_{a1} = 86.139 \text{ cm}$$

$$l_{a2} := d_{a2} = 126.823 \text{ cm}$$

$$l_{y1} := l'_{y1} \cdot l_{a1} = 12.921 \text{ cm}$$

$$l_{y2} := l'_{y2} \cdot l_{a2} = 12.682 \text{ cm}$$

Тогда

$$d_{021} := 2 \cdot d_{kp1} + 2 \cdot (l_{y1} + d_{kp1}) \cdot \tan(30^\circ) = 83.284 \text{ cm}$$

$$d_{022} := 2 \cdot d_{kp2} + 2 \cdot (l_{y2} + d_{kp2}) \cdot \tan(30^\circ) = 59.013 \text{ cm}$$

$$d'_{021} := \frac{d_{021}}{D_1} = 0.558$$

$$d'_{022} := \frac{d_{022}}{D_2} = 0.465$$

Для определение необходимых коэффициентов проведем линейную интерполяцию их значений

$$K_{uM} := [1.148 \ 1.17 \ 1.2 \ 1.26 \ 1.335 \ 1.466]^T$$

$$K_{VM} := [0.505 \ 0.514 \ 0.533 \ 0.546 \ 0.564 \ 0.601]^T$$

$$K_{lM} := [0.89 \ 0.902 \ 0.922 \ 0.954 \ 1.012 \ 1.109]^T$$

$$d_{02M} := [0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.7]^T$$

$$d' := 0.2, 0.201 \dots 0.7$$

$$K_u(d') := \text{linterp}(d_{02M}, K_{uM}, d')$$

$$K_V(d') := \text{linterp}(d_{02M}, K_{VM}, d')$$

$$K_l(d') := \text{linterp}(d_{02M}, K_{lM}, d')$$

Тогда коэффициенты будут приближенно равны

ДУ 1 ступени

$$K_{u1} := K_u(d'_{021}) = 1.304$$

$$K_{V1} := K_V(d'_{021}) = 0.556$$

$$K_{l1} := K_l(d'_{021}) = 0.988$$

ДУ 2 ступени

$$K_{u2} := K_u(d'_{022}) = 1.239$$

$$K_{V2} := K_V(d'_{022}) = 0.541$$

$$K_{l2} := K_l(d'_{022}) = 0.943$$

Вычислим объемные коэффициенты заполнения цилиндрической части корпуса двигателей

Первая ступень

$$\eta'_{\zeta1} := 4 \cdot e'_{\partial \sigma n1} \cdot (1 - e'_{\partial \sigma n1}) = 0.95$$

Вторая ступень

$$\eta'_{\zeta2} := 4 \cdot e'_{\partial \sigma n2} \cdot (1 - e'_{\partial \sigma n2}) = 0.966$$

$$\eta_{\zeta1} := 0.985 \cdot \eta'_{\zeta1} = 0.936$$

$$\eta_{\zeta2} := 0.985 \cdot \eta'_{\zeta2} = 0.951$$

Теперь можем рассчитать массы коконов:

ДУ первой ступени

$$R_1 := \frac{D_1}{2} = 0.746 \text{ m}$$

$$K_{CK1} := \frac{K_{u1}}{\eta_{\zeta1}} + \frac{K_{V1} \cdot \pi \cdot R_1^3}{\omega_1} \cdot \rho_T = 1.479$$

$$m_{CK1} := 3 \cdot K_{CK1} \cdot P_{MAX1} \cdot \frac{\omega_1}{\sigma'_K \cdot \rho_T} = 565.841 \text{ kg}$$

ДУ второй ступени

$$R_2 := \frac{D_2}{2} = 0.634 \text{ м}$$

$$K_{CK2} := \frac{K_{\omega 2}}{\eta_{\omega 2}} + \frac{K_{V2} \cdot \pi \cdot R_2^3}{\omega_2} \cdot \rho_T = 1.454$$

$$m_{CK2} := 3 \cdot K_{CK2} \cdot P_{MAX2} \cdot \frac{\omega_2}{\sigma'_K \cdot \rho_T} = 157.01 \text{ кг}$$

Размеры силовой оболочки

Коэффициенты объемного заполнения днищ корпуса РДТТ

Первая ступень

$$\eta'_{\partial H1} := 1 - 1.5 \cdot (1 - \eta'_{\omega 1}) = 0.925$$

$$\eta_{\partial H1} := 0.85 \cdot \eta'_{\partial H1} = 0.786$$

Вторая ступень

$$\eta'_{\partial H2} := 1 - 1.5 \cdot (1 - \eta'_{\omega 2}) = 0.948$$

$$\eta_{\partial H2} := 0.85 \cdot \eta'_{\partial H2} = 0.806$$

Тогда длины цилиндрических участков ДУ каждой ступени

$$l_{\omega 1} := \frac{4 \cdot \omega_1}{\pi \cdot D_1^2 \cdot \rho_T \cdot \eta_{\omega 1}} - K_{l1} \cdot R_1 \cdot \frac{\eta_{\partial H1}}{\eta_{\omega 1}} = 4.574 \text{ м}$$

$$l_{\omega 2} := \frac{4 \cdot \omega_2}{\pi \cdot D_2^2 \cdot \rho_T \cdot \eta_{\omega 2}} - K_{l2} \cdot R_2 \cdot \frac{\eta_{\partial H2}}{\eta_{\omega 2}} = 1.888 \text{ м}$$

Посчитаем длину переднего и заднего днища для каждой ДУ

Первая ступень

$$l_{\partial Hпер1} := 0.61 \cdot R_1 = 0.455 \text{ м}$$

$$l_{\partial Hзад1} := (0.305 + 0.1 \cdot 0.2) \cdot 2 \cdot R_1 = 0.485 \text{ м}$$

Вторая ступень

$$l_{\partial Hпер2} := 0.61 \cdot R_2 = 0.387 \text{ м}$$

$$l_{\partial Hзад2} := (0.305 + 0.1 \cdot 0.2) \cdot 2 \cdot R_2 = 0.412 \text{ м}$$

Диаметры передних полюсных отверстий:

$$d'_{011} := 0.2$$

$$d_{011} := d'_{011} \cdot D_1 = 0.298 \text{ м}$$

$$d'_{012} := 0.2$$

$$d_{012} := d'_{012} \cdot D_2 = 0.254 \text{ м}$$

$$d_{021} = 0.833 \text{ м}$$

Масса фланцев

$$m_{\phi i} = K_{\phi l} \cdot \rho_{\phi l} \cdot r'_{cpi}{}^3 \cdot D_i^3 \cdot \sqrt{\frac{p_{Ni}}{\sigma_{\phi l}}}$$

Материал фланцев: титановый сплав ВТ-23

$$\sigma_{\phi l} := 1400 \text{ МПа} \quad - \text{ предел прочности материала фланцев}$$

$$\rho_{Ti} := 4540 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad - \text{ плотность материала фланцев}$$

$$K_{\phi l} := 0.894 \quad - \text{ коэффициент согласования для фланцев корпусов ДУ ступеней}$$

Найдем средние относительные диаметры и радиусы полюсных отверстий силовых оболочек корпусов ДУ ступеней:

$$d'_{cp1} := \frac{d'_{011} + d'_{021}}{2} = 0.379$$

$$r'_{cp1} := \frac{d'_{cp1}}{2} = 0.19$$

$$d'_{cp2} := \frac{d'_{012} + d'_{022}}{2} = 0.333$$

$$r'_{cp2} := \frac{d'_{cp2}}{2} = 0.166$$

Посчитаем массы фланцев корпусов ДУ ступеней:

$$m_{\phi/1} := K_{\phi l} \cdot \rho_{Ti} \cdot r'_{cp1}{}^3 \cdot D_1{}^3 \cdot \sqrt{\frac{p_{N1}}{\sigma_{\phi l}}} = 8.5 \text{ kg}$$

$$m_{\phi/2} := K_{\phi l} \cdot \rho_{Ti} \cdot r'_{cp2}{}^3 \cdot D_2{}^3 \cdot \sqrt{\frac{p_{N2}}{\sigma_{\phi l}}} = 3.22 \text{ kg}$$

**Масса юбок корпуса**

$$m_{юi} = \frac{K_{ю} \cdot p_{Ni} \cdot D_i{}^3}{\sigma'_K} \quad K_{ю} := 1.61 \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$\sigma'_K = (1.275 \cdot 10^6) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad - \text{удельная прочность органопластика} \quad \rho_K := 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{ю1} := \frac{K_{ю} \cdot p_{N1} \cdot D_1{}^3}{\sigma'_K} = 50.336 \text{ kg} \quad l_{ю1} := 0.15 \cdot D_1 = 0.2238 \text{ m}$$

$$m_{ю2} := \frac{K_{ю} \cdot p_{N2} \cdot D_2{}^3}{\sigma'_K} = 25.761 \text{ kg} \quad l_{ю2} := 0.15 \cdot D_2 = 0.19 \text{ m}$$

Зная плотность материала юбок, оценим их толщину, считая что вся их масса заключена в объеме полого цилиндра

$$V_{ю1} := \frac{m_{ю1}}{2 \cdot \rho_K} = 0.019 \text{ m}^3$$

$$V_{ю2} := \frac{m_{ю2}}{2 \cdot \rho_K} = 0.01 \text{ m}^3$$

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Решение системы уравнений | $\delta_{ю1} := 1 \text{ mm} \quad \delta_{ю2} := 1 \text{ mm}$                                    |
|                           | $V_{ю1} = \pi \cdot \left( (D_1 + \delta_{ю1})^2 - D_1^2 \right) \cdot l_{ю1}$                     |
|                           | $V_{ю2} = \pi \cdot \left( (D_2 + \delta_{ю2})^2 - D_2^2 \right) \cdot l_{ю2}$                     |
|                           | <b>Find</b> $(\delta_{ю1}, \delta_{ю2}) = \begin{bmatrix} 8.859 \\ 6.278 \end{bmatrix} \text{ mm}$ |

**Масса заряда и крышки воспламенительного устройства**

$$m_{3BYi} = K_{3BY} \cdot \left( \frac{\omega_i}{\rho_T} \right)^{\frac{2}{3}} \quad K_{3BY} := \frac{2.2}{\text{m}^2} \cdot \text{kg} \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$m_{3BY1} := K_{3BY} \cdot \left( \frac{\omega_1}{\rho_T} \right)^{\frac{2}{3}} = 9.16 \text{ kg}$$

$$m_{3BY2} := K_{3BY} \cdot \left( \frac{\omega_2}{\rho_T} \right)^{\frac{2}{3}} = 4.451 \text{ kg}$$

### Масса крышки воспламенительного устройства (ВУ)

$$m_{BYi} = \frac{K_{BY} \cdot p_{Ni} \cdot d'_{01i}{}^3 \cdot D_i^3}{\sigma'_B} \quad K_{BY} := 5.46 \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$\sigma'_B := \frac{\sigma_B}{\rho_{ti}} = (3.084 \cdot 10^5) \frac{m^2}{s^2} \quad \rho_{ti} := 4540 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad \sigma_B := 1400 \text{ MPa}$$

$$m_{BY1} := \frac{K_{BY} \cdot p_{N1} \cdot d'_{011}{}^3 \cdot D_1^3}{\sigma'_B} = 5.646 \text{ kg}$$

$$m_{\Pi\Lambda} = 80 \text{ kg}$$

$$d_{\Pi\Lambda} := D_2$$

$$m_{BY2} := \frac{K_{BY} \cdot p_{N2} \cdot d'_{012}{}^3 \cdot D_2^3}{\sigma'_B} = 2.889 \text{ kg}$$

$$l_{\Pi\Lambda} := \frac{4 \cdot \frac{m_{\Pi\Lambda}}{\rho_{ti}}}{\pi \cdot d_{\Pi\Lambda}^2} = 0.014 \text{ m}$$

### Масса защитно-крепящего слоя

$$m_{3KC_i} = \pi \cdot D_i^2 \cdot \left( \frac{l_{\psi i}}{D_i} + 0.615 \right) \cdot q_{3KC} \quad q_{3KC} := 2.4 \cdot \frac{kg}{m^2} \quad - \text{поверхностная плотность материала ЗКС}$$

$$m_{3KC1} := \pi \cdot D_1^2 \cdot \left( \frac{l_{\psi 1}}{D_1} + 0.615 \right) \cdot q_{3KC} = 61.778 \text{ kg}$$

$$m_{3KC2} := \pi \cdot D_2^2 \cdot \left( \frac{l_{\psi 2}}{D_2} + 0.615 \right) \cdot q_{3KC} = 25.515 \text{ kg}$$

### Масса теплозащитного покрытия

$$m_{T3\Gamma} = \frac{K_{T3\Gamma} \cdot \omega_i \cdot \sqrt[2]{p_{Ni} \cdot \tau_{Ni}}}{\rho_T \cdot D_i \cdot \left( \frac{l_{\psi i}}{D_i} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3\Gamma} \quad K_{T3\Gamma} := 1.17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{m^{\frac{3}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{3}{2}}} \cdot kg \quad \rho_{T3\Gamma} := 1000 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{T3\Gamma 1} := \frac{K_{T3\Gamma} \cdot \frac{\omega_1}{1000} \cdot \sqrt[2]{p_{N1} \cdot \tau_{N1}}}{\rho_T \cdot D_1 \cdot \left( \frac{l_{\psi 1}}{D_1} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3\Gamma} = 131.686 \text{ kg}$$

$$m_{T3\Gamma 2} := \frac{K_{T3\Gamma} \cdot \frac{\omega_2}{1000} \cdot \sqrt[2]{p_{N2} \cdot \tau_{N2}}}{\rho_T \cdot D_2 \cdot \left( \frac{l_{\psi 2}}{D_2} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3\Gamma} = 56.362 \text{ kg}$$

### 3.2 Расчет масс сопловых аппаратов

#### Силовая оболочка утолщенной части сопла

$$m_{yoi} = K_{yo} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_i}{\tau_{Ni}} \right)^{1.5} \cdot d'_{yi}{}^{2.35} \cdot l'_{yi}{}^{0.4} \cdot \frac{d'_{ai}{}^{0.4}}{p_{Ni}{}^{1.1}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{E_{Ti}{}^{0.4}} \quad \rho_{Ti} := 4500 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad E_{Ti} := 122000 \text{ MPa}$$

$$d'_{yi} = \frac{d_{02i}}{2 \cdot d_{\kappa pi}} \quad K_{yo} := 16.5 \cdot 10^{-9} \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$



$$d'_{y1} := \frac{d_{021}}{2 \cdot d_{kp1}} = 1.922$$

$$d'_{y2} := \frac{d_{022}}{2 \cdot d_{kp2}} = 2.098$$

$$m_{yo1} := K_{yo} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_1}{\tau_{N1}} \right)^{1.5} \cdot d'_{y1}{}^{2.35} \cdot l'_{y1}{}^{0.4} \cdot \frac{d'_{a1}{}^{0.4}}{\left( \frac{p_{N1}}{10^6} \right)^{1.1}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left( \frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.4}} = 49.528 \text{ kg}$$

$$m_{yo2} := K_{yo} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_2}{\tau_{N2}} \right)^{1.5} \cdot d'_{y2}{}^{2.35} \cdot l'_{y2}{}^{0.4} \cdot \frac{d'_{a2}{}^{0.4}}{\left( \frac{p_{N2}}{10^6} \right)^{1.1}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left( \frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.4}} = 18.256 \text{ kg}$$

### Тепловая защита утолщенной оболочки сопла

$$m_{T3yo1} = K_{T3yo} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_i}{\sqrt[2]{p_{Ni} \cdot \tau_{Ni}}} \cdot d'_{yi}{}^{1.75} \cdot \rho_{T3} \quad K_{T3yo} := 3.7 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{m^{\frac{3}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{3}{2}}} \quad \text{- коэф. согласования размерностей}$$

$$\rho_{T3} := 1400 \cdot \frac{kg}{m^3} \quad \text{- плотность углепластика}$$

$$m_{T3yo1} := K_{T3yo} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_1}{\sqrt[2]{\frac{p_{N1}}{10^6} \cdot \tau_{N1}}} \cdot d'_{y1}{}^{1.75} \cdot \rho_{T3} = 15.671 \text{ kg}$$

$$m_{T3yo2} := K_{T3yo} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_2}{\sqrt[2]{\frac{p_{N2}}{10^6} \cdot \tau_{N2}}} \cdot d'_{y2}{}^{1.75} \cdot \rho_{T3} = 6.902 \text{ kg}$$

### Силовая оболочка раструба сверхзвуковой части

$$m_{kpi} = K_{kp} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_i}{\tau_{Ni}} \right)^{1.5} \cdot (d'_{pi})^{1.75} \cdot \frac{d'_{ai}{}^{0.2}}{\frac{p_{Ni}}{10^6}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left( \frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.5}} \quad k_{kp} := 11.2 \cdot 10^{-9} \quad \text{- коэф. согласования размерностей}$$

$$d'_{p1} := d'_{a1} = 3.975 \quad \text{- относительные диаметры раструбов}$$

$$d'_{p2} := 4.5$$

$$E_{Ti} := 1300 \text{ MPa}$$

$$\rho_{Ti} = (4.5 \cdot 10^3) \cdot \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{kp1} := k_{kp} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_1}{\tau_{N1}} \right)^{1.5} \cdot (d'_{p1})^{1.75} \cdot \frac{1}{\frac{p_{N1}}{10^6}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left( \frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.5}} = 383.82 \text{ kg}$$

$$m_{kp2} := k_{kp} \cdot \left( \frac{\beta \cdot \omega_2}{\tau_{N2}} \right)^{1.5} \cdot (d'_{p2})^{1.75} \cdot \frac{d'_{a2}{}^{0.2}}{\frac{p_{N2}}{10^6}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left( \frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.5}} = 184.754 \text{ kg}$$

### Горловина сопла с эластичным шарниром

$$m_{\Gamma i} = K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_i}{\sqrt[2]{\frac{p_{Ni}}{10^6} \cdot \tau_{Ni}}} \quad K_{\Gamma} := 6.44 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{3}{2}}} \cdot kg \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$m_{\Gamma 1} := K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_1}{\sqrt[2]{\frac{p_{N1}}{10^6} \cdot \tau_{N1}}} = 62.122 \text{ } kg$$

$$m_{\Gamma 2} := K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_2}{\sqrt[2]{\frac{p_{N2}}{10^6} \cdot \tau_{N2}}} = 23.464 \text{ } kg$$

### Масса тепловой защиты сверхзвуковой части

$$m_{o6i} = K_{o6} \cdot \rho_{T3} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_i}{\sqrt[2]{\frac{p_{Ni}}{10^6} \cdot \tau_{Ni}}} \cdot d'_{ai}{}^{1.75} \quad K_{o6} := 2.81 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{m^{\frac{3}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{3}{2}}} \cdot kg \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$m_{o61} := K_{o6} \cdot \rho_{T3} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_1}{\sqrt[2]{\frac{p_{N1}}{10^6} \cdot \tau_{N1}}} \cdot d'_{a1}{}^{1.75} = 42.464 \text{ } kg$$

$$m_{o62} := K_{o6} \cdot \rho_{T3} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_2}{\sqrt[2]{\frac{p_{N2}}{10^6} \cdot \tau_{N2}}} \cdot d'_{a2}{}^{1.75} = 67.256 \text{ } kg$$

### 3.3 Масса органов управления

$$m_{PMi} = K_{PMi} \cdot \frac{\omega_i}{\tau_{Ni} \cdot \sqrt[2]{D_i}} \quad K_{PM1} := 0.65 \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot s \quad K_{PM2} := 0.57 \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot s \quad - \text{коэф. согласования размерностей}$$

$$m_{PM1} := K_{PM1} \cdot \frac{\omega_1}{\tau_{N1} \cdot \sqrt[2]{D_1}} = 143.568 \text{ } kg$$

$$m_{PM2} := K_{PM2} \cdot \frac{\omega_2}{\tau_{N2} \cdot \sqrt[2]{D_2}} = 47.932 \text{ } kg$$

### Масса конструкции ДУ

$$m_{ДУ1} := m_{CK1} + m_{\Phi/1} + m_{ю1} + m_{3BY1} + m_{BY1} + m_{T3П1} + m_{3КС1} + m_{yo1} + m_{T3yo1} + m_{kp1} + m_{\Gamma1} + m_{o61} + m_{PM1} = (1.53 \cdot 10^3) \text{ } kg$$

$$m_{ДУ2} := m_{CK2} + m_{\Phi/2} + m_{ю2} + m_{3BY2} + m_{BY2} + m_{T3П2} + m_{3КС2} + m_{yo2} + m_{T3yo2} + m_{kp2} + m_{\Gamma2} + m_{o62} + m_{PM2} = 623.773 \text{ } kg$$

### 3.4 Соотношения для расчета масс элементов ракеты

Необходимо построить предварительный чертеж ракеты, из которого определяются точные значения длин переходных и хвостовых отсеков, длина обтекателя и протяженность БКС ракеты.

Определим длину приборного отсека по его усредненной плотности:

$$m_{cy} = 105 \text{ kg} \quad \rho_{cy} := 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Объем будет равен:

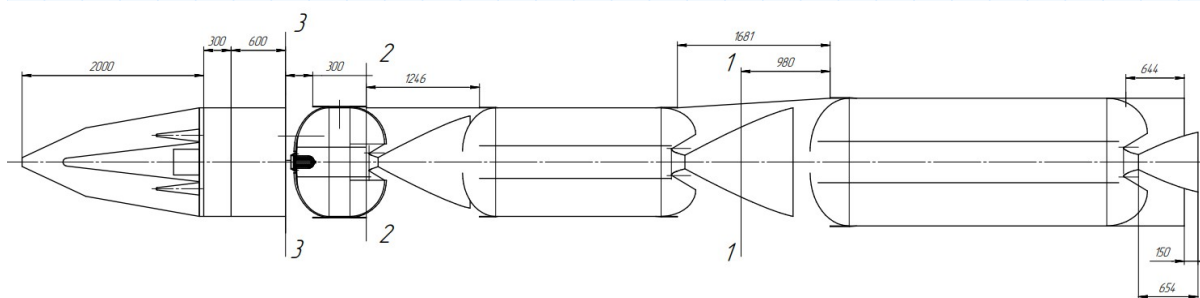
$$V_{cy} := \frac{m_{cy}}{\rho_{cy}} = 0.35 \text{ m}^3$$

Примем диаметр приборного отсека равным диаметру второй ступени:

$$D_{cy} := D_2 = 1.268 \text{ m}$$

$$l_{cy} := \frac{4 \cdot V_{cy}}{\pi \cdot D_{cy}^2} = 0.277 \text{ m}$$

Для расчета масс отсеков, головного обтекателя, а также бортовой кабельной сети приведем предварительную компоновку ракеты



Масса отсеков:

$$m_{отс_i} = \pi \cdot D_i \cdot (K_{пхо} \cdot l_{пхо_i} + K_{хо} \cdot l_{хо_i})$$

$$K_{хо} := 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{- коэффициент согласования для хвостовых отсеков}$$

$$K_{пхо1} := 20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{- коэффициент согласования для переходных отсеков в случае поперечного деления}$$

$$K_{пхо2} := 24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{- коэффициент согласования для переходных отсеков в случае продольно-поперечного деления}$$

В нашем случае разделение первой и второй ступеней происходит по плоскости 1-1, боевая ступень отделяется от третьей ступени по плоскости 2-2. Из чертежа получим следующие длины хвостовых и переходных отсеков. В плоскости 1-1 предполагается продольно-поперечное деление, в плоскости 2-2 - поперечное.

Переходные отсеки

$$l_{пхо1} := 980 \text{ mm}$$

$$l_{пхо2} := 1278 \text{ mm}$$

$$l_{пхо3} := 268 \text{ mm}$$

Хвостовые отсеки:

$$l_{хо1} := 644 \text{ mm}$$

$$l_{хо2} := 701 \text{ mm}$$

Тогда масса отсеков первой ступени будет равна (переходный отсек между первой и второй ступенями относим к первой):

$$m_{OTC1} := \pi \cdot D_1 \cdot (K_{ПХО2} \cdot l_{ПХО1} + K_{ХО} \cdot l_{ХО1}) = 170.62 \text{ kg}$$

Второй ступени:

$$m_{OTC2} := \pi \cdot D_2 \cdot (K_{ПХО1} \cdot l_{ПХО2}) = ?$$

Бортовая кабельная сеть

$$m_{БКi} = (0.8 \cdot l_{cmi} + 2) + (0.8 \cdot l_{mpi} + 2) (i - 1)$$

$l_{cmi}$  - длина ступени

$l_{mpi}$  - длина транзитных кабелей

$$l_{mpi} = l_{ПХОi} + 2 \cdot l_{юi} + l_{цi} + l_{ХОi}$$

$l_{cmi}$  измеряется от среза сопла до плоскости разделения

$$l_{cm1} := 5.014 \text{ m}$$

$$l_{cm2} := 4.679 \text{ m}$$

$$l_{mp2} := l_{ПХО2} + 2 \cdot l_{ю2} + l_{ц2} + l_{ХО2} = ?$$

$$m_{БК1} := \left( 0.8 \cdot l_{cm1} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 2 \text{ kg} \right) = 6.011 \text{ kg}$$

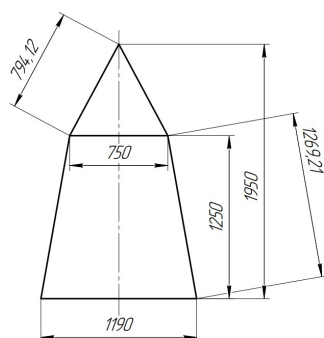
$$m_{БК2} := \left( 0.8 \cdot l_{cm2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 2 \cdot \text{kg} \right) + \left( 0.8 \cdot l_{mp2} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}} + 2 \cdot \text{kg} \right) = ?$$

Масса обтекателя:

$$m_{ГО} = S_{ГО} \cdot K_{ГО} + 10 \text{ kg}$$

$$K_{ГО} := 20 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \quad \text{коэффициент согласования при поперечном отделении ГО}$$

$S_{ГО}$  определим из чертежа для двух конусов



$$S_{ГО} := \pi \cdot \left( \frac{1190}{2} \text{ mm} + \frac{750}{2} \text{ mm} \right) \cdot 1269 \text{ mm} + \pi \cdot \frac{750}{2} \text{ mm} \cdot 794 \text{ mm}$$

$$S_{ГО} = 4.802 \text{ m}^2$$

$$L_{ГО} := 1950 \text{ mm}$$

$$L_{ПН} := 2000 \text{ mm}$$

$$m_{ГО} := S_{ГО} \cdot K_{ГО} + 10 \text{ kg} = 106.05 \text{ kg}$$

Приведем значения уточненных стартовых масс ступеней

Масса конструкции по ступеням:

Вторая ступень

$$m_{K\Sigma 2} := m_{Ду2} + m_{ОТС2} + m_{БКС2} = ?$$

$$m_{M2} := 0.03 \cdot m_{K\Sigma 2} = ?$$

$$m_{K2} := m_{K\Sigma 2} + m_{M2} = ?$$

Первая ступень

$$m_{K\Sigma 1} := m_{Ду1} + m_{ОТС1} + m_{БКС1} = (1.707 \cdot 10^3) \text{ kg}$$

$$m_{M1} := 0.03 \cdot m_{K\Sigma 1} = 51.203 \text{ kg}$$

$$m_{K1} := m_{K\Sigma 1} + m_{M1} = (1.758 \cdot 10^3) \text{ kg}$$

$$m_0 = (2.362 \cdot 10^4) \text{ kg}$$

Стартовые массы ступеней:

$$m_{02} := m_{ПН} + m_{K2} + \omega_2 = ? \text{ tonne}$$

$$\mu_2 := \frac{\omega_2}{m_{02}} = ?$$

$$\alpha_{Ду2} := \frac{m_{Ду2}}{\omega_2} = 0.12$$

$$m_0 := m_{02} + m_{K1} + \omega_1 = ? \text{ tonne}$$

$$\mu_1 := \frac{\omega_1}{m_0} = ?$$

$$\alpha_{Ду1} := \frac{m_{Ду1}}{\omega_1} = 0.099$$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АУТ И МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ПОЛЕТА

Приращение скорости после работы ДУ  $i$ -ой ступени

$$V_{\kappa i} = K_{ai} \cdot J_{1i} \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \mu_i} \right) - \Delta V_{gi}$$

$K_{ai}$  - коэффициент учета потерь скорости  $i$ -ой ступени от наличия атмосферы

$$K_{a1} = 1 + K_{П1} - \frac{0.3 \cdot K_{П1} + \frac{4.8 \cdot \mu_1}{\tau_{N1} \cdot \sqrt[3]{\sin(\theta_1)^2}} \cdot \left( \frac{12000}{p_M} \right)}{\ln \left( \frac{1}{1 - \mu_1} \right)}$$

$$p_M := \frac{m_0}{\frac{\pi \cdot (1.025 \cdot D_1)^2}{4}} = ?$$

$$J_{101} := J_{1П1} - \frac{d'_{a1}{}^2 \cdot 0.1 \text{ MPa} \cdot \beta}{p_{N1}} = 2602.19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$K_{\pi 1} := \frac{J_{1\pi 1}}{J_{101}} - 1 = 0.083$$

$$\theta'_K(L) := \text{linterp}(L_M, \theta'_{KM}, L)$$

$$\theta'_K := \theta'_K(11000 \cdot \text{km}) = 0.353$$

$$\theta'_1 := \text{asin}\left(1 - \mu_1 \cdot \left(1 - \sin(\theta'_K)^{0.8}\right)\right) = ?$$

$$\theta'_2 := 0.25 \cdot \theta'_1 + 0.75 \cdot \theta'_K = ?$$

$$\theta_{K1} := 0.5 \cdot (\theta'_1 + \theta'_2) = ?$$

$$\theta_{K2} := \theta'_K$$

$$\theta_{K3} := \theta'_K$$

$$\theta'_3 := \theta'_K$$

$$0.3 \cdot K_{\pi 1} + \frac{4.8 \cdot \mu_1}{\frac{\tau_{N1}}{s} \cdot \sqrt[3]{\sin(\theta_{K1})^2}} \cdot \left( \frac{12000 \cdot \frac{kg}{m^2}}{p_M} \right)$$

$$K_{a1} := 1 + K_{\pi 1} - \frac{\frac{\tau_{N1}}{s} \cdot \sqrt[3]{\sin(\theta_{K1})^2}}{\ln\left(\frac{1}{1 - \mu_1}\right)} = ?$$

$$K_{a2} := 1 \quad K_{a3} := 1 \quad \text{считаем, что потери отсутствуют}$$

$$J_{11} := J_{101} = (2.602 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$J_{12} := J_{1\pi 2}$$

$$\Delta V_{g1} := g \cdot \tau_{N1} \cdot \sin(\theta'_1) = ?$$

$$\Delta V_{g2} := g \cdot \tau_{N2} \cdot \sin(\theta'_2) = ?$$

- потери скорости от воздействия гравитации

$$V_{\kappa 1} := K_{a1} \cdot J_{11} \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \mu_1}\right) - \Delta V_{g1} = ?$$

$$V_{\kappa 2} := K_{a2} \cdot J_{12} \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \mu_2}\right) - \Delta V_{g2} = ?$$

Конечная скорость в конце АУТ:

$$V_K := V_{\kappa 1} + V_{\kappa 2} = ?$$

Определяем высоту конца активного участка

$$S(u) := u + (1 - u) \cdot \ln(1 - u)$$

$$\Delta h_{K1} := \left( \frac{K_{a1} \cdot J_{11} \cdot \tau_{N1}}{\mu_1} \cdot S(\mu_1) - \frac{g \cdot \tau_{N1}^2}{2} \cdot \sin(\theta'_1) \right) \cdot \sin(\theta'_1) = ? \text{ km}$$

$$\Delta h_{K2} := \left( V_{\kappa 1} \cdot \tau_{N1} + \frac{K_{a2} \cdot J_{12} \cdot \tau_{N2}}{\mu_2} \cdot S(\mu_2) - \frac{g \cdot \tau_{N2}^2}{2} \cdot \sin(\theta'_2) \right) \cdot \sin(\theta'_2) = ? \text{ km}$$

$$h_K := \Delta h_{K1} + \Delta h_{K2} = ? \text{ km}$$

Протяженность активного участка:

$$\Delta l_1 := \Delta h_{K1} \cdot \cot(\theta_{K1}) = ? \text{ km}$$

$$\Delta l_2 := \Delta h_{K2} \cdot \cot(\theta_{K2}) = ? \text{ km}$$

$$l_K := \Delta l_1 + \Delta l_2 = ? \text{ km}$$

Определим эллиптическую дальность полета ракеты:

$$R := 6371 \text{ km} \quad \mu_0 := 3.988 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{km}^3}{\text{s}^2} \quad r_K := R + h_K = ? \text{ km}$$

$$v_K := \frac{V_K^2 \cdot r_K}{\mu_0} = ?$$

$$L_{BA\eta} := 2 \cdot R \cdot \operatorname{atan} \left( \frac{v_K \cdot \tan(\theta'_K)}{1 - v_K + \tan(\theta'_K)^2} \right) = ? \text{ km}$$

Тогда дальность полета будет равна:

$$L'_{max} := L_{BA\eta} + 2 \cdot l_K = ? \text{ km}$$

Перелет составляет

$$\Delta L := L'_{max} - L_{max} = ? \text{ km} \quad \varepsilon := \frac{\Delta L}{L_{max}} \cdot 100 = ?$$

Погрешность составляет 4,1 процента, поэтому дальнейшая корректировка не требуется. Рассчитанные ранее параметры ракеты принимаем за конечные.