

Исходные данные

Тип базирования УБР - ШПУ

Максимальная дальность стрельбы

$$L_{max} := 9000 \text{ } km$$

Число ББ

$$n_{ББ} := 1$$

Наличие КСП ПРО: +

Требуемое давление во фронте ударной волны

$$\Delta p_{\phi} := 1 \text{ } MPa$$

Требуемый радиус поражения площадной цели

$$R_{ц} := 2 \text{ } km$$

Предельное время работы ступеней

$$\tau_{\Sigma_max} := 140 \text{ } s$$

Максимальная высота конца АУТ, не более

$$h_{kmax} := 150 \text{ } km$$

Ограничение по перегрузке

$$n_{x_max} := 20$$

Температурный диапазон эксплуатации

$$T_{экспл} := 20 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta T := 30 \text{ } K$$

Параметры топлива

$$J_{170} := 2570 \frac{m}{s}$$

$$\rho_m := 1.85 \frac{gm}{cm^3} = (1.85 \cdot 10^3) \frac{kg}{m^3}$$

$$u_{1min} := 6 \frac{mm}{s}$$

$$u_{1max} := 15 \frac{mm}{s}$$

$$\nu := 0.3$$

$$K_7 := 0.002 \cdot \frac{1}{K}$$

$$\Delta u_1 \cdot u_1 := 0.02$$

$$\Delta_{cl} := 0.035$$

$$k := 1.15$$

$$z := 0.35$$

Дальность больше 6000 км, тогда число ступеней равно

$$n := 3$$

Ускорение свободного падения

$$g := 9.81 \frac{m}{s^2}$$

Расчет массы БК

Мощность ББ

Малоразмерные цели

$$\Delta p_\phi := 1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r := 0.15 \text{ km}$$

$$P_{1xmp} := 0.9$$

$$K_u := 0.97 \left(\frac{\Delta p_\phi}{\text{MPa}} \right)^{-0.37} = 0.97$$

$$P_{1x} = \frac{P_1}{P_{доcm}} \quad P_{1x} = 1 - \exp \left(- \frac{n_{ББ} \cdot K_u^2 \cdot q^{\frac{2}{3}}}{2 \cdot \sigma_r^2} \right)$$

$$q_{1p} := \left(\frac{2}{n_{ББ}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_r}{K_u \cdot \text{km}} \right)^3 \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - P_{1xmp}} \right)^{\frac{3}{2}} = 0.037 \quad \text{Мт}$$

Площадные цели

$$\Delta p_\phi := 0.03 \text{ MPa}$$

$$R_u := 2 \text{ } \textcolor{blue}{km}$$

$$M_{1xmp} := 0.9$$

$$K_u := 0.78 \left(\frac{\Delta p_\phi}{\textcolor{blue}{MPa}} \right)^{-0.5} = 4.503$$

$$q_{1s} := \left(\frac{M_{1xmp}}{n_{ББ}} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{R_u}{K_u \cdot \textcolor{blue}{km}} \right)^3 = 0.075$$

Принимаем мощность ББ

$$q_1 := \max(q_{1p}, q_{1s}) = 0.075$$

Масса и габариты ББ

$$q_1 := 0.1$$

$$m_{ББ} := 100 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$d_{ББ} := 0.037 \left(\frac{m_{ББ}}{\textcolor{blue}{kg}} \right)^{0.5} \textcolor{blue}{m} = 370 \text{ } \textcolor{blue}{mm}$$

$$l_{ББ} := 3 \text{ } d_{ББ} = 1110 \text{ } \textcolor{blue}{mm}$$

$$r_{нос} := 0.1 \text{ } d_{ББ} = 37 \text{ } \textcolor{blue}{mm}$$

Масса СП ПРО

$$m_{КСП} := 0.25 \text{ } m_{ББ} = 25 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{ТЛЦ} := \frac{0.8 \text{ } m_{КСП}}{2} = 10 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{ЛЛЦ} := \frac{0.2 \text{ } m_{КСП}}{3} = 1.667 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

Масса боевой комплектности

$$m_{БК} := n_{ББ} \cdot m_{ББ} + m_{КСП} = 125 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

Расчет массы ПН

$$m_{нл} := 10 \text{ } n_{ББ} \cdot \textcolor{blue}{kg} + 0.1 \text{ } m_{БК} = 22.5 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{CY} := (95 + 5 \cdot n_{ББ}^{0.5}) \text{ kg} = 100 \text{ kg}$$

$$m_{КБС} := (45 + 0.06 \cdot n_{ББ}) \text{ kg} = 45.06 \text{ kg}$$

$$K_3 := 1.15$$

Расчет массы доводочного двигателя

$$\Delta v_{\nu} := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$J_{1ДД} := 2570 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Изменение скорости при компенсации промаха

$$dLdv := \frac{4.04 + 5.69}{2} \frac{\text{km}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} = (4.865 \cdot 10^3) \text{ s}$$

$$\Delta v_{\text{зоп}} := \frac{0.04 \cdot L_{\text{max}}}{dLdv} = 73.998 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Тяга ДД

$$R_{ДД}(m_{ПН}) := 2 \frac{m_{ПН}}{\text{kg}} \cdot N$$

Масса ДД

$$m_{ДД}(\omega_{ДД}) := 9.7 \left(\frac{\omega_{ДД}}{\text{kg}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{kg} + \omega_{ДД}$$

Расход топлива ДД

$$\omega_{ДД}(m_{ПН}) := \frac{R_{ДД}(m_{ПН})}{J_{1ДД}}$$

Масса боевой ступени

$$m_{БС}(m_{ДД}) := K_3 \cdot (m_{БК} + m_{ПЛ} + m_{CY} + m_{КБС} + m_{ДД})$$

Изменение массы топлива на участках движения БС

$$\beta := 45 \text{ deg}$$

$$\Delta \omega(\Delta v, m) := \frac{\Delta v \cdot m}{J_{1ДД} \cdot \cos(\beta)}$$

Время на разворот, стабилизацию

$$\Delta t_{раз} := 10 \text{ s}$$

$V :=$	$V \leftarrow [0]$ $\omega_{дд0} \leftarrow 0 \text{ kg}$ $\omega_{дд7} \leftarrow 10 \text{ kg}$ while $\omega_{дд7} < 0 \text{ kg} \vee \omega_{дд7} > 1 \text{ kg}$	
	$\omega_{дд} \leftarrow \omega_{дд0}$ $m_{ддcur} \leftarrow m_{дд}(\omega_{дд})$ $m \leftarrow m_{БС}(m_{ддcur})$ $\omega. \leftarrow \omega_{дд.}(m)$ $t \leftarrow 0 \text{ s}$ $V_0 \leftarrow [m \ 0 \ \omega_{дд} \ 0 \ t \ 0 \text{ s}]$ $\Delta\omega_1 \leftarrow \Delta\omega(\Delta v_{зоп}, m)$ $\Delta t_1 \leftarrow \frac{\Delta\omega_1}{\omega.}$ $\Delta m_1 \leftarrow \Delta\omega_1$ $m \leftarrow m - \Delta m_1$ $\omega_{дд} \leftarrow \omega_{дд} - \Delta\omega_1$ $t \leftarrow t + \Delta t_1$ $V_1 \leftarrow [m \ \Delta m_1 \ \omega_{дд} \ \Delta\omega_1 \ t \ \Delta t_1]$	1 - компенсация промаха
	$\Delta t_2 \leftarrow 2 \ \Delta t_{раз}$ $\Delta\omega_2 \leftarrow \Delta t_2 \cdot \omega.$ $\Delta m_2 \leftarrow \Delta\omega_2$ $m \leftarrow m - \Delta m_2$ $\omega_{дд} \leftarrow \omega_{дд} - \Delta\omega_2$ $t \leftarrow t + \Delta t_2$ $V_2 \leftarrow [m \ \Delta m_2 \ \omega_{дд} \ \Delta\omega_2 \ t \ \Delta t_2]$	2 - разворот, стабилизация
	$\Delta m_3 \leftarrow m_{ТЛЦ} + m_{ЛЛЦ}$ $m \leftarrow m - \Delta m_3$ $\Delta\omega_3 \leftarrow 0$ $\Delta t_3 \leftarrow 0$ $V_3 \leftarrow [m \ \Delta m_3 \ \omega_{дд} \ \Delta\omega_3 \ t \ \Delta t_3]$	3 - отделение ТЛЦ1
	$\Delta\omega_4 \leftarrow \Delta\omega(\Delta v_{\nu}, m)$ $\Delta t_4 \leftarrow \frac{\Delta\omega_4}{\omega.}$ $\Delta m_4 \leftarrow \Delta\omega_4$ $m \leftarrow m - \Delta m_4$ $\omega_{дд} \leftarrow \omega_{дд} - \Delta\omega_4$ $t \leftarrow t + \Delta t_4$	4 - движение в ню направлении

$$\omega_{\text{дд}} := 26.5 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{\text{дд}} := m_{\text{дд}}(\omega_{\text{дд}}) = 55.419 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{\text{БС}} := m_{\text{БС}}(m_{\text{дд}}) = 400.176 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

Примем:

$$m_{\text{БС}} := 401 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

$$m_{\text{ПН}} := m_{\text{БС}} = 401 \text{ } \textcolor{blue}{kg}$$

Предварительное определение параметров УБР

Характеристическая скорость

$$K_v V_K := 800 \cdot \sqrt[4]{\frac{L_{\text{max}}}{\textcolor{blue}{km}}} \cdot \frac{\textcolor{blue}{m}}{\textcolor{blue}{s}} = (7.792 \cdot 10^3) \frac{\textcolor{blue}{m}}{\textcolor{blue}{s}}$$

Коэффициент затяжения для n=3

$$\Lambda_0 := 1.6$$

Стартовая масса ракеты, доставляющая на максимальную дальность
пустую ПН

$$m_{0x} := 0.01 \cdot \left(\frac{L_{\text{max}}}{\textcolor{blue}{km}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \textcolor{blue}{tonne} = 4.327 \text{ } \textcolor{blue}{tonne}$$

Стандартный удельный импульс топлива

$$J_{170} := 2570 \frac{\textcolor{blue}{m}}{\textcolor{blue}{s}}$$

Пустотный удельный импульс топлива на разных ступенях

$$J_{17} := \begin{bmatrix} 1.095 \\ 1.135 \\ 1.145 \end{bmatrix} \cdot J_{170} = \begin{bmatrix} 2.814 \cdot 10^3 \\ 2.917 \cdot 10^3 \\ 2.943 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{\textcolor{blue}{m}}{\textcolor{blue}{s}}$$

Средний удельный импульс

$$J_{1_} := \frac{J_{1\pi_0} + J_{1\pi_1} + J_{1\pi_2}}{3} = (2.891 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

Стартовая масса

$$m_0 := A_0 \cdot m_{\pi H} \cdot \exp\left(\frac{K_v V_K}{J_{1_}}\right) + m_{0x} = 13.826 \text{ tonne}$$

Средний относительный запас топлива

$$\mu_- := 1 - \sqrt[n]{\exp\left(-\frac{K_v V_K}{J_{1_}}\right)} = 0.593$$

Относительный запас топлива по ступеням

$$\mu_0 := 0.9 \cdot \mu_- = 0.533$$

$$\mu_2 := 1.2 \cdot \mu_0 = 0.64$$

$$\mu_1 := 1 - \frac{\exp\left(-\frac{K_v V_K}{J_{1_}}\right)}{(1 - \mu_0) \cdot (1 - \mu_2)} = 0.598$$

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.533 \\ 0.598 \\ 0.64 \end{bmatrix}$$

Диаметр первой ступени

$$D_0 := 0.52 \sqrt[3]{\frac{m_0}{\text{tonne}}} \cdot m = 1.248 \text{ m}$$

Примем диаметры ступеней равными

$$D_1 := 0.85 D_0 = 1.061 \text{ m}$$

$$D_2 := D_1 = 1.061 \text{ m}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1.248 \\ 1.061 \\ 1.061 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Давление в камере сгорания ступеней

$$p_N := \begin{bmatrix} 11.5 \\ 9.5 \\ 7.5 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

Коэффициент утолщенности сопла

$$l_{yx} := \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.1 \\ 0.07 \end{bmatrix}$$

Относительная масса полезной нагрузки

$$m_{\Pi H_-} := \frac{m_{\Pi H}}{m_0} = 0.029$$

Относительное изменение давления

$$\Delta T = 30 \text{ } \textcolor{blue}{K} \quad K_T = 0.002 \frac{1}{\textcolor{blue}{K}}$$

$$\Delta u_1 \cdot u_1 = 0.02 \quad \nu = 0.3$$

$$\Delta_{cl} = 0.035$$

$$\Delta P \cdot P_N := \frac{1}{1 - \nu} \cdot \sqrt{\Delta u_1 \cdot u_1^2 + \Delta_{cl}^2 + (K_T \cdot \Delta T)^2} = 0.103$$

Время работы маршевых ступеней в связи с отклонениями давления в КС

$$\Sigma \tau_{Ni} := \tau_{\Sigma_{max}} \cdot (1 - \Delta P \cdot P_N) = 125.543 \text{ } \textcolor{blue}{s} \quad \tau_{\Sigma_{max}} = 140 \text{ } \textcolor{blue}{s}$$

Должно выполняться условие:

$$\Sigma \tau_{Ni} \leq \Sigma \tau_{Ni}$$

Время работы ступеней (принимаем)

$$\tau_N := \begin{bmatrix} 51 \\ 39 \\ 35 \end{bmatrix} \textcolor{blue}{s}$$

Суммарное время работы маршевых ступеней

$$\tau_{\Sigma} := \tau_{N_0} + \tau_{N_1} + \tau_{N_2} = 125 \text{ } \textcolor{blue}{s}$$

$$\Sigma \tau_{Ni} = 125.543 \text{ } \textcolor{blue}{s}$$

Ограничение на время работы ступеней по максимальной перегрузке

Должно выполняться условие

$$\tau_{Ni} \geq \frac{J_{1 \Pi i}}{n_{x_{max}} \cdot g \cdot (1 - \Delta P \cdot P_N)} \cdot \frac{\mu_i}{1 - \mu_i}$$

$$i := 0 \dots 2$$

$$\tau_{min_i} := \frac{J_{1\pi_i}}{n_{x_{max}} \cdot g \cdot (1 - \Delta P \cdot P_N)} \cdot \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} = \begin{bmatrix} 18.291 \\ 24.627 \\ 29.757 \end{bmatrix} \text{ s}$$

Средний коэффициент массового совершенства

$$\alpha_- := \frac{1 - \mu_- - \sqrt[n]{m_{\pi H_-}}}{\mu_-} = 0.169$$

Коэффициенты массового совершенства

$$\alpha := \begin{bmatrix} 0.9 & \alpha_- \\ 0 & \\ 1.03 & \alpha_- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.152 \\ 0 \\ 0.174 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_1 := \frac{1 - \mu_1}{\mu_1} - \frac{m_{\pi H_-}}{\mu_1 \cdot (1 - \mu_0 \cdot (1 + \alpha_0)) \cdot (1 - \mu_2 \cdot (1 + \alpha_2))} = 0.167$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0.152 \\ 0.167 \\ 0.174 \end{bmatrix}$$

Начальные массы ступеней

$$m_{0v_0} := m_0 = 13.826 \text{ tonne}$$

$$m_{0v_1} := m_0 \cdot (1 - \mu_0 \cdot (1 + \alpha_0)) = 5.33 \text{ tonne}$$

$$m_{0v_2} := m_{0v_1} \cdot (1 - \mu_1 \cdot (1 + \alpha_1)) = 1.613 \text{ tonne}$$

$$m_{0v} = \begin{bmatrix} 13.826 \\ 5.33 \\ 1.613 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Масса топлива по ступеням

$$\omega_i := \mu_i \cdot m_{0v_i} = \begin{bmatrix} 7.376 \\ 3.186 \\ 1.033 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Конечные массы ступеней

$$m_{\kappa_i} := \alpha_i \cdot \omega_i = \begin{bmatrix} 1.12 \\ 0.531 \\ 0.179 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Расчет деформаций и относительного свода отверстия

$$\alpha_k := 1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{1}{K} \quad \alpha_m := 1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{K}$$

$$\mu_m := 0.495 \quad E_m := 7.5 \text{ МПа}$$

Равновесная эксплуатационная температура

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

Минимальная эксплуатационная температура

$$T_{min} := T_{экспл} - 15 \text{ К} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Разница равновесной и минимальной эксплуатационных температур

$$\Delta T := T_{min} - T_p = -45 \text{ К}$$

Деформация от температурных напряжений

$$\varepsilon_T(M) := \frac{\Delta T \cdot (\alpha_k - \alpha_m) \cdot (2 M^2 - \mu_m \cdot (M^2 + 1))}{1 + M^2 \cdot (1 - 2 \mu_m)}$$

Максимальное давление в начальный период работы ДУ

$$p_{max}(p) := 1.31 \text{ } p$$

$$p_{max} := p_{max}(p_N) = \begin{bmatrix} 15.065 \\ 12.445 \\ 9.825 \end{bmatrix} \text{ МПа}$$

Деформация от давления

$$\varepsilon_p(M, p) := \frac{p_{max}(p) \cdot (1 + \mu_m) \cdot (1 - 2 \mu_m) \cdot (M^2 - 1)}{E_m \cdot (1 + M^2 \cdot (1 - 2 \mu_m))}$$

Допустимая деформация

$$\varepsilon_{дон} := 0.4$$

Коэффициент безопасности

$$f := 1.35$$

Отношение внешнего диаметра к внутреннему

$$M := \sqrt{\frac{\frac{p_{max}}{E_m} \cdot (1 + \mu_m) \cdot (1 - 2 \mu_m) + \Delta T \cdot (\alpha_k - \alpha_m) \mu_m + \frac{\varepsilon_{\partial on}}{f}}{\frac{p_{max}}{E_m} (1 + \mu_m) \cdot (1 - 2 \mu_m) + \Delta T \cdot (\alpha_k - \alpha_m) (2 - \mu_m) - \frac{\varepsilon_{\partial on}}{f} (1 - 2 \mu_m)}} = \begin{bmatrix} 3.147 \\ 3.401 \\ 3.741 \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{D}{d}$$

Допустимый относительный свод горения

$$e_{\partial on_-} := \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{M} \right) = \begin{bmatrix} 0.341 \\ 0.353 \\ 0.366 \end{bmatrix}$$

Предельные базовые скорости горения

$$u_{1min} = 6 \frac{mm}{s}$$

$$u_{1max} = 15 \frac{mm}{s}$$

Функция скорости горения

$$u(p, u_1) := u_1 \cdot \left(\frac{p}{4 MPa} \right)^\nu$$

Предельные скорости горения

$$u_{min}(p) := u(p, u_{1min})$$

$$u_{max}(p) := u(p, u_{1max})$$

Предельные времена работы ступеней

$$\tau_{Nmin_i} := \frac{e_{\partial on_-i} \cdot D_i}{u_{max}(p_N)_i} = \begin{bmatrix} 20.674 \\ 19.258 \\ 21.456 \end{bmatrix} s$$

$$\tau_{Nmax_i} := \frac{e_{\partial on_-i} \cdot D_i}{u_{min}(p_N)_i} = \begin{bmatrix} 51.686 \\ 48.144 \\ 53.64 \end{bmatrix} s$$

$$\tau_N = \begin{bmatrix} 51 \\ 39 \\ 35 \end{bmatrix} \text{ s}$$

Время работы ступеней укладывается в пределы

Расширения сопел, удельный импульс

Расходный комплекс топлива

$$\beta_m := 0.651 J_{170} = (1.673 \cdot 10^3) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Площадь критического сечения сопел ДУ ступеней

$$\sigma_{kp_i} := \frac{\omega_i \cdot \beta_m}{p_{N_i} \cdot \tau_{N_i}} = \begin{bmatrix} 2.104 \cdot 10^4 \\ 1.439 \cdot 10^4 \\ 6.582 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \text{ mm}^2$$

Диаметры критических сечений сопел ДУ ступеней

$$d_{kp} := \sqrt{\frac{4 \sigma_{kp}}{\pi}} = \begin{bmatrix} 163.678 \\ 135.337 \\ 91.545 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Диаметр входного отверстия дозвуковой части сопла

$$d_{ex} := 2 d_{kp} = \begin{bmatrix} 327.357 \\ 270.674 \\ 183.091 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Относительное расширение сопла ДУ первой ступени

$$d_{a-0} := \sqrt{0.9 \frac{p_{N_0}}{\text{MPa}}} + 5 = 3.918$$

Диаметры среза сопел ДУ ступеней

$$d_a := \begin{bmatrix} d_{a-0} \cdot d_{kp_0} \\ 0.85 D_0 \\ 0.85 D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.641 \\ 1.061 \\ 0.902 \end{bmatrix} \text{ m}$$

Относительное расширение сопел верхних ступеней

$$j := 1 \dots 2$$

$$d_{a_{-j}} := \frac{d_{a_j}}{d_{kp_j}} = \begin{bmatrix} 7.839 \\ 9.85 \end{bmatrix}$$

$$d_{a_{-}} = \begin{bmatrix} 3.918 \\ 7.839 \\ 9.85 \end{bmatrix} \quad y_{a_{-}} := d_{a_{-}} = \begin{bmatrix} 3.918 \\ 7.839 \\ 9.85 \end{bmatrix}$$

Теоретический удельный импульс ДУ

$$J_{1nT} := J_{1T0} \cdot \left(\frac{1.57}{\sqrt{k}} - \frac{0.66}{(d_{a_{-}})^{\frac{2}{3}}} \right) = \begin{bmatrix} 3.08 \cdot 10^3 \\ 3.333 \cdot 10^3 \\ 3.393 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

Потери удельного импульса

$$\xi_i := 0.025 \cdot \frac{(d_{a_{-i}})^{1.25} - 1}{d_{a_{-i}}} \cdot \left(1 + \frac{11.6 \text{ } z}{\sqrt[3]{d_{kp_i}}} \right) = \begin{bmatrix} 0.075 \\ 0.104 \\ 0.123 \end{bmatrix}$$

Практический удельный импульс топлива

$$J_{1n_i} := J_{1nT_i} \cdot (1 - \xi_i) = \begin{bmatrix} 2.85 \cdot 10^3 \\ 2.985 \cdot 10^3 \\ 2.977 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

Активный участок траектории

Радиус Земли

$$R := 6371 \text{ } km$$

Угловая протяженность баллистического участка

$$\beta := \frac{L_{max}}{2 R} = 40.469 \text{ } deg$$

Угол наклона траектории в конце АУТ (угол бросания)

$$\theta_{\kappa x} := \frac{90 \text{ } deg - \beta}{2} = 24.765 \text{ } deg$$

Средний угол наклона траектории

$$\sin \theta_{1_{-}} := 1 - \mu_0 \cdot \sin(\theta_{\kappa x})^{0.8} = 0.734$$

$$\theta_{-0} := \arcsin(\sin \theta_{1_{-}}) = 47.227 \text{ } deg$$

$$\theta_{-1} := 0.25 \theta_{-0} + 0.75 \theta_{\kappa x} = 30.381 \text{ deg}$$

$$\theta_{-2} := \theta_{\kappa x} = 24.765 \text{ deg}$$

Угол наклона траектории в конце работы ступеней

$$\theta_{\kappa} := \begin{bmatrix} 0.5 (\theta_{-0} + \theta_{-1}) \\ \theta_{\kappa x} \\ \theta_{\kappa x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 38.804 \\ 24.765 \\ 24.765 \end{bmatrix} \text{ deg}$$

Коэффициент потерь для первой ступени

Давление при старте

$$p_{h1} := 0.1 \text{ MPa}$$

$$J_{1_0} := J_{1n_0} - \frac{d_{a-0}^2 \cdot p_{h1}}{p_{N_0}} \cdot \beta_m = (2.626 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$K_{n1} := \frac{J_{1n_0}}{J_{1_0}} - 1 = 0.085$$

$$S_{M1} := \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = 1.223 \text{ m}^2$$

$$P_{M1} := \frac{m_0 \cdot g}{S_{M1}} = (1.109 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$

$$c_{x1} := 0.29$$

$$K_{a_0} := 1 + K_{n1} - \frac{0.3 K_{n1} + \frac{4.8 \mu_0}{\tau_{N_0} \cdot \sin(\theta_{\kappa_0})} \cdot \frac{12000 \frac{kgf}{m^2}}{P_{M1}} \cdot \frac{c_{x1}}{0.29}}{\ln\left(\frac{1}{1 - \mu_0}\right)} = 0.956$$

Коэффициент потерь для верхних ступеней

$$K_{a_1} := 1$$

$$K_{a_2} := 1$$

$$K_a = \begin{bmatrix} 0.956 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{1_1} := J_{1n_1} = (2.985 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$J_{1_2} := J_{1n_2} = (2.977 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

Потери скорости на гравитацию

$$\Delta v_{g_i} := g \cdot \tau_{N_i} \cdot \sin(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 367.25 \\ 193.492 \\ 143.83 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$\Delta v_{g\Sigma} := \Delta v_{g_0} + \Delta v_{g_1} + \Delta v_{g_2} = 704.571 \frac{m}{s}$$

Скорости при окончании работы маршевых ступеней

$$\Delta v_i := K_{a_i} \cdot J_{1_i} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\mu_i}\right) - \Delta v_{g_i} = \begin{bmatrix} 1.547 \cdot 10^3 \\ 2.524 \cdot 10^3 \\ 2.899 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$v_0 := \Delta v_0 = (1.547 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$j := 1 \dots 2$$

$$v_j := v_{j-1} + \Delta v_j$$

$$v = \begin{bmatrix} 1.547 \cdot 10^3 \\ 4.071 \cdot 10^3 \\ 6.97 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$v_{xap} := v_2 + \Delta v_{g\Sigma} = (7.674 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$K_v V_K = (7.792 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

Высоты окончания работы маршевых ступеней

Вспомогательная функция

$$S(\mu) := \mu + (1-\mu) \ln(1-\mu)$$

$$\Delta h_i := \left(\frac{K_{a_i} \cdot J_{1_i} \cdot \tau_{N_i}}{\mu_i} \cdot S(\mu_i) - \frac{g \cdot \tau_{N_i}^2}{2} \sin(\theta_{-i}) \right) \cdot \sin(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 24.452 \\ 20.878 \\ 17.516 \end{bmatrix} km$$

$$j := 1 \dots 2$$

$$\Delta h_j := \Delta h_j + v_{j-1} \cdot \tau_{N_j} \cdot \sin(\theta_{-j}) = \begin{bmatrix} 51.397 \\ 77.203 \end{bmatrix} \text{ km}$$

$$\Delta h = \begin{bmatrix} 24.452 \\ 51.397 \\ 77.203 \end{bmatrix} \text{ km}$$

$$h_0 := \Delta h_0 = 24.452 \text{ km}$$

$$h_j := h_{j-1} + \Delta h_j$$

$$h = \begin{bmatrix} 24.452 \\ 75.849 \\ 153.052 \end{bmatrix} \text{ km}$$

$$h_\kappa := h_2 = 153.052 \text{ km}$$

Дальность окончания работы маршевых ступеней

$$\Delta l_i := \Delta h_i \cdot \cot(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 22.622 \\ 87.672 \\ 167.35 \end{bmatrix} \text{ km}$$

$$l_\kappa := \Delta l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_1 = 197.965 \text{ km}$$

Скоростной напор

Функция плотности от высоты

$$\rho(h) := \left\| \begin{array}{l} h \leftarrow \frac{h}{\text{km}} \\ \text{if } h \leq 13 \\ \left\| \exp(-1.721 \cdot 10^{-3} h^2 - 9.163 \cdot 10^{-2} h + 1.985 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \exp(4.787 \cdot 10^{-4} h^2 - 1.814 \cdot 10^{-1} h + 9.912 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right\| \end{array} \right\|$$

$$q := \frac{\rho(h_0) \cdot v_0^2}{2} = (5.188 \cdot 10^3) \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}$$

$$q < 6000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2} = 1$$

Разделение первой и второй ступеней - горячее

Массовый расчет

Суммарная масса ступеней

ДУ

Корпус

Коэффициенты заполнения КС

Относительный свод горения

$$e_{-} := e_{\partial on_{-}} = \begin{bmatrix} 0.341 \\ 0.353 \\ 0.366 \end{bmatrix}$$

$$\eta_{ux_i} := 4 \cdot e_{-i} \cdot (1 - e_{-i}) = \begin{bmatrix} 0.899 \\ 0.914 \\ 0.929 \end{bmatrix}$$

$$\eta_{\partial Hx} := 1 - 1.5 \cdot (1 - \eta_{ux}) = \begin{bmatrix} 0.848 \\ 0.87 \\ 0.893 \end{bmatrix}$$

$$\eta_u := 0.985 \cdot \eta_{ux} = \begin{bmatrix} 0.886 \\ 0.9 \\ 0.915 \end{bmatrix}$$

$$\eta_{\partial H} := 0.85 \cdot \eta_{\partial Hx} = \begin{bmatrix} 0.721 \\ 0.74 \\ 0.759 \end{bmatrix}$$

Длина сверхзвуковой части сопла

$$l_a := d_a = \begin{bmatrix} 641.277 \\ 1060.86 \\ 901.731 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Длина утопленной части сопла

$$l_{y_i} := l_{yx_i} \cdot l_{a_i} = \begin{bmatrix} 96.192 \\ 106.086 \\ 63.121 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Диаметр заднего полюсного отверстия

$$d_{02_i} := 2 d_{kp_i} + 2 \left(l_{y_i} + d_{kp_i} \right) \cdot \tan \left(30 \text{ } \textcolor{blue}{deg} \right) = \begin{bmatrix} 0.627 \\ 0.549 \\ 0.362 \end{bmatrix} \textcolor{blue}{m}$$

$$d_{02_} := \frac{d_{02}}{D} = \begin{bmatrix} 0.503 \\ 0.518 \\ 0.341 \end{bmatrix}$$

Таблица коэффициентов

$$d_{02_мабл} := \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \end{bmatrix} \quad k_u := \begin{bmatrix} 1.148 \\ 1.170 \\ 1.204 \end{bmatrix} \quad k_v := \begin{bmatrix} 0.505 \\ 0.514 \\ 0.533 \end{bmatrix} \quad k_l := \begin{bmatrix} 0.890 \\ 0.902 \\ 0.922 \end{bmatrix}$$

Интерполяция

$$k_u \left(d_{02_} \right) := \text{linterp} \left(d_{02_мабл}, k_u, d_{02_} \right)$$

$$k_v \left(d_{02_} \right) := \text{linterp} \left(d_{02_мабл}, k_v, d_{02_} \right)$$

$$k_l \left(d_{02_} \right) := \text{linterp} \left(d_{02_мабл}, k_l, d_{02_} \right)$$

$$k_u := k_u \left(d_{02_} \right) = \begin{bmatrix} 1.239 \\ 1.244 \\ 1.184 \end{bmatrix}$$

$$k_v := k_v \left(d_{02_} \right) = \begin{bmatrix} 0.553 \\ 0.555 \\ 0.522 \end{bmatrix}$$

$$k_l := k_l \left(d_{02_} \right) = \begin{bmatrix} 0.943 \\ 0.946 \\ 0.91 \end{bmatrix}$$

Радиусы ступеней

$$R := \frac{D}{2} = \begin{bmatrix} 0.624 \\ 0.53 \\ 0.53 \end{bmatrix} \textcolor{blue}{m}$$

Длина цилиндрической части ДУ

$$l_{u_i} := \frac{4 \omega_i}{\pi \cdot D_i^2 \cdot \rho_m \cdot \eta_{u_i}} - k_{l_i} \cdot R_i \cdot \frac{\eta_{\partial H_i}}{\eta_{u_i}} = \begin{bmatrix} 3201.317 \\ 1752.68 \\ 289.913 \end{bmatrix} \textcolor{blue}{mm}$$

$$k_{CK_i} := \frac{k_{u_i}}{\eta_{u_i}} + k_{V_i} \cdot \frac{\pi \cdot R_i^3}{\omega_i} \cdot \rho_m = \begin{bmatrix} 1.505 \\ 1.534 \\ 1.733 \end{bmatrix}$$

Длина днища

$$d_{0_} := \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

$$d_{0_i} := d_{0_i} \cdot D_i = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.212 \\ 0.212 \end{bmatrix} \text{ m}$$

$$l_{\partial H_i} := \left(0.305 + 0.1 \cdot d_{0_i} \right) \cdot D_i = \begin{bmatrix} 405.623 \\ 344.779 \\ 344.779 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Удлинение цилиндрического участка

$$\lambda_u := \frac{l_u}{D} = \begin{bmatrix} 2.565 \\ 1.652 \\ 0.273 \end{bmatrix}$$

$$f := 1.15$$

$$S_{max} \cdot S_{cp} := 1.15$$

$$k_{\sigma} := 1.05$$

Максимальное давление

$$p_{max} := f \cdot p_N \cdot \left(1 + \Delta P \cdot P_N \right) \cdot \left(S_{max} \cdot S_{cp} \right)^{\frac{1}{1-\nu}} \cdot k_{\sigma} = \begin{bmatrix} 1.871 \cdot 10^7 \\ 1.545 \cdot 10^7 \\ 1.22 \cdot 10^7 \end{bmatrix} \text{ Pa}$$

Силовой корпус

Материал корпуса - органопластик

$$\sigma_K := 1900 \text{ MPa}$$

$$\rho := 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma_{K_} := \frac{\sigma_K}{\rho} = \left(1.407 \cdot 10^6 \right) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$m_{CK_i} := 3 \cdot k_{CK_i} \cdot p_{max_i} \cdot \frac{\omega_i}{\sigma_{K_} \cdot \rho_m} = \begin{bmatrix} 239.243 \\ 86.997 \\ 25.152 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Закладные фланцы

$$k_{\phi л} := 0.9$$

Относительный радиус полюсных отверстий

$$r_{0_} := \frac{d_{0_} + d_{02_}}{2} = \begin{bmatrix} 0.351 \\ 0.359 \\ 0.27 \end{bmatrix}$$

Материал фланца - титановый сплав ВТ-4

$$\sigma := 1400 \text{ MPa}$$

$$\rho_{\phi л} := 4540 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{\phi л_i} := k_{\phi л} \cdot D_i^3 \cdot r_{0_}^3 \cdot \sqrt{p_N} \cdot \frac{\rho_{\phi л}}{\sqrt{\sigma}} = \begin{bmatrix} 72.999 \\ 44.83 \\ 44.83 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Юбки кокона

Материал юбки - органопластик

$$\sigma_{\text{ю}} := 1900 \text{ MPa}$$

$$\rho_{\text{ю}} := 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma_{\text{ю}_-} := \frac{\sigma_{\text{ю}}}{\rho_{\text{ю}}} = (1.407 \cdot 10^6) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$k_{\text{ю}} := 1.61$$

$$m_{\text{ю}_i} := k_{\text{ю}} \cdot \frac{p_{N_i} \cdot D_i^3}{\sigma_{\text{ю}_-}} = \begin{bmatrix} 25.575 \\ 12.975 \\ 10.243 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Крышка ВУ

$$k_{\text{ВУ}} := 0.9$$

Материал крышки ВУ - титановый сплав ВТ-4

$$\sigma_{\text{ВУ}} := 1400 \text{ MPa}$$

$$\rho_{\text{ВУ}} := 4540 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma_{BY_} := \frac{\sigma_{BY}}{\rho_{BY}} = (3.084 \cdot 10^5) \frac{m^2}{s^2}$$

$$m_{BY_i} := k_{BY_} \cdot \frac{p_{N_i} \cdot D_i^3}{\sigma_{BY_}} = \begin{bmatrix} 65.251 \\ 33.103 \\ 26.134 \end{bmatrix} kg$$

ЗКС

$$q_{ЗКС} := 2.4 \frac{kg}{m^2}$$

$$S_{ЗКС_i} := \pi \cdot D_i^2 \cdot (\lambda_{u_i} + 0.615) = \begin{bmatrix} 15.562 \\ 8.016 \\ 3.141 \end{bmatrix} m^2$$

$$m_{ЗКС} := S_{ЗКС} \cdot q_{ЗКС} = \begin{bmatrix} 37.348 \\ 19.238 \\ 7.538 \end{bmatrix} kg$$

ТЗП кокона

$$k_{ТЗП} := 1.17 \cdot 10^{-3}$$

Материал ТЗП - резина

$$\rho_{ТЗП} := 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{ТЗП_i} := k_{ТЗП} \cdot \frac{\omega_i \cdot \sqrt{\frac{p_{N_i}}{MPa} \cdot \frac{\tau_{N_i}}{s}} \cdot m}{\rho_m \cdot D_i \cdot \lambda_{u_i}^{0.25}} \rho_{ТЗП} = \begin{bmatrix} 71.526 \\ 32.243 \\ 13.796 \end{bmatrix} kg$$

Суммарная масса корпуса ДУ

$$m_{к_ДУ} := m_{ск} + m_{фл} + m_{ю} + m_{BY} + m_{ЗКС} + m_{ТЗП} = \begin{bmatrix} 511.941 \\ 229.386 \\ 127.693 \end{bmatrix} kg$$

Сопло

Утопленная оболочка сопла

$$k_{yO} := 16.5 \cdot 10^{-9}$$

Материал утопленной оболочки сопла - титановый сплав BT-6

$$\rho_{yO} := 4500 \frac{kg}{m^3}$$

$$E := 122000 \text{ MPa}$$

$$d_{y-} := \frac{d_{02}}{2 d_{kp}} = \begin{bmatrix} 1.917 \\ 2.03 \\ 1.975 \end{bmatrix}$$

Коэффициент утолщенности сопла

$$l_{y-} := l_{yx} = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.1 \\ 0.07 \end{bmatrix}$$

$$m_{yO_i} := k_{yO} \cdot \left(\frac{\beta_m \cdot \omega_i}{\tau_{N_i}} \right)^{1.5} \cdot d_{y-i}^{2.35} \cdot l_{y-i}^{0.4} \cdot d_{a-i}^{0.4} \cdot \frac{1}{\left(\frac{p_{N_i}}{10^6} \right)^{1.1}} \cdot \frac{\rho}{\left(\frac{E}{10^6} \right)^{0.4}} = \begin{bmatrix} 6.22 \\ 4.183 \\ 1.05 \end{bmatrix} kg$$

Теплозащита утолщенной оболочки

Материал ТЗУО - углепластик

$$\rho_{TЗУО} := 1400 \frac{kg}{m^3}$$

$$k_{TЗУО} := 3.7 \cdot 10^{-9}$$

$$m_{TЗУО_i} := k_{TЗУО} \cdot \frac{\beta_m \cdot \omega_i}{\sqrt{\frac{\tau_{N_i}}{s} \cdot \frac{p_{N_i}}{MPa} \cdot \frac{kg}{m^2 \cdot s}}} \cdot d_{y-i}^{1.75} \cdot \rho_{TЗУО} = \begin{bmatrix} 8.241 \\ 4.951 \\ 1.818 \end{bmatrix} kg$$

Корпус раструба

Материал корпуса раструба - титановый сплав BT-6

$$\rho_{KP} := 4500 \frac{kg}{m^3}$$

$$\sigma_{KP} := 1300 \text{ MPa}$$

$$k_{KP} := 11.2 \cdot 10^{-9}$$

Относительный диаметр раструба

$$d_{p-} := \begin{bmatrix} d_{a-0} \\ 4.5 \\ 4.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.918 \\ 4.5 \\ 4.5 \end{bmatrix}$$

$$m_{KP_i} := k_{KP} \cdot \left(\frac{\frac{\beta_m}{m} \cdot \frac{\omega_i}{kg}}{\frac{\tau_{N_i}}{s}} \right)^{1.5} \cdot d_{p-i}^{1.75} \cdot \frac{\frac{\rho_{KP}}{kg}}{\frac{p_{N_i}}{MPa} \cdot \frac{\sigma_{KP}}{MPa}} \cdot kg = \begin{bmatrix} 4.378 \\ 2.867 \\ 0.788 \end{bmatrix} kg$$

Облицовка раструба

$$k_{obl} := 3.1 \cdot 10^{-9}$$

Материал облицовки - углепластик

$$\rho_{obl} := 1400 \frac{kg}{m^3}$$

$$m_{obl_i} := k_{obl} \cdot \frac{\frac{\beta_m}{m} \cdot \frac{\omega_i}{kg}}{\sqrt{\frac{p_{N_i}}{MPa} \cdot \frac{\tau_{N_i}}{s}}} \cdot d_{a-i}^{1.75} \cdot \frac{\rho_{obl}}{m^3} \cdot kg = \begin{bmatrix} 24.129 \\ 44.13 \\ 25.348 \end{bmatrix} kg$$

Горловина

$$k_2 := 6.44 \cdot 10^{-5}$$

$$m_{2_i} := k_2 \cdot \frac{\frac{\beta_m}{m} \cdot \frac{\omega_i}{kg}}{\sqrt{\frac{p_{N_i}}{MPa} \cdot \frac{\tau_{N_i}}{s}}} \cdot kg = \begin{bmatrix} 32.817 \\ 17.832 \\ 6.868 \end{bmatrix} kg$$

Суммарная масса сопел ДУ

$$m_{с_ДУ} := m_{yO} + m_{T3yO} + m_{KP} + m_{obl} + m_2 = \begin{bmatrix} 75.785 \\ 73.963 \\ 35.872 \end{bmatrix} kg$$

Привод рулевых машин

$$k_{PMY} := \begin{bmatrix} 0.65 \\ 0.57 \\ 0.38 \end{bmatrix}$$

$$m_{PMY_i} := k_{PMY_i} \cdot \frac{\frac{\omega_i}{kg}}{\sqrt{\frac{D_i}{m} \cdot \frac{\tau_{N_i}}{s}}} \cdot kg = \begin{bmatrix} 84.149 \\ 45.204 \\ 10.886 \end{bmatrix} kg$$

Суммарная масса ДУ

$$m_{ДУ} := m_{K_ДУ} + m_{C_ДУ} + m_{PMY} = \begin{bmatrix} 671.876 \\ 348.553 \\ 174.45 \end{bmatrix} kg$$

Соединительные отсеки

Диаметр боевой ступени

$$D_{BC} := 800 \text{ } mm \quad D_{BC} := D_2 = 1.061 \text{ } m$$

Приборный отсек

Плотность ПО

$$\rho_{ПО} := 300 \frac{kg}{m^3}$$

Объем ПО

$$V_{ПО} := \frac{m_{CY}}{\rho_{ПО}} = 0.333 \text{ } m^3 \quad m_{CY} = 100 \text{ } kg$$

Длина ПО

$$l_{ПО} := \frac{V_{ПО}}{\frac{\pi \cdot D_{BC}^2}{4}} = 377.114 \text{ } mm$$

Хвостовой отсек

$$K_{ХО} := 20 \frac{kg}{m^2}$$

Длина хвостового отсека

$$l_{ХО} := 857 \text{ } mm$$

$$m_{\chi O} := K_{\chi O} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot l_{\chi O} = 67.205 \text{ } kg$$

Переходные отсеки

Разделение первой и второй ступеней - продольно-поперечное, остальных - поперечное

$$K_{\Pi \chi O} := \begin{bmatrix} 20 \\ 24 \\ 20 \end{bmatrix} \frac{kg}{m^2}$$

Длины переходных отсеков

$$l_{\Pi \chi O} := \begin{bmatrix} 1506 \\ 1366 \\ 445 \end{bmatrix} mm$$

$$m_{\Pi \chi O} := K_{\Pi \chi O} \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\Pi \chi O} = \begin{bmatrix} 338.942 \\ 307.434 \\ 100.152 \end{bmatrix} kg$$

Масса отсеков

$$m_{omc} := m_{\Pi \chi O} + \begin{bmatrix} m_{\chi O} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 406.147 \\ 307.434 \\ 100.152 \end{bmatrix} kg$$

Головной обтекатель

Отделение головного обтекателя - поперечное

$$k_{ГО} := 20 \frac{kg}{m^2}$$

Площадь головного обтекателя

Приближенно примем форму обтекателя конической

Длина образующей ГО

$$l_{обр_ГО} := 1370 \text{ } mm$$

$$S_{ГО} := \pi \cdot \frac{D_{БС}}{2} \cdot l_{обр_ГО} = 2.283 \text{ } m^2$$

$$m_{ГО} := k_{ГО} \cdot S_{ГО} + 10 \text{ } kg = 55.659 \text{ } kg$$

Бортовая кабельная сеть

Длины ступеней

$$l_{cm} := \begin{bmatrix} 5572 \\ 3118 \\ 1698 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Длины транзитных кабелей

$$l_{mp} := \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} \text{ m}$$

$$m_{БКС_i} := \left(0.8 \frac{l_{cm_i}}{\text{m}} + 2 + 0.8 \frac{l_{mp_i}}{\text{m}} + 2 \right) \text{ kg} = \begin{bmatrix} 8.458 \\ 8.094 \\ 6.958 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Масса конструкции

$$m_{\kappa} := m_{ДУ} + m_{омс} + m_{ГО} + m_{БКС} = \begin{bmatrix} 1142.139 \\ 719.74 \\ 337.22 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Стартовая масса ступеней

$$m_{0_2} := m_{ПН} + m_{\kappa_2} + \omega_2 = 1.771 \text{ tonne}$$

$$m_{0_1} := m_{0_2} + m_{\kappa_1} + \omega_1 = 5.676 \text{ tonne}$$

$$m_{0_0} := m_{0_1} + m_{\kappa_0} + \omega_0 = 14.195 \text{ tonne}$$

Относительный запас топлива

$$\mu := \frac{\omega}{m_0} = \begin{bmatrix} 0.52 \\ 0.561 \\ 0.583 \end{bmatrix}$$

Коэффициент массового совершенства

$$\alpha := \frac{m_{\kappa}}{\omega} = \begin{bmatrix} 0.155 \\ 0.226 \\ 0.327 \end{bmatrix}$$

Коэффициент массового совершенства ДУ

$$\alpha_{\text{ДУ}} := \frac{m_{\text{ДУ}}}{\omega} = \begin{bmatrix} 0.091 \\ 0.109 \\ 0.169 \end{bmatrix}$$

Определение параметров АУТ и определение максимальной дальности

Радиус Земли

$$R_3 := 6371 \text{ km}$$

Угловая протяженность баллистического участка

$$\beta := \frac{L_{\text{max}}}{2 R_3} = 40.469 \text{ deg}$$

Угол наклона траектории в конце АУТ (угол бросания)

$$\theta_{\kappa x} := \frac{90 \text{ deg} - \beta}{2} = 24.765 \text{ deg}$$

Средний угол наклона траектории

$$\sin \theta_{1-} := 1 - \mu_0 \cdot \sin(\theta_{\kappa x})^{0.8} = 0.741$$

$$\theta_{-0} := \arcsin(\sin \theta_{1-}) = 47.812 \text{ deg}$$

$$\theta_{-1} := 0.25 \theta_{-0} + 0.75 \theta_{\kappa x} = 30.527 \text{ deg}$$

$$\theta_{-2} := \theta_{\kappa x} = 24.765 \text{ deg}$$

Угол наклона траектории в конце работы ступеней

$$\theta_{\kappa} := \begin{bmatrix} 0.5 (\theta_{-0} + \theta_{-1}) \\ \theta_{\kappa x} \\ \theta_{\kappa x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 39.169 \\ 24.765 \\ 24.765 \end{bmatrix} \text{ deg}$$

Коэффициент потерь для первой ступени

Давление при старте

$$p_{h1} := 0.1 \text{ MPa}$$

$$J_{1_0} := J_{1n_0} - \frac{d_{a_0}^2 \cdot p_{h1}}{p_{N_0}} \cdot \beta_m = (2.626 \cdot 10^3) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$K_{n1} := \frac{J_{1n_0}}{J_{1_0}} - 1 = 0.085$$

$$S_{M1} := \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = 1.223 \text{ m}^2$$

$$P_{M1} := \frac{m_{0_0} \cdot g}{S_{M1}} = (1.138 \cdot 10^5) \text{ Pa}$$

$$c_{x1} := 0.29$$

$$K_{a_0} := 1 + K_{n1} - \frac{0.3 K_{n1} + \frac{4.8 \mu_0}{\tau_{N_0} \cdot \sin(\theta_{\kappa_0})} \cdot \frac{12000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}}{P_{M1}} \cdot \frac{c_{x1}}{0.29}}{\ln\left(\frac{1}{1 - \mu_0}\right)} = 0.957$$

Коэффициент потерь для верхних ступеней

$$K_{a_1} := 1$$

$$K_{a_2} := 1$$

$$K_a = \begin{bmatrix} 0.957 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{1_1} := J_{1n_1} = (2.985 \cdot 10^3) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$J_{1_2} := J_{1n_2} = (2.977 \cdot 10^3) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Потери скорости на гравитацию

$$\Delta v_{g_i} := g \cdot \tau_{N_i} \cdot \sin(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 370.701 \\ 194.334 \\ 143.83 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Delta v_{g\Sigma} := \Delta v_{g_0} + \Delta v_{g_1} + \Delta v_{g_2} = 708.865 \frac{m}{s}$$

Скорости при окончании работы маршевых ступеней

$$\Delta v_i := K_{a_i} \cdot J_{1_i} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \mu_i} \right) - \Delta v_{g_i} = \begin{bmatrix} 1.471 \cdot 10^3 \\ 2.264 \cdot 10^3 \\ 2.461 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$v_0 := \Delta v_0 = (1.471 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$j := 1 \dots 2$$

$$v_j := v_{j-1} + \Delta v_j$$

$$v = \begin{bmatrix} 1.471 \cdot 10^3 \\ 3.735 \cdot 10^3 \\ 6.196 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$v_{xap} := v_2 + \Delta v_{g\Sigma} = (6.905 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

$$K_v V_K = (7.792 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

Высоты окончания работы маршевых ступеней

Вспомогательная функция

$$S(\mu) := \mu + (1 - \mu) \ln(1 - \mu)$$

$$\Delta h_i := \left(\frac{K_{a_i} \cdot J_{1_i} \cdot \tau_{N_i}}{\mu_i} \cdot S(\mu_i) - \frac{g \cdot \tau_{N_i}^2}{2} \sin(\theta_{-i}) \right) \cdot \sin(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 23.583 \\ 19.12 \\ 15.291 \end{bmatrix} km$$

$$j := 1 \dots 2$$

$$\Delta h_j := \Delta h_j + v_{j-1} \cdot \tau_{N_j} \cdot \sin(\theta_{-j}) = \begin{bmatrix} 48.266 \\ 70.058 \end{bmatrix} km$$

$$\Delta h = \begin{bmatrix} 23.583 \\ 48.266 \\ 70.058 \end{bmatrix} km$$

$$h_0 := \Delta h_0 = 23.583 km$$

$$h_j := h_{j-1} + \Delta h_j$$

$$h = \begin{bmatrix} 23.583 \\ 71.849 \end{bmatrix} km$$

$$\left[141.908 \right]$$

$$h_{\kappa} := h_2 = 141.908 \text{ } km$$

Дальность окончания работы маршевых ступеней

$$\Delta l_i := \Delta h_i \cdot \cot(\theta_{-i}) = \begin{bmatrix} 21.375 \\ 81.852 \\ 151.862 \end{bmatrix} km$$

$$l_{\kappa} := \Delta l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_1 = 185.079 \text{ } km$$

Скоростной напор

Функция плотности от высоты

$$\rho(h) := \left\| \begin{array}{l} h \leftarrow \frac{h}{km} \\ \text{if } h \leq 13 \\ \left\| \exp(-1.721 \cdot 10^{-3} h^2 - 9.163 \cdot 10^{-2} h + 1.985 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{kg}{m^3} \right\| \\ \text{else} \\ \left\| \exp(4.787 \cdot 10^{-4} h^2 - 1.814 \cdot 10^{-1} h + 9.912 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{kg}{m^3} \right\| \end{array} \right\|$$

$$q := \frac{\rho(h_0) \cdot v_0^2}{2} = (5.383 \cdot 10^3) \frac{kgf}{m^2}$$

$$q < 6000 \frac{kgf}{m^2} = 1$$

Разделение первой и второй ступеней - горячее

Максимальная дальность полета ракеты

$$\mu_0 := 3.988 \cdot 10^5 \frac{km^3}{s^2}$$

$$r_{\kappa} := R_3 + h_{\kappa} = (6.513 \cdot 10^3) \text{ } km$$

Конечная скорость ракеты

$$v_{\kappa} := v_2 = (6.196 \cdot 10^3) \frac{m}{s}$$

Относительная скорость ракеты в конце АУТ

$$\nu_{\kappa} := \frac{v_{\kappa}^2 \cdot r_{\kappa}}{\mu_0} = 0.627$$

Угол наклона траектории в конце АУТ

$$\theta_{\kappa} := \theta_{\kappa_2} = 24.765 \text{ } deg$$

Дальность баллистического участка

$$L_{бал} := 2 R_3 \cdot \operatorname{atan} \left(\frac{\nu_{\kappa} \cdot \tan(\theta_{\kappa})}{1 - \nu_{\kappa} + \tan(\theta_{\kappa})^2} \right) = (5.845 \cdot 10^3) \text{ } km$$

Полная дальность полета

$$L_{расч} := L_{бал} + 2 l_{\kappa} = (6.215 \cdot 10^3) \text{ } km$$

Разность дальностей

$$\Delta L := L_{расч} - L_{max} = -2.785 \cdot 10^3 \text{ } km$$

Перерасчет параметров

Разница скорости в конце АУТ

$$dL.dv_{\kappa} := 3.8 \frac{km}{\frac{m}{s}}$$

$$\Delta v_{\kappa} := \frac{\Delta L}{dL.dv_{\kappa}} = -732.957 \frac{m}{s}$$

Распределение разницы скорости по ступеням

$$\Delta v' := \Delta v_{\kappa} \cdot \frac{\Delta v}{v_{\kappa}} = \begin{bmatrix} -174.036 \\ -267.825 \\ -291.096 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

Корректировка массы топлива

$$\Delta\omega_2 := \frac{\frac{\Delta v'_2 \cdot m_{0_2}}{J_{1_2}}}{1 - \left(\frac{\mu_2}{1 - \mu_2} \right) \cdot 0.7 \cdot \alpha_{dy_2} - \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \mu_2}\right)}{\mu_2} \cdot \left(\frac{J_{170}}{J_{1_2}} \right) \cdot \left(\frac{0.22}{d_{a_{-2}}^{\frac{2}{3}}} \right)} = 224.161 \text{ kg}$$

$$\Delta\omega_1 := \frac{-\frac{\Delta v'_1 \cdot m_{0_1}}{J_{1_1}} + \left(\frac{\mu_1}{1 - \mu_1} \right) \cdot (1 + 0.7 \alpha_{dy_2}) \cdot \Delta\omega_2}{1 - \left(\frac{\mu_1}{1 - \mu_1} \right) \cdot 0.7 \cdot \alpha_{dy_1} - \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \mu_1}\right)}{\mu_1} \cdot \left(\frac{J_{170}}{J_{1_1}} \right) \cdot \left(\frac{0.22}{d_{a_{-1}}^{\frac{2}{3}}} \right)} = 998.1 \text{ kg}$$

$$\Delta\omega_0 := \frac{-\frac{\Delta v'_0 \cdot m_{0_0}}{J_{1_0}} + \left(\frac{\mu_0}{1 - \mu_0} \right) \cdot (1 + 0.7 \alpha_{dy_1}) \cdot \Delta\omega_1 + (1 + 0.7 \alpha_{dy_2}) \cdot \Delta\omega_2}{1 - \left(\frac{\mu_0}{1 - \mu_0} \right) \cdot 0.7 \cdot \alpha_{dy_0}} = 2528.111 \text{ kg}$$

$$\Delta\omega = \begin{bmatrix} 2528.111 \\ 998.1 \\ 224.161 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

$$\omega' := \omega + \Delta\omega = \begin{bmatrix} 9.904 \\ 4.184 \\ 1.257 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Корректировка суммарной массы

$$\Delta Q := \overrightarrow{(1 + 0.7 \alpha_{dy}) \cdot \Delta\omega} = \begin{bmatrix} 2.689 \cdot 10^3 \\ 1.075 \cdot 10^3 \\ 250.668 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Корректировка относительного расширения сопла

$$\Delta y_{a_-} := -0.5 y_{a_-} \cdot \overrightarrow{\left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right)} = \begin{bmatrix} -0.671 \\ -1.228 \\ -1.069 \end{bmatrix}$$

[3.246]

$$y'_{a_-} := y_{a_-} + \Delta y_{a_-} = \begin{bmatrix} 6.611 \\ 8.781 \end{bmatrix}$$

Корректировка практического удельного импульса

$$\Delta J_{1n} := -0.22 \cdot \left(\frac{J_{170}}{y_{a_-}} \right) \cdot \left(\frac{\Delta \omega}{\omega} \right) = -84.52 \frac{m}{s}$$

Корректировка массы конструкции

$$\Delta m_k := \overrightarrow{\alpha_{дy}} \cdot \Delta \omega = \begin{bmatrix} 230.281 \\ 109.206 \\ 37.866 \end{bmatrix} kg$$

$$m'_k := m_k + \Delta m_k = \begin{bmatrix} 1372.421 \\ 828.946 \\ 375.087 \end{bmatrix} kg$$

Корректировка диаметра критического сечения

$$d'_{kp} := d_{kp} \cdot \sqrt{\frac{\omega'}{\omega}} = \begin{bmatrix} 189.665 \\ 155.096 \\ 100.993 \end{bmatrix} mm$$

Корректировка удельного импульса

$$J'_{1ПТ} := J_{170} \cdot \left(\frac{1.57}{\sqrt{k}} - \frac{0.66}{y'_{a_-} \frac{2}{3}} \right) = \begin{bmatrix} 2.989 \cdot 10^3 \\ 3.281 \cdot 10^3 \\ 3.364 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

$$\Sigma \zeta' := \frac{\overrightarrow{0.025 \cdot (y_{a_-}^{1.25} - 1) \cdot \left(1 + \frac{11.6 z}{\left(\frac{d'_{kp}}{mm} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)}}{y'_{a_-}} = \begin{bmatrix} 0.059 \\ 0.08 \\ 0.088 \end{bmatrix}$$

$$J'_1 := \overrightarrow{J'_{1ПТ} \cdot (1 - \Sigma \zeta')} = \begin{bmatrix} 2.812 \cdot 10^3 \\ 3.017 \cdot 10^3 \\ 3.069 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{m}{s}$$

Корректировка стартовой массы

$$m'_0 := m_0 + \Delta m_k + \Delta \omega = \begin{bmatrix} 16.953 \\ 6.784 \\ 2.033 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Корректировка относительного запаса топлива

$$\mu' := \frac{\omega'}{m'_0} = \begin{bmatrix} 0.584 \\ 0.617 \\ 0.618 \end{bmatrix} \quad \mu = \begin{bmatrix} 0.52 \\ 0.561 \\ 0.583 \end{bmatrix}$$

После перерасчета по формулам, представленным выше, используя полученные значения масс, получим новые параметры ракеты

Стартовая масса ступени

$$m_0 := \begin{bmatrix} 18.23 \\ 7.002 \\ 2.021 \end{bmatrix} \cdot \text{tonne}$$

Масса конструкции

$$m_k := \begin{bmatrix} 1323.261 \\ 797.65 \\ 362.817 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

Масса топлива

$$\omega := \begin{bmatrix} 9.904 \\ 4.184 \\ 1.257 \end{bmatrix} \text{ tonne}$$

Практический удельный импульс

$$J_1 := \begin{bmatrix} 2.632 \cdot 10^3 \\ 2.966 \cdot 10^3 \\ 2.973 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Для новой ракеты рассчитаем максимальную дальность полета

$$L_{расч} := 9.135 \cdot 10^3 \text{ km}$$

Разность между требуемой и рассчитанной дальностью

$$\Delta L := 135.212 \text{ km}$$

Данное значение попадает в промежуток $[L, L+200\text{км}]$, поэтому принимаем полученные параметры ракеты