



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ «Специальное машиностроение»

КАФЕДРА СМ1 «Космические аппараты и ракеты-носители»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

Расчет и проектирование подвижного
грунтового ракетного комплекса

Студент СМ1-81
(Группа)

Н. А. Гусева
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Руководитель курсовой работы

К. В. Навагин
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант

К. В. Навагин
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Москва
2023 г.

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

$R_{ц} := 3 \text{ km}$ - 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 _{ББ} , 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)

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

- уровень тяги доводочных ДУ с РГЧ на пониженном режиме

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

- 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

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

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

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

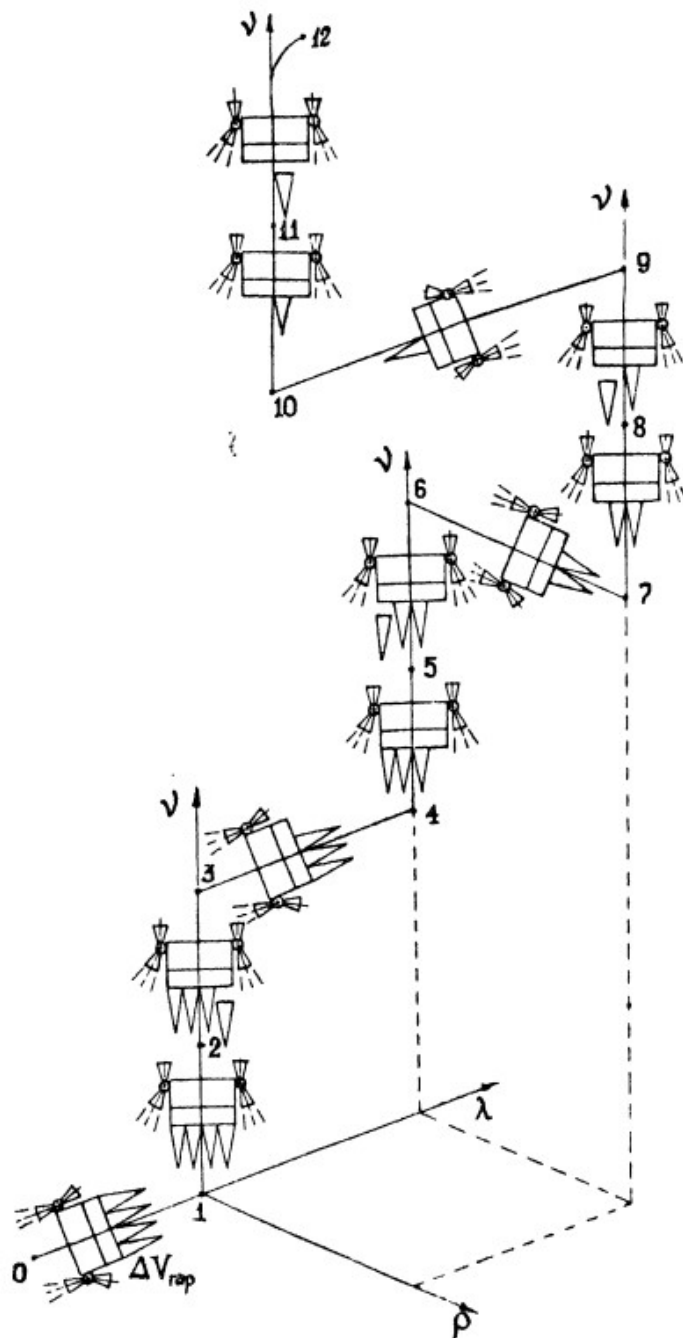


Рис. 7.6. Схема функционирования полезной нагрузки УБР с РГЧ ($n_{\text{ББ}} = 4$) на

участке работы доводочной ДУ:
 0-1 - компенсация недолета маршевых ступеней;
 1-2, 4-5, 7-8, 10-11 - разворот и стабилизация движения по V -направлению;
 2-3 - отход от ББ № 1 и разворот на λ -направление;
 3-4 - разведение (перенацеливание) на 2-ю цель ($\Delta V_{\Delta L}$);
 5-6 - отход от ББ № 2 и разворот на ρ -направление;
 6-7 - разведение (перенацеливание) на 3-ю цель ($\Delta V_{\Delta L}$);
 8-9 - отход от ББ № 3 и разворот на λ -направление;
 9-10 - разведение (перенацеливание) на 4-ю цель ($\Delta V_{\Delta L}$);
 11-12 - отход от ББ № 4 и увод БС;
 2 - отделение ББ № 1;
 5 - отделение ББ № 2;
 8 - отделение ББ № 3;
 11 - отделение ББ № 4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Общий запас топлива доводочной ДУ :

$$\omega(m_{ПН}) := \Delta \omega_{зар}(m_{ПН}) + \sum_{q=1}^4 \Delta \omega_{наб1}(m_{ПН}) + \sum_{p=1}^1 \Delta \omega_{раз1}(m_{ПН})$$

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

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

- 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

$$m'_{minДД} := \frac{R_{minДД}}{J_{1ДУ}} = 0.232 \frac{kg}{s}$$

- секундные массовый расход в пониженном режиме

$$m'_{maxДД} := \frac{R_{maxДД}}{J_{1ДУ}} = 1.161 \frac{kg}{s}$$

- 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 , км	h_k , км	l_k , км	θ_k^* , град	V_k , м/с	$\partial L / \partial V_k$, км/м/с	$\partial L / \partial h_k$, км/км	ΔV_c , 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	1160
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	7308	8,0	7,43	1000

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\mu_1 := 0.9 \cdot \mu = 0.647 \quad \mu_2 := 1 - \frac{\exp \left(-\frac{K_V V_K}{J_{1cp}} \right)}{(1 - \mu_1)} = 0.776$$

2.3 Время работы ДУ ступеней, уточнение коэффициентов μ_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:

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

$$\Delta pp_N := \frac{1}{1 - \nu} \cdot \sqrt{(\Delta u'_1)^2 + \Delta_{cl}^2 + (K_T \cdot \Delta T)^2} = 0.096$$

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

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

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

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

Тогда для второй ступени

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

Переопределим μ_2 из полученных условий. Запишем в блок решения необходимые ограничения для μ_2 в виде:

Найти коэффициенты

$$\mu_1 := 0.647$$

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

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

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

Для справки приведем значения осевых перегрузок

$$n_{x.max1} := \frac{J_{1\Gamma 1} \cdot \mu_1}{\tau_{N1} \cdot (1 - \Delta pp_N) \cdot g \cdot (1 - \mu_1)} = 10.19$$

$$n_{x.max2} := \frac{J_{1\Gamma 2} \cdot \mu_2}{\tau_{N2} \cdot (1 - \Delta pp_N) \cdot g \cdot (1 - \mu_2)} = 19.984$$

2.3 Величина стартовой массы ракеты и величины ее относительной грузоподъемности

$\Lambda_0 := 1.65$

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

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

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

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

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

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

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

Масса второй ступени:

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

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

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

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

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

Диаметры ступеней

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

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

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

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

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

$$m'_i \cdot \beta = p_{Ni} \cdot F_{kpi}$$

$$\beta := 0.651 \cdot J_{1T.0} = (1.641 \cdot 10^3) \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{- расходный комплекс в зависимости от теоретического удельного импульса в стандартных условиях}$$

$F_{\kappa pi}$ - площадь критического сечения сопла двигателя данной ступени

$$F_{\kappa p1} := \frac{m'_1 \cdot \beta}{p_{N1}} = 0.037 \text{ м}^2 \quad d_{\kappa p1} := \sqrt[2]{\frac{4 \cdot F_{\kappa p1}}{\pi}} = 21.671 \text{ см} \quad d_{\kappa p1} = 0.217 \text{ м}$$

$$F_{\kappa p2} := \frac{m'_2 \cdot \beta}{p_{N2}} = 0.016 \text{ м}^2 \quad d_{\kappa p2} := \sqrt[2]{\frac{4 \cdot F_{\kappa p2}}{\pi}} = 14.064 \text{ см} \quad d_{\kappa p2} = 0.141 \text{ м}$$

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

$$d_{a1} := d'_{a1} \cdot d_{\kappa p1} = 0.861 \text{ м}$$

$$d'_{a2} := \frac{d_{a2}}{d_{\kappa p2}} = 9.017$$

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

$J_{1\Gamma i} = J_{1Ti} \cdot (1 - \zeta_i)$, где ζ_i - суммарные потери удельного импульса

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

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

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

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

$$\zeta_1 := 0.025 \cdot \frac{d'_{a1}{}^{1.25} - 1}{d'_{a1}} \cdot \left(1 + \frac{11.6 \cdot z}{\sqrt[3]{d_{\kappa p1}}} \right) = 0.069$$

$$\zeta_2 := 0.025 \cdot \frac{d'_{a2}{}^{1.25} - 1}{d'_{a2}} \cdot \left(1 + \frac{11.6 \cdot z}{\sqrt[3]{d_{\kappa p2}}} \right) = 0.105$$

$$J_{1\Gamma 1} := J_{1T1} \cdot (1 - \zeta_1) = (2.818 \cdot 10^3) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

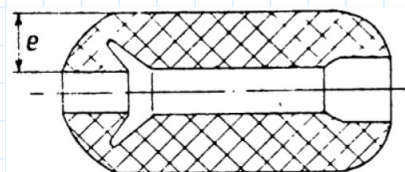
$$J_{1\Gamma 2} := J_{1T2} \cdot (1 - \zeta_2) = (2.959 \cdot 10^3) \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

2.6 Уточнение времени работы ДУ всех ступеней или их калибров.

Максимальное и минимальное время работы ДУ:

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$T_p := 50 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Delta T := (T_p - T_{min}) = 90 \text{ K}$$

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

$$\varepsilon_{don} := 0.4 \quad \text{- допустимая деформация топлива}$$

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

Вычислим М для ДУ первой ступени:

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

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

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.

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

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

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

Массу кокона для каждой ступени можно рассчитать по следующей зависимости:

$$m_{CKi} = 3 \cdot K_{CKi} \cdot P_{MAXi} \cdot \frac{\omega_i}{\sigma'_K \cdot \rho_T}$$

$$\sigma'_K := \sigma_K \cdot g = (1.275 \cdot 10^6) \frac{m^2}{s^2}$$

$$K_{CKi} = \frac{K_{\psi i}}{\eta_{\psi i}} + \frac{K_{Vi} \cdot \pi \cdot R_i^3}{\omega_i} \cdot \rho_T$$

$$\sigma'_K \cdot 1350 \frac{kg}{m^3} = (1.721 \cdot 10^3) MPa$$

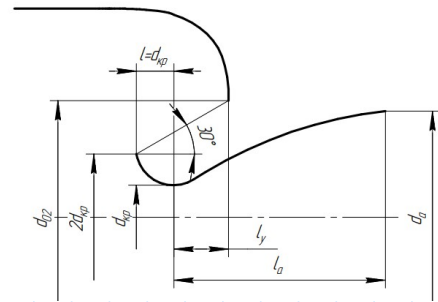
$$\eta_{\psi i} = 0.985 \cdot \eta'_{\psi i} \quad \eta'_{\psi i} = 4 \cdot e'_{\partial oni} \cdot (1 - e'_{\partial oni}) \quad - \text{коэффициент объемного заполнения топливом ДУ } i\text{-ой ступени}$$

R_i - радиус i -ой ступени

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

Значения коэффициентов

\bar{d}_{02}	K_{ψ}	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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Тогда коэффициенты будут приближенно равны

ДУ 1 ступени

$$K_{u1} := K_u(d'_{021}) = 1.304 \quad K_{V1} := K_V(d'_{021}) = 0.556 \quad K_{l1} := K_l(d'_{021}) = 0.988$$

ДУ 2 ступени

$$K_{u2} := K_u(d'_{022}) = 1.239 \quad K_{V2} := K_V(d'_{022}) = 0.541 \quad K_{l2} := K_l(d'_{022}) = 0.943$$

Вычислим объемные коэффициенты заполнения цилиндрической части корпуса двигателей

Первая ступень

$$\eta'_{\zeta1} := 4 \cdot e'_{\partial on1} \cdot (1 - e'_{\partial on1}) = 0.95$$

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

Вторая ступень

$$\eta'_{\zeta2} := 4 \cdot e'_{\partial on2} \cdot (1 - e'_{\partial on2}) = 0.966$$

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

Теперь можем рассчитать массы коконов:

ДУ первой ступени

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

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

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

ДУ второй ступени

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

$$K_{CK2} := \frac{K_{u2}}{\eta_{\zeta2}} + \frac{K_{V2} \cdot \pi \cdot R_2^3}{\omega_2} \cdot \rho_T = 1.454$$

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

Размеры силовой оболочки

Коэффициенты объемного заполнения днищ корпуса РДТТ

Первая ступень

$$\eta'_{\partial H1} := 1 - 1.5 \cdot (1 - \eta'_{\zeta1}) = 0.925$$

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

Вторая ступень

$$\eta'_{\partial H2} := 1 - 1.5 \cdot (1 - \eta'_{\zeta2}) = 0.948$$

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

Тогда длины цилиндрических участков ДУ каждой ступени

$$l_{\zeta1} := \frac{4 \cdot \omega_1}{\pi \cdot D_1^2 \cdot \rho_T \cdot \eta_{\zeta1}} - K_{l1} \cdot R_1 \cdot \frac{\eta_{\partial H1}}{\eta_{\zeta1}} = 4.574 \text{ м}$$

$$l_{\zeta2} := \frac{4 \cdot \omega_2}{\pi \cdot D_2^2 \cdot \rho_T \cdot \eta_{\zeta2}} - K_{l2} \cdot R_2 \cdot \frac{\eta_{\partial H2}}{\eta_{\zeta2}} = 1.888 \text{ м}$$

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

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

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:

$$m_{\phi l1} := K_{\phi l} \cdot \rho_{Ti} \cdot r'_{cp1}{}^3 \cdot D_1{}^3 \cdot \sqrt{\frac{p_{N1}}{\sigma_{\phi l}}} = 8.5 \text{ кг}$$

$$m_{\phi l2} := K_{\phi l} \cdot \rho_{Ti} \cdot r'_{cp2}{}^3 \cdot D_2{}^3 \cdot \sqrt{\frac{p_{N2}}{\sigma_{\phi l}}} = 3.22 \text{ кг}$$

Масса юбок корпуса

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

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

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

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

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

$$V_{ю1} := \frac{m_{ю1}}{2 \cdot \rho_K} = 0.019 \text{ } m^3 \quad V_{ю2} := \frac{m_{ю2}}{2 \cdot \rho_K} = 0.01 \text{ } m^3$$

Решив систему уравнений

$$\delta_{ю1} := 1 \text{ } mm \quad \delta_{ю2} := 1 \text{ } mm$$

$$V_{ю1} = \pi \cdot \left((D_1 + \delta_{ю1})^2 - D_1^2 \right) \cdot l_{ю1}$$

$$V_{ю2} = \pi \cdot \left((D_2 + \delta_{ю2})^2 - D_2^2 \right) \cdot l_{ю2}$$

$$\text{Find}(\delta_{ю1}, \delta_{ю2}) = \begin{bmatrix} 8.859 \\ 6.278 \end{bmatrix} \text{ } mm$$

Масса заряда и крышки воспламенительного устройства

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

$$m_{зBy1} := K_{зBy} \cdot \left(\frac{\omega_1}{\rho_T} \right)^{\frac{2}{3}} = 9.16 \text{ } kg$$

$$m_{зBy2} := K_{зBy} \cdot \left(\frac{\omega_2}{\rho_T} \right)^{\frac{2}{3}} = 4.451 \text{ } kg$$

Масса крышки воспламенительного устройства (ВУ)

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

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

$$m_{By1} := \frac{K_{By} \cdot p_{N1} \cdot d'_{011}^3 \cdot D_1^3}{\sigma'_B} = 5.646 \text{ } kg \quad m_{\Pi\Gamma} = 80 \text{ } kg$$

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

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

$$l_{\Gamma\Gamma} := \frac{4 \cdot \frac{m_{\Gamma\Gamma}}{\rho_{Ti}}}{\pi \cdot d_{\Gamma\Gamma}^2} = 0.014 \text{ m}$$

Масса защитно-крепящего слоя

$$m_{3KC_i} = \pi \cdot D_i^2 \cdot \left(\frac{l_{\psi i}}{D_i} + 0.615 \right) \cdot q_{3KC}$$

$$q_{3KC} := 2.4 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

- 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

$$m_{T3П} = \frac{K_{T3П} \cdot \omega_i \cdot \sqrt[2]{p_{Ni} \cdot \tau_{Ni}}}{\rho_T \cdot D_i \cdot \left(\frac{l_{\psi i}}{D_i} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3П}$$

$$K_{T3П} := 1.17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\text{m}^{\frac{3}{2}} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}}{\text{kg}^{\frac{3}{2}}} \cdot \text{kg}$$

$$\rho_{T3П} := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{T3П1} := \frac{K_{T3П} \cdot \frac{\omega_1}{1000} \cdot \sqrt[2]{p_{N1} \cdot \tau_{N1}}}{\rho_T \cdot D_1 \cdot \left(\frac{l_{\psi 1}}{D_1} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3П} = 131.686 \text{ kg}$$

$$m_{T3П2} := \frac{K_{T3П} \cdot \frac{\omega_2}{1000} \cdot \sqrt[2]{p_{N2} \cdot \tau_{N2}}}{\rho_T \cdot D_2 \cdot \left(\frac{l_{\psi 2}}{D_2} \right)^{0.25}} \cdot \rho_{T3П} = 56.362 \text{ kg}$$

3.2 Расчет масс сопловых аппаратов

Силовая оболочка утопленной части сопла

$$\rho_{Ti} := 4500 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_{yoi} = K_{yo} \cdot \left(\frac{\beta \cdot \omega_i}{\tau_{Ni}} \right)^{1.5} \cdot d'_{yi}{}^{2.35} \cdot l'_{yi}{}^{0.4} \cdot \frac{d'_{ai}{}^{0.4}}{p_{Ni}{}^{1.1}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{E_{Ti}{}^{0.4}}$$

$$E_{Ti} := 122000 \text{ MPa}$$

$$d'_{yi} = \frac{d_{02i}}{2 \cdot d_{\kappa pi}}$$

$$K_{yo} := 16.5 \cdot 10^{-9} \quad \text{- коэф. согласования размерностей}$$

$$d'_{y1} := \frac{d_{021}}{2 \cdot d_{\kappa p1}} = 1.922$$

$$d'_{y2} := \frac{d_{022}}{2 \cdot d_{\kappa p2}} = 2.098$$

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

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

Тепловая защита утолщенной оболочки сопла

$$m_{T3yo} = K_{T3yo} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_i}{\sqrt[2]{\frac{p_{Ni}}{10^6} \cdot \tau_{Ni}}} \cdot d'_{yi}{}^{1.75} \cdot \rho_{T3}$$

$$K_{T3yo} := 3.7 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{m^{\frac{3}{2}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{3}{2}}} \cdot kg$$

- коэф. согласования размерностей

$$\rho_{T3} := 1400 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

- 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

$$m_{kp_i} = K_{kp} \cdot \left(\frac{\beta \cdot \omega_i}{\tau_{Ni}} \right)^{1.5} \cdot (d'_{pi})^{1.75} \cdot \frac{d'_{ai}{}^{0.2}}{\frac{p_{Ni}}{10^6}} \cdot \frac{\rho_{Ti}}{\left(\frac{E_{Ti}}{10^6} \right)^{0.5}}$$

$$K_{kp} := 11.2 \cdot 10^{-9}$$

- коэф. согласования размерностей

$$d'_{p1} := d'_{a1} = 3.975$$

- 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

$$m_{\Gamma_i} = K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_i}{\sqrt[2]{\frac{p_{Ni}}{10^6} \cdot \tau_{Ni}}}$$

$$K_{\Gamma} := 6.44 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{s^{\frac{1}{2}}}{kg^{\frac{1}{2}} \cdot m^{\frac{3}{2}}} \cdot kg$$

- коэф. согласования размерностей

$$m_{\Gamma1} := K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_1}{\sqrt[2]{\frac{p_{N1}}{10^6} \cdot \tau_{N1}}} = 62.122 \text{ kg}$$

$$m_{\Gamma2} := K_{\Gamma} \cdot \frac{\beta \cdot \omega_2}{\sqrt[2]{\frac{p_{N2}}{10^6} \cdot \tau_{N2}}} = 23.464 \text{ kg}$$

Масса тепловой защиты сверхзвукой 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

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

$$K_{PM2} := 0.57 \cdot m^{\frac{1}{2}} \cdot s$$

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

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

Масса конструкции ДУ

$$m_{ДУ1} := m_{CK1} + m_{\phi/1} + m_{ю1} + m_{3BY1} + m_{BY1} + m_{T3П1} + m_{3KC1} + m_{yo1} + m_{T3yo1} + m_{kp1} + m_{r1} + m_{o61} + m_{PM1} = (1.53 \cdot 10^3) \text{ kg}$$

$$m_{ДУ2} := m_{CK2} + m_{\phi/2} + m_{ю2} + m_{3BY2} + m_{BY2} + m_{T3П2} + m_{3KC2} + m_{yo2} + m_{T3yo2} + m_{kp2} + m_{r2} + m_{o62} + m_{PM2} = 623.773 \text{ kg}$$

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:

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

Объем будет равен:

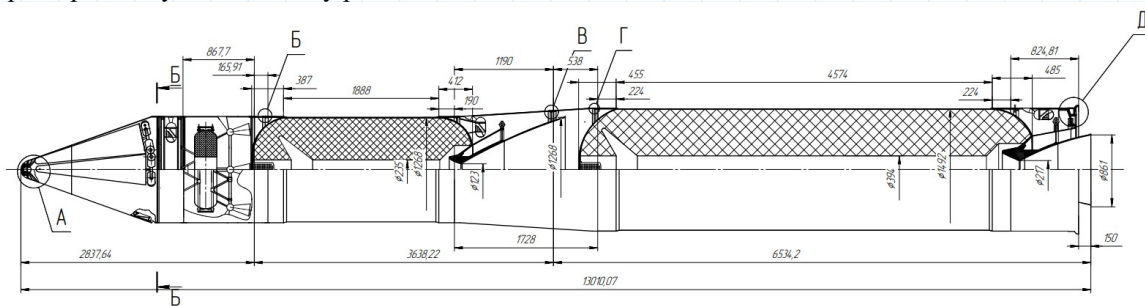
$$V_{CY} := \frac{m_{CY}}{\rho_{CY}} = 0.35 \text{ m}^3$$

Примем диаметр приборного отсека равным диаметру второй ступени:

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

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

Technical drawing of a mechanical assembly, likely a pump or motor, showing a side view with dimensions and labels. The drawing includes a cross-section of a cylindrical body with various internal components and external features. Key dimensions are provided in millimeters (mm). Labels include 'А' for a specific part, 'Б' for a section, 'В' for a component, 'Г' for another component, and 'Д' for a final section. The drawing is oriented horizontally with a dashed centerline.


$$m_{OTCi} = \pi \cdot D_i \cdot (K_{\Pi XO} \cdot l_{\Pi XO i} + K_{XO} \cdot l_{XO i})$$

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

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

Переходный отсек между первой и второй ступенями делится поперечной рубкой, боевая ступень отделяется от второй ступени продольно-поперечной рубкой. Из чертежа получим следующие длины хвостовых и переходных отсеков.

Переходные отсеки

$$l_{\Pi X O_1} := 538 \text{ mm} \qquad l_{\Pi X O_2} := 166 \text{ mm}$$

$$l_{\text{XO}_1} := 824.81 \text{ mm} \qquad l_{\text{XO}_2} := 1190 \text{ mm}$$
$$m_{OTC1} := \pi \cdot D_1 \cdot (K_{\Pi X O1} \cdot l_{\Pi X O1} + K_{XO} \cdot l_{XO1}) = 127.76 \text{ kg}$$
$$m_{OTC2} := \pi \cdot D_2 \cdot (K_{\text{ПХО}_2} \cdot l_{\text{ПХО}_2} + K_{\text{ХО}} \cdot l_{\text{ХО}_2}) = 110.699 \text{ kg}$$
$$m_{BKCi} = (0.8 \cdot l_{cmi} + 2) + (0.8 \cdot l_{mpi} + 2) \cdot (i - 1)$$
 l_{mpi} - длина транзитных кабелей

$$l_{mpi} = l_{\Pi X O_i} + 2 \cdot l_{\mu O_i} + l_{\mu i} + l_{X O_i}$$

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

$$l_{cm1} := 6.534 \text{ м}$$

$$l_{cm2} := 3.638 \text{ м}$$

$$l_{mp2} := l_{ПХО2} + 2 \cdot l_{ю2} + l_{у2} + l_{ХО2} = 3.625 \text{ м}$$

$$m_{БК1} := \left(0.8 \cdot l_{cm1} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}} + 2 \cdot \text{кг} \right) = 7.227 \text{ кг}$$

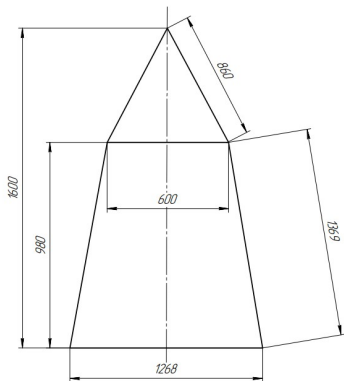
$$m_{БК2} := \left(0.8 \cdot l_{cm2} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}} + 2 \cdot \text{кг} \right) + \left(0.8 \cdot l_{mp2} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}} + 2 \cdot \text{кг} \right) = 9.81 \text{ кг}$$

Масса обтекателя:

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

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

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



$$S_{ГО} := \pi \cdot \left(\frac{1268}{2} \text{ мм} + \frac{600}{2} \text{ мм} \right) \cdot 1369 \text{ мм} + \pi \cdot \frac{600}{2} \text{ мм} \cdot 860 \text{ мм}$$

$$S_{ГО} = 4.828 \text{ м}^2$$

$$L_{ГО} := 1600 \text{ мм}$$

$$L_{ПН} := 1650 \text{ мм}$$

$$m_{ГО} := S_{ГО} \cdot K_{ГО} + 10 \text{ кг} = 106.55 \text{ кг}$$

Приведем значения уточненных стартовых масс ступеней

Масса конструкции по ступеням:

Вторая ступень

$$m_{КС2} := m_{ДУ2} + m_{ОТС2} + m_{БК2} = 744.282 \text{ кг}$$

$$m_{М2} := 0.03 \cdot m_{КС2} = 22.328 \text{ кг}$$

$$m_{К2} := m_{КС2} + m_{М2} = 766.61 \text{ кг}$$

Первая ступень

$$m_{КС1} := m_{ДУ1} + m_{ОТС1} + m_{БК1} = (1.665 \cdot 10^3) \text{ кг}$$

$$m_{M1} := 0.03 \cdot m_{K\Sigma 1} = 49.953 \text{ kg}$$

$$m_{K1} := m_{K\Sigma 1} + m_{M1} = (1.715 \cdot 10^3) \text{ kg}$$

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

Стартовые массы ступеней:

$$m_{02} := m_{\Pi H} + m_{K2} + \omega_2 = 6.95 \text{ tonne}$$

$$\mu_2 := \frac{\omega_2}{m_{02}} = 0.749$$

$$\alpha_{ДУ2} := \frac{m_{ДУ2}}{\omega_2} = 0.12$$

$$m_0 := m_{02} + m_{K1} + \omega_1 = 24.044 \text{ tonne}$$

$$\mu_1 := \frac{\omega_1}{m_0} = 0.64$$

$$\alpha_{ДУ1} := \frac{m_{ДУ1}}{\omega_1} = 0.099$$

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

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

$$p_M := \frac{m_0}{\frac{\pi \cdot (1.025 \cdot D_1)^2}{4}} = 13088.848 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

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

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

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

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

$$\theta'_1 := \text{asin} \left(1 - \mu_1 \cdot \left(1 - \sin(\theta'_K)^{0.8} \right) \right) = 0.687$$

$$\theta'_2 := 0.25 \cdot \theta'_1 + 0.75 \cdot \theta'_K = 0.437$$

$$\theta_{K1} := 0.5 \cdot (\theta'_1 + \theta'_2) = 0.562$$

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

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

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

$$K_{a1} := 1 + K_{\Pi 1} - \frac{0.3 \cdot K_{\Pi 1} + \frac{4.8 \cdot \mu_1}{\frac{\tau_{N1}}{\text{s}} \cdot \sqrt[3]{\sin(\theta_{K1})^2}} \cdot \left(\frac{12000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{p_M} \right)}{\ln \left(\frac{1}{1 - \mu_1} \right)} = 0.985$$

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

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

$$J_{12} := J_{1/72}$$

$$\Delta V_{g1} := g \cdot \tau_{N1} \cdot \sin(\theta'_1) = 354.452 \frac{m}{s}$$

$$\Delta V_{g2} := g \cdot \tau_{N2} \cdot \sin(\theta'_2) = 228.167 \frac{m}{s} \quad - \text{потери скорости от воздействия гравитации}$$

$$V_{\kappa1} := K_{a1} \cdot J_{11} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\mu_1}\right) - \Delta V_{g1} = 2261.325 \frac{m}{s}$$

$$V_{\kappa2} := K_{a2} \cdot J_{12} \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\mu_2}\right) - \Delta V_{g2} = 3866.743 \frac{m}{s}$$

Конечная скорость в конце АУТ:

$$V_K := V_{\kappa1} + V_{\kappa2} = 6128.068 \frac{m}{s}$$

Определяем высоту конца активного участка

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

$$\Delta h_{K1} := \left(\frac{K_{a1} \cdot J_{11} \cdot \tau_{N1}}{\mu_1} \cdot S(\mu_1) - \frac{g \cdot \tau_{N1}^2}{2} \cdot \sin(\theta'_1) \right) \cdot \sin(\theta'_1) = 32.962 \text{ km}$$

$$\Delta h_{K2} := \left(V_{\kappa1} \cdot \tau_{N1} + \frac{K_{a2} \cdot J_{12} \cdot \tau_{N2}}{\mu_2} \cdot S(\mu_2) - \frac{g \cdot \tau_{N2}^2}{2} \cdot \sin(\theta'_2) \right) \cdot \sin(\theta'_2) = 88.857 \text{ km}$$

$$h_K := \Delta h_{K1} + \Delta h_{K2} = 121.819 \text{ km}$$

Протяженность активного участка:

$$\Delta l_1 := \Delta h_{K1} \cdot \cot(\theta_{K1}) = 52.364 \text{ km}$$

$$\Delta l_2 := \Delta h_{K2} \cdot \cot(\theta_{K2}) = 240.857 \text{ km}$$

$$l_K := \Delta l_1 + \Delta l_2 = 293.221 \text{ km}$$

Определим эллиптическую дальность полета ракеты:

$$R := 6371 \text{ km} \quad \mu_0 := 3.988 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{km}^3}{s^2} \quad r_K := R + h_K = 6492.819 \text{ km}$$

$$v_K := \frac{V_K^2 \cdot r_K}{\mu_0} = 0.611$$

$$L_{БАЛ} := 2 \cdot R \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{v_K \cdot \tan(\theta'_K)}{1 - v_K + \tan(\theta'_K)^2}\right) = 5173.179 \text{ km}$$

Тогда дальность полета будет равна:

$$L'_{max} := L_{БАЛ} + 2 \cdot l_K = 5759.621 \text{ km}$$

Перелет составляет

$$\Delta L := L'_{max} - L_{max} = -240.379 \text{ km}$$

$$\varepsilon := \frac{\Delta L}{L_{max}} \cdot 100 = -4.006$$

Погрешность составляет $\varepsilon = -4.006$ процента, поэтому дальнейшая корректировка не требуется. Рассчитанные ранее параметры ракеты принимаем за конечные.