

- **Цель работы:** Проектирование разгонного блока для выведения космического аппарата на геостационарную орбиту.

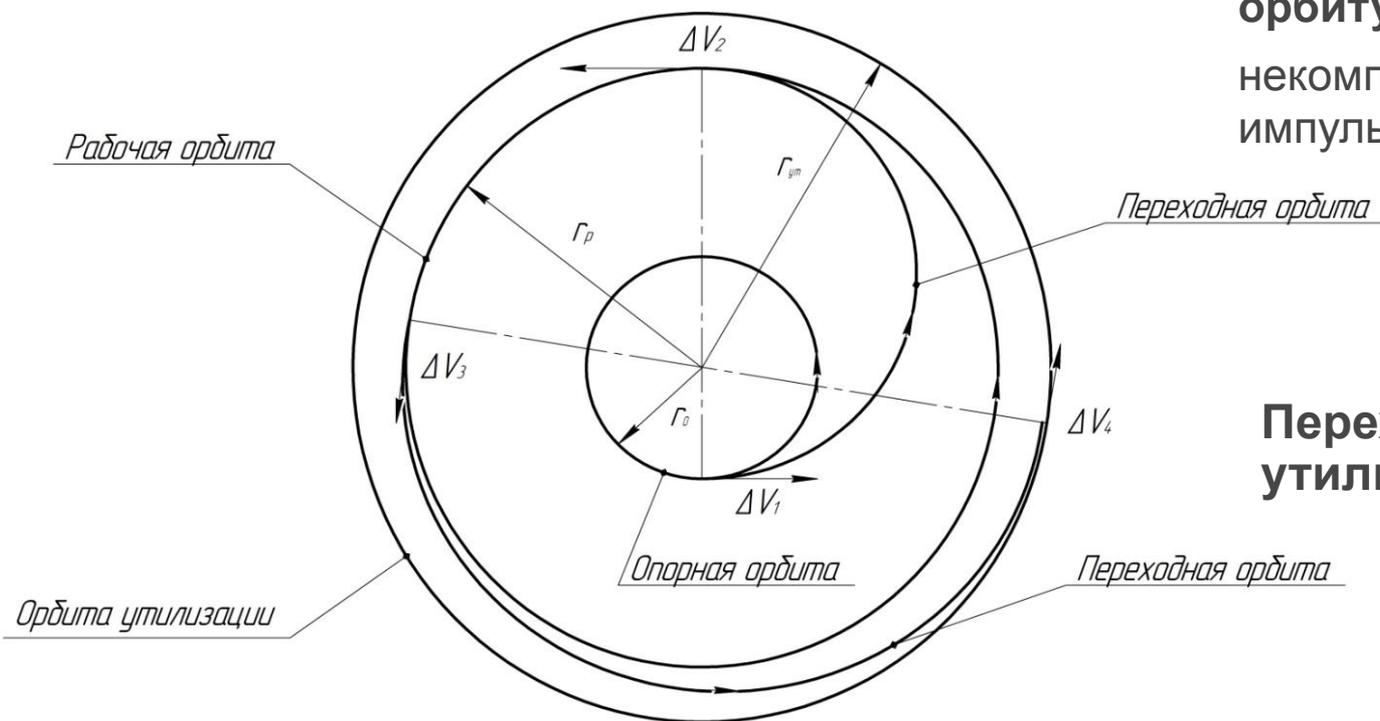
Исходные данные

- - ▶ $H_0=200$ км – высота опорной орбиты;
 - ▶ $H_p=35793$ км – высота рабочей орбиты;
 - ▶ $i_0=66^\circ$ – наклонение опорной орбиты;
 - ▶ $i_p=0^\circ$ – наклонение рабочей орбиты;
 - ▶ $M_{пн}=1500$ кг – масса полезной нагрузки.

Задачи решаемые при разработке РБ

- Баллистическое проектирование
- Определение массовых и энергетические характеристики
- Определение габаритов составных частей РБ
- Разработка компоновочной схемы РБ
- Выполнение проектировочного прочностного расчета топливных баков и фермы РБ

Баллистическое проектирование

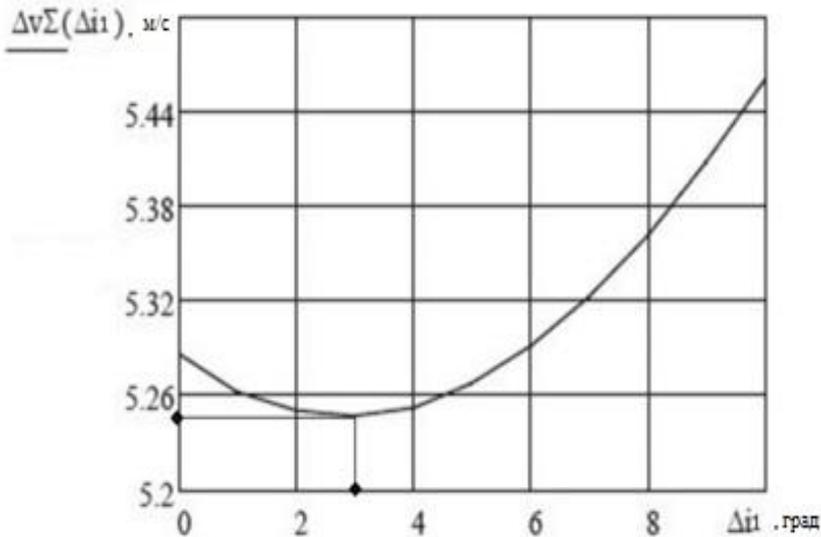


Переход на рабочую орбиту:

некомпланарный 2-х импульсный маневр

Переход на орбиту утилизации

Определение оптимальных параметров перелета



Зависимость суммарных импульсных затрат характеристической скорости от величины изменения наклона на перигейном активном участке

Затраты характеристической скорости на перигейной активном участке:

$$\Delta V_{1\Pi} = \sqrt{V_0^2 + V_r^2 - 2 * V_0 * V_r * \cos(\Delta i_1)}.$$

Затраты характеристической скорости на апогейном активном участке:

$$\Delta V_{2a} = \sqrt{V_{rr}^2 + V_a^2 - 2 * V_{rr} * V_a * \cos(i_0 - \Delta i_1)}.$$

Потери характеристической скорости на перигейном активном участке:

$$V_{\text{пот } \Pi} = \frac{\Delta V_{1r}}{a_0^2 * R_0^3} \left(2.125 * 10^{-2} * \mu * I_{yd}^2 * \left(1 - e^{-\frac{\Delta V_{1r}}{I_{yd}}} \right)^2 \right)^{-1}$$

Расчёт массово-энергетических характеристик

Проектные параметры РБ:

Тяга двигателя:

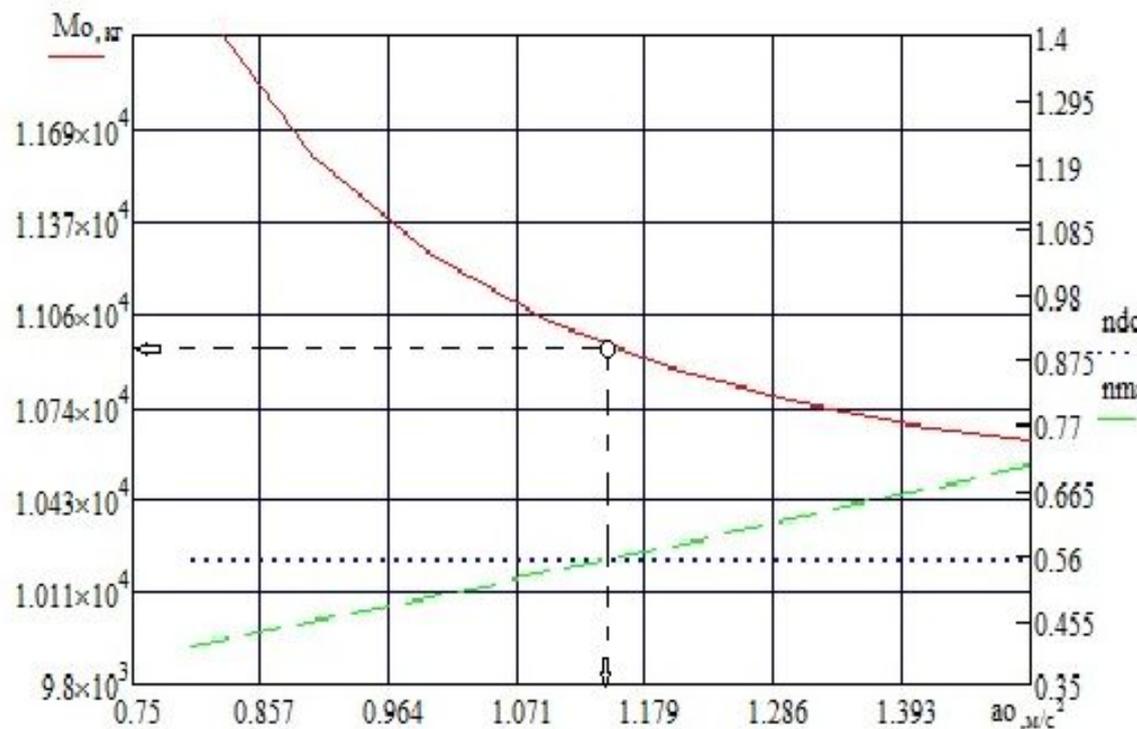
$$P = a_0 * M_0.$$

Суммарное время работы двигателя:

$$t_{\text{раб}} = \frac{M_T * I_{yd}}{P}.$$

Суммарный импульс тяги двигателя РБ:

$$I_{\Sigma} = P * t_{\text{раб}}.$$



Зависимость стартовой массы РБ от значения начальной тяговооруженности и максимальная перегрузка, испытываемая КА

Массовые и проектные параметры РБ

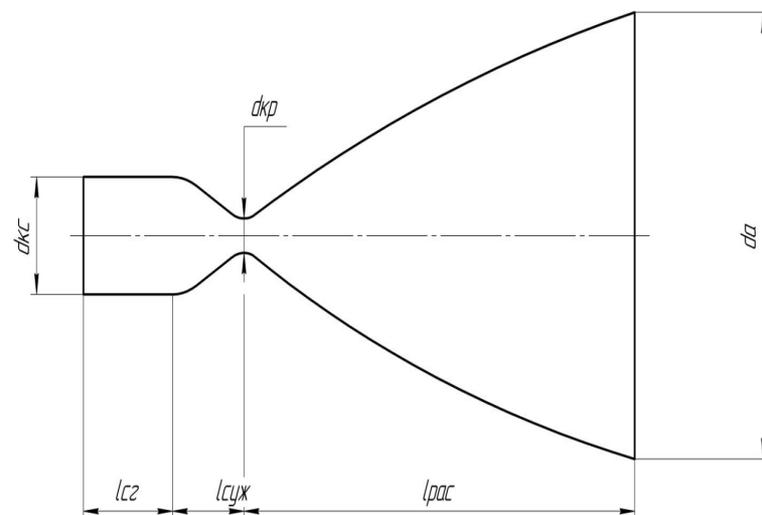
Параметр	Значение
	30044, кН с
	2476,5 с
	3,5 кг/с
	12132 Н
	186,8 кг
	214,4 кг
	88,1 кг
	330,9 кг
	87084 кг
	11029 кг

Проектирование камеры МДУ

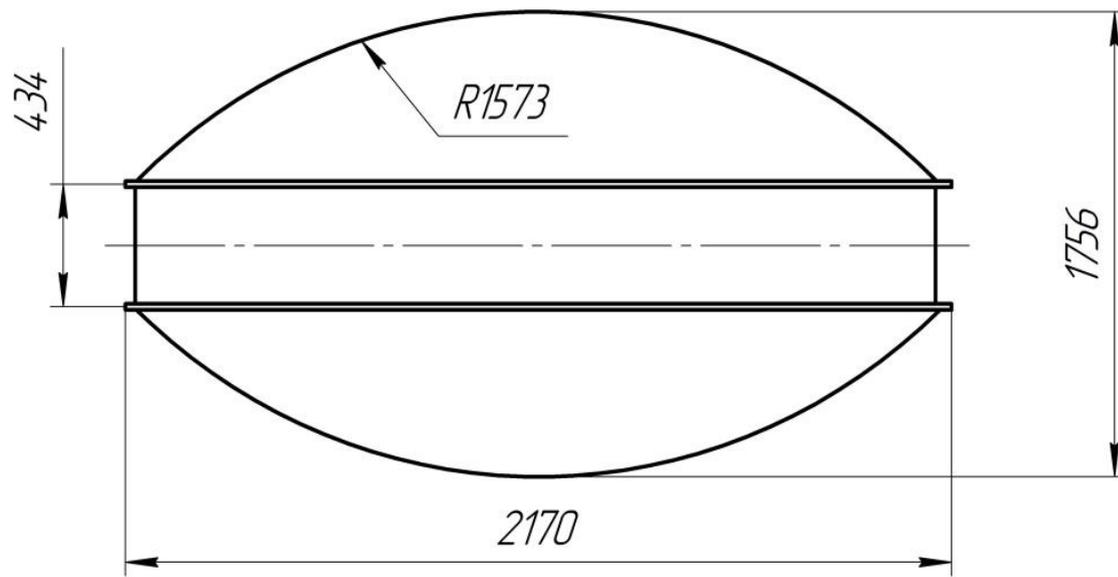
-
- ▶ Геометрическая степень расширения сопла $n = \frac{\varepsilon^{\frac{1}{k_T}} \sqrt{\frac{k_T-1}{k_T+1}} \left(\frac{2}{k_T+1}\right)^{\frac{1}{k_T-1}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{k_T-1}{k_T}}}}$
 - ▶ Площадь критического сечения сопла $F_{кр} = \frac{\dot{m} \sqrt{R_c T_0}}{a_k p_0}$
 - ▶ Длина камеры сгорания $l_{кс} = \bar{I}_{кс} d_{кс}$
 - ▶ Длина смесительной головки $l_{сг} = 0,35 \cdot d_{кс}$
 - ▶ Длина расширяющейся части сопла $l_{рас} = 1,3(d_a - d_{кр})$
 - ▶ Длина сужающейся части сопла $l_{суж} = 0,9(d_{кс} - d_{кр})$
 - ▶ Полная длина камеры ДУ $l_{кам} = l_{сг} + l_{кс} + l_{суж} + l_{рас}$

Расчет параметров двигательной установки

Параметр	Значение
	0,09 м
	0,024 м
	0,813 м
	0,032 м
	0,108 м
	0,06 м
	1,026 м
	1,226 м



Определение геометрических параметров бака окислителя



► Объем бака окислителя:

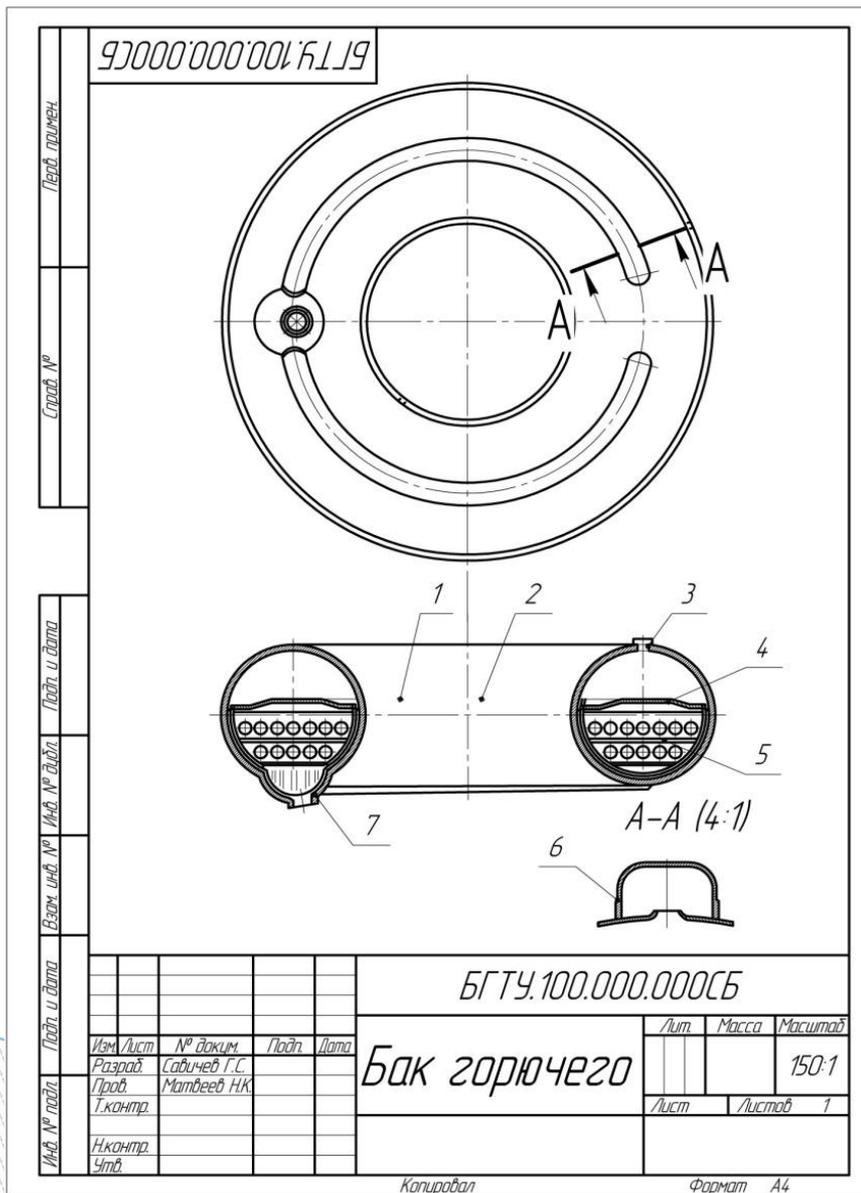
$$V_{\text{бок}} = \pi * R_{\text{бок}}^2 * L + 2 * V_{\text{сф}}.$$

► Объем сферического сегмента: $V_{\text{сф}} = \frac{1}{6} * \pi * h * (3 * R_{\text{сф}}^2 + h^2).$

► Длина бака окислителя:

$$L_{\text{бок}} = 2 * h + \frac{V_{\text{бок}} - 2 * V_{\text{сф}}}{\pi * R^2}.$$

Сборочный чертеж бака горючего



Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	кол	Примечание
				Документация		
A4				Бак горючего		
				Детали		
			1 БГТУ.100.000.001	Днище нижнее	1	
			2 БГТУ.100.000.002	Днище верхнее	1	
			3 БГТУ.100.000.003	Штуцер	1	
			4 БГТУ.100.000.004	Перегородка	2	
			5 БГТУ.100.000.005	Перегородка	6	
			6 БГТУ.100.000.006	Заборник	1	
			7 БГТУ.100.000.007	Стык с трубопроводом ДУ	1	

Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист	Масса	Масштаб
Разраб		Савичев Г.С.					150:1
Проб		Матвеев Н.К.					
Т.контр					Лист	Листов	1
Н.контр							
Чтв							

БГТУ.100.000.000СП

Бак горючего

Копировал Формат А4

Определение моментов инерции составных частей РБ

- Собственные моменты инерции ПН:

$$I_{\text{ка_хсоб}} = \frac{1}{12} * M_{\text{ка}} * 2 * a^2.$$

$$I_{\text{ка_усоб}} = \frac{1}{12} * M_{\text{ка}} * (a^2 + L_{\text{ка}}^2).$$

- Собственные моменты инерции бака окислителя:

$$I_{\text{бок_хсоб}} = \frac{1}{2} (M_{\text{ка}} + 0.5 * M_{\text{схн}}) * R_{\text{бок}}^2.$$

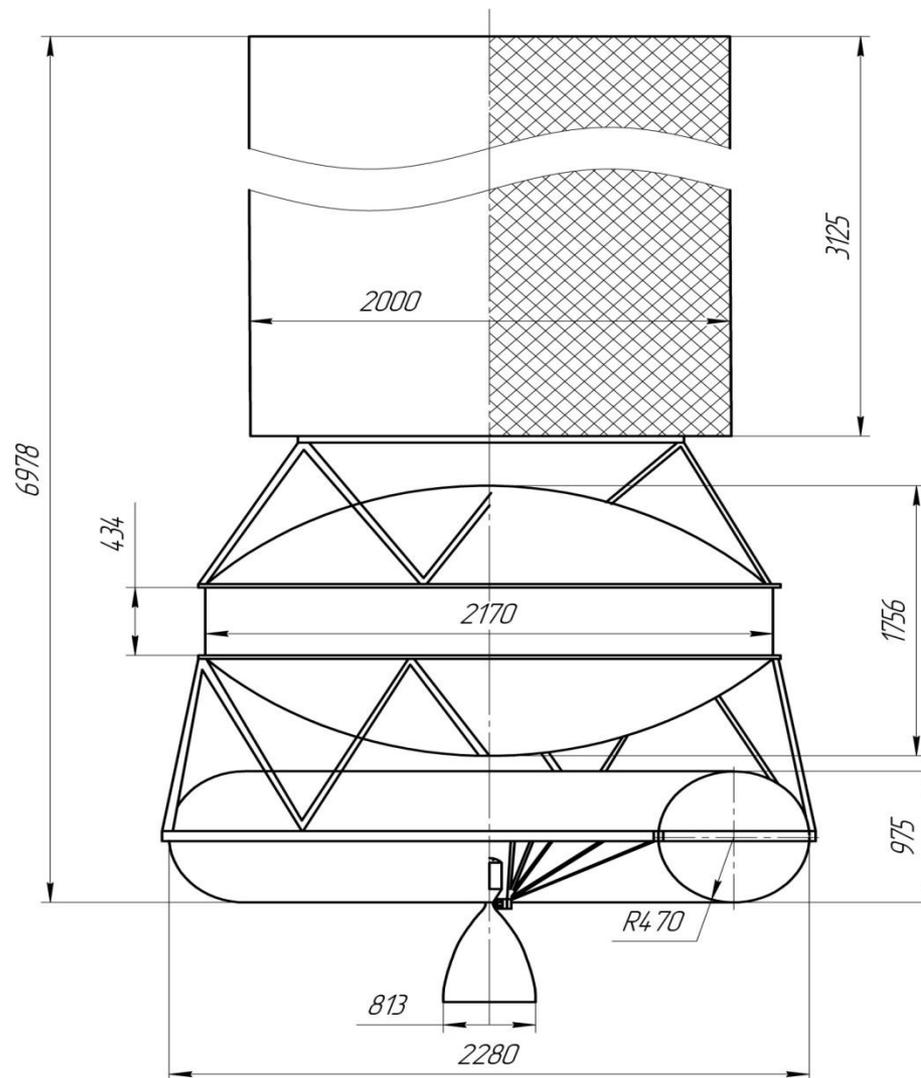
$$I_{\text{бок_усоб}} = \frac{1}{12} (M_{\text{ок}} + 0.5 * M_{\text{схн}}) * L_{\text{бок_прив}}^2 + \frac{1}{4} (M_{\text{ок}} + 0.5 * M_{\text{схн}}) * R_{\text{бок}}^2.$$

- Собственные моменты инерции бака горючего:

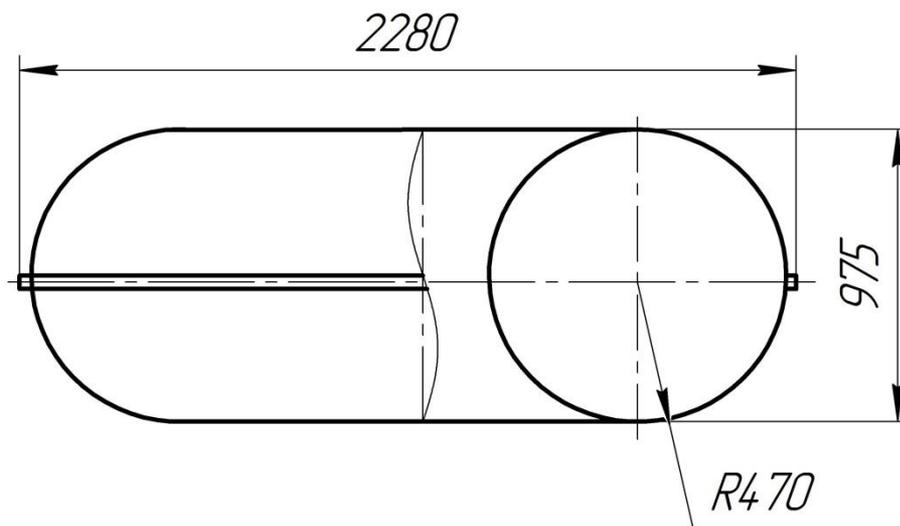
$$I_{\text{богор_хсоб}} = (M_{\text{гор}} + 0.5 * M_{\text{схн}}) * \left(R_{\text{богор}}^2 + \frac{3 * r_{\text{богор}}^2}{4} \right).$$

$$I_{\text{богор_усоб}} = \frac{1}{8} (M_{\text{гор}} + 0.5 * M_{\text{схн}}) * (4 * R_{\text{богор}}^2 + 5 * r_{\text{богор}}^2).$$

Компоновочная схема РБ



Прочностной расчет бака горючего



Минимально необходимая толщина стенки:

$$\delta = \frac{P_{\text{изб}}}{2 * \sigma_{02}} * \left(\frac{2 - \frac{r_{\text{бгор}}}{R_{\text{бгор}}}}{1 - \frac{r_{\text{бгор}}}{R_{\text{бгор}}}} \right)$$

Из сортамента, толщина стенки бака горючего выбирается равной 3,2 мм

Прочностной расчет бака окислителя

Расчет на устойчивость стенки цилиндрической оболочки проводится для случая транспортировки РН к месту старта по формулам ($\sigma_{1p} = \sigma_{кр}$):

$$\sigma_{1p} = \frac{P_H * R_{бок}}{2 * \delta} - f \left(\frac{N}{2 * \pi * R_{бок} * \delta} + \frac{M}{\pi * R_{бок}^2 * \delta} \right),$$

$$\sigma_{кр} = k * k_p * k_M * E * \frac{\delta}{R_{бок}}.$$

Расчет на прочность стенки цилиндрической оболочки проводится для случая максимума продольной перегрузки по формулам ($\sigma_{ЭКВ} = \sigma_{0.2}$, $\sigma_{ЭКВ} = \sigma_{2p}$):

$$\sigma_{2p} = \frac{f_p * P(x) * R_{бок}}{\sigma_{0.2}}.$$

Из сортамента, толщина стенки цилиндрической части принимается равной 3,8 мм, толщина стенок нижнего днища 3 мм, Толщина верхнего днища 1,9 мм

Проектировочный прочностной расчет фермы РБ

Определение случая нагружения с максимальной расчетной эквивалентной осевой сжимающей силой

Случай нагружения			N, Н		
Транспортировка	0,14	1,35			
Начало подъема	0	1,334			
Конец подъема	1	0,334			
Максимум поперечной перегрузки	2,4	1,5			
Максимум продольной перегрузки	4,1	0,12			

Определение оптимального количества стержней и их геометрических размеров

Длина стержней:

$$L_{ст} = \sqrt{R_B^2 + R_H^2 + H + 2 * R_B * R_H * \cos\left(\frac{2*\pi}{n}\right)}.$$

Расчётное усилие в одном стержне:

$$N_{1p} = \frac{N_{эп}}{n * \cos\alpha}.$$

Толщина стенки стержней:

$$\delta_{тр} = \sqrt{\frac{N_{1p}}{2 * \pi * k * E}}.$$

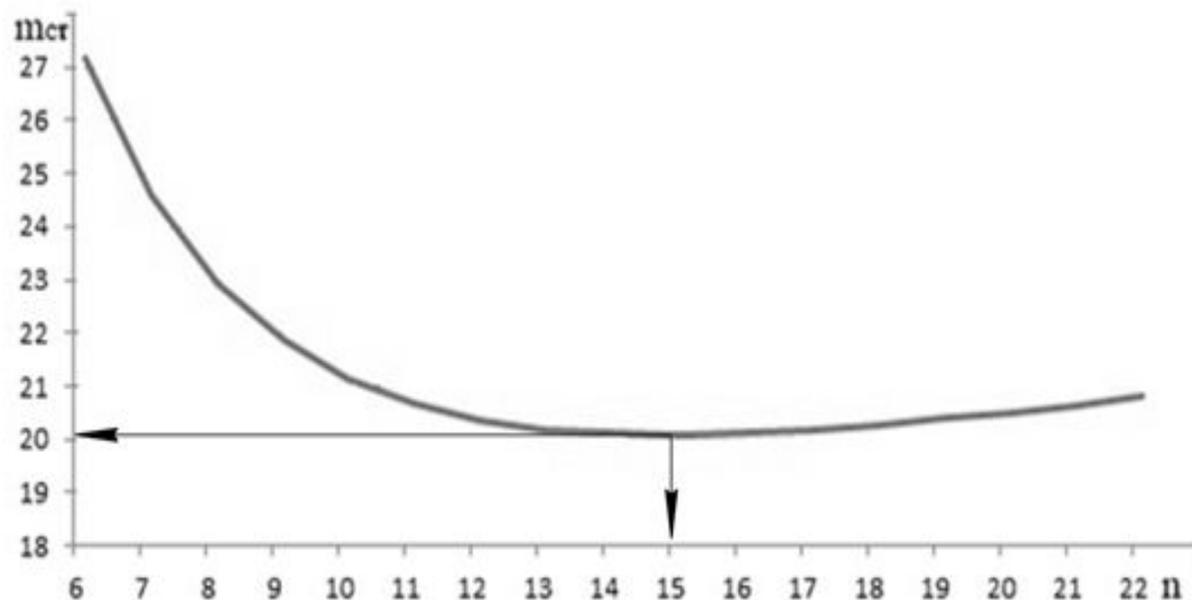
Радиус стержней:

$$R_{тр} = \frac{1}{\pi} * \sqrt[3]{\frac{L_{ст}^2}{c * E} * \sqrt{2 * \pi * k * E * N_{1p}}}.$$

Площадь поперечного сечения стержня:

$$S_{ст} = 2 * \pi * R_{тр} * \delta_{тр}.$$

Габариты фермы РБ



Зависимость суммарной массы стержней от их количества

- Количество стержней $n=16$,
- Масса фермы $m=20,1$ кг,
- Толщина стенок трубки $\delta_{\text{тр}}=1$ мм,
- Радиус трубок $R_{\text{тр}}=89$ мм.

Основные полученные результаты

В работе проведено проектирование разгонного блока для выведения КА на геостационарную орбиту, включающее:

- расчёт массовых и энергетических характеристик РБ;
- определение геометрических размеров составных частей РБ;
- составление компоновочной схемы РБ;
- выполнение проектировочного прочностного расчета топливных баков и фермы РБ;
- разработку чертежа бака горючего.