









### **Термины и определения**

**РДТТ** - ракетный двигатель твердого топлива

**КС** - камера сгорания

**ПС** - продукты сгорания

**К-фаза** - конденсированная фаза

**ТЗП** - теплозащитное покрытие

**СБ** - сопловой блок

**ПУС** - поворотное управляющее сопло





## **Введение**

Ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ) нашли широкое применение в качестве маршевых двигателей многоступенчатых баллистических ракет и ракет-носителей для вывода космических аппаратов на орбиту, вспомогательных РД для ориентации и стабилизации космических аппаратов, коррекции траектории и выполнения маневров на орбите, отделения ступеней, обеспечения мягкой посадки на планеты и т.д.

Актуальность разработки РДТТ обосновывается рядом преимуществ его перед жидкостным ракетным двигателем (ЖРД):

- относительная простота конструкции и эксплуатации – горение топлива в РДТТ происходит в камере сгорания (КС), нет поступления каких-либо дополнительных веществ, т.е. отсутствие систем подачи топлива;
- высокая готовность применения – благодаря возможности длительного хранения в снаряженном состоянии РДТТ может находиться значительное время в готовности на старте без проведения каких-либо специальных подготовленных работ независимо от времени года и атмосферных условий;
- высокая надежность и безотказность.

Но выделяются также и недостатки РДТТ:

- более низкие энергетические характеристики твердых ракетных топлив (ТРТ) по сравнению с ЖРД;
- ограничение по времени работы из-за сложности охлаждения конструкционных материалов и из-за ограниченных габаритов заряда РДТТ;
- сложность регулирования тяги по величине и направлению;
- трудность осуществления многократного запуска РДТТ;
- более низкая, по сравнению, с ЖРД, продолжительность работы.

В данном курсовом проекте разрабатывается маршевый двигатель первой ступени межконтинентальной ракеты.

Проектируемый двигатель включает в себя следующие ключевые узлы.



- заряд ТТ;
- корпус РДТТ;
- теплозащитное покрытие;
- сопловой блок;
- воспламенительное устройство.

## **1 Конструкторская часть**

### **1.1 Исходные данные**

Тяга:  $P = 700\,000\text{ Н}$ .

Давление окружающей среды:  $p_h = 0,03\text{ МПа}$ .

Давление в камере сгорания:  $p_K = 10\text{ МПа}$ .

Время работы двигателя:  $\tau = 35\text{ с}$ .

Диаметр миделя:  $D_M = 2,0\text{ м}$ .

### **1.2 Выбор топлива и термодинамический расчет ПС**

В настоящее время в ракетной технике применяются два основных вида ТРТ: баллиститное и смесевое.

Энергетические характеристики смесевых топлив значительно выше баллиститных (удельный импульс  $\sim 2800 \div 2900\text{ м/с}$ ), что и определяет их выбор, в качестве основных топливных составов в современных РДТТ.

Необходимым требованием, предъявляемым к ТРТ, является сохранение целостности и прочности в течение гарантийного срока хранения, а так же химической стабильности. Кроме того, топливо должно обладать максимальным  $I_y$ .

Требования, предъявляемые к РДТТ по комплексу массово-энергетических, баллистических и эксплуатационных характеристик, предопределяют использование смесового топлива с высокими значениями удельного импульса ( $\sim 2800\text{ м/с}$ ) и плотности ( $\sim 1800\text{ кг/м}^3$ ). Скорость горения  $u_{100}^{20^\circ\text{C}} = 15 \div 25\text{ мм/с}$ , работоспособного в широком температурном диапазоне эксплуатации от  $-50^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Учитывая сложную конструктивную форму заряда, для обеспечения их бездефектного изготовления необходимо, чтобы состав обладал хорошими литьевыми свойствами, хорошей адсорбцией, малой вязкостью (20...50 тыс. пуаз).

Так как по уровню напряженно-деформированного состояния заряд является высоко нагруженным, топливо должно быть высокоэластичным.

Исходя из этих требований и на основании отработки, выбрано смесевое топливо ПХА-4М, разработанное на основе синтетического полиэфируретанового каучука с использованием в качестве пластификатора нитроглицерина, окислителей – октогена и перхлората аммония, а в качестве металлического горючего – алюминиевого порошка.

Химическая формула:  $C_{9,213}H_{24,948}O_{28,408}N_{7,428}Cl_{2,979}Al_{7,413}$ .

Состав в процентах от массы топлива:

- перхлорат аммония – 35 %;
- нитразол – 45%;
- порошкообразный алюминий – 20 %.

Плотность топлива:  $\rho_T = 1800 \text{ кг/м}^3$ .

Теплоемкость:  $C = 1084 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .

Коэффициент теплопроводности:  $\lambda = 0,94 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

Коэффициент линейного расширения:  $\alpha = 3,4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}}$ .

Минимальное давление устойчивого горения:  $p = 30 \text{ кПа}$ .

Эксплуатационный интервал температур:  $T \in [220; 320] \text{ К}$ .

Способ изготовления заряда – прессование.

Закон горения топлива при температуре 20°C:

$$u = 6,49 \cdot \left( \frac{p_k}{98066,5} \right)^{0,24} \text{ мм/с}.$$

### 1.3 Выбор конструктивной формы заряда (Научная работа)

Цель: подобрать оптимальную геометрическую форму заряда.

Формы зарядов подбираются из принципа равенства коэффициента заполнения камеры сгорания в одинаковых камерах, а значит и равенства масс топлива.

Из результатов термодинамического расчёта выбранного топлива используются значения равновесной температуры продуктов сгорания  $T_K = 3935 \text{ К}$ , показателя адиабаты  $k = 1,15$ , молярная масса  $\mu = 34,49 \text{ г/моль}$ .

Так же зададимся следующими значениями:

- коэффициент, учитывающий потери энергии на нагрев стенок КС и на неполноту сгорания твердого топлива –  $\chi = 0,95$ ;
- коэффициент потерь расхода сопла –  $\varphi_c = 0,98$ .

По указанным в задании на проект данным определяются начальные газодинамические параметры.

$$A_\kappa = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1}} = \left( \frac{2}{1,15+1} \right)^{\frac{1}{1,15-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 1,15}{1,15+1}} = 0,628$$

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{34,49} = 241,875 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$\lambda_a = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{1,15+1}{1,15-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,03}{10} \right)^{\frac{1,15-1}{1,15}} \right]} = 2,935$$

$$\begin{aligned} q(\lambda_a) &= \lambda_a \cdot \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_a^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= 2,93 \cdot \left( 1 - \frac{1,15-1}{1,15+1} \cdot 2,93^2 \right)^{\frac{1}{1,15-1}} \cdot \left( \frac{1,15+1}{2} \right)^{\frac{1}{1,15-1}} = 0,024 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(\lambda_a) &= (1 + \lambda_a^2) \cdot \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_a^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \\ &= (1 + 2,93^2) \cdot \left( 1 - \frac{1,15-1}{1,15+1} \cdot 2,93^2 \right)^{\frac{1}{1,15-1}} = 0,0499 \end{aligned}$$

Зная газодинамические параметры, определяется удельный импульс:

$$I_y = \frac{\sqrt{\chi \cdot R \cdot T_\kappa}}{A_\kappa} \cdot \frac{f(\lambda_a) - \frac{p_H}{p_\kappa}}{q(\lambda_a)} = \frac{\sqrt{0,95 \cdot 241,875 \cdot 3935}}{0,628} \cdot \frac{0,059 - \frac{0,03}{10}}{0,024} = 2857 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определение массового расход топлива.

$$\dot{m} = \frac{P}{I_y} = \frac{700000}{2857} = 245,87 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Определение массы топлива.

$$M_T = \dot{m} \cdot \tau_p = 245,87 \cdot 40 = 9800,5 \text{ кг}$$

Определение объема топлива

$$W = \frac{M_T}{\rho} = \frac{9800,5}{1800} = 5,44 \text{ м}^3$$

Все рассматриваемы заряды имеют канал равный  $d_{\text{вн}} = 0,54 \text{ м}$ .

Путем постепенного приближения в пакете SolidWorks было подобрано 3 формы заряда (рис. 1), с необходимым коэффициентом заполнения корпуса  $k_3 = 0,78$ .

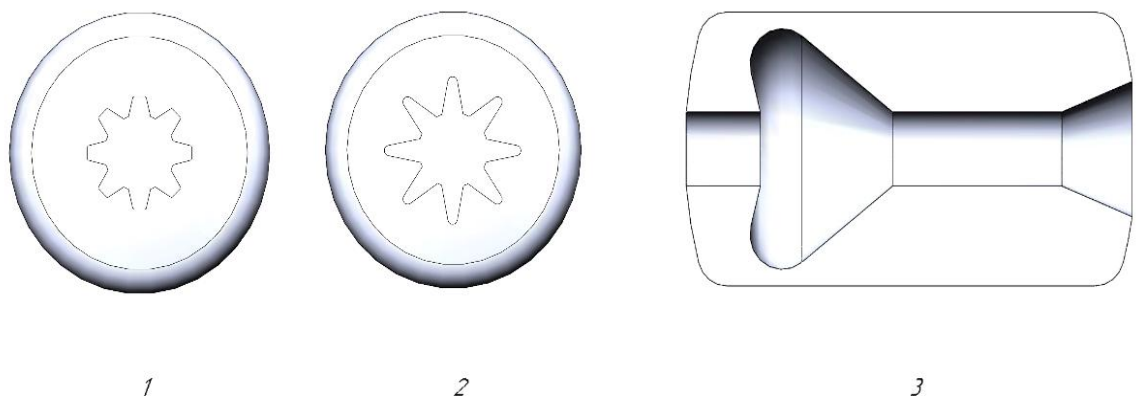


Рис. 1.1 – Конструктивные формы зарядов:

1 - заряд с внутренним каналом в виде трапеций; 2 - заряд с внутренним каналом в виде лучей; 3 – заряд с коническим компенсатором.

#### 1.4 Внутрибаллистический расчет

Так же в пакете SolidWorks был произведен замер площадей горения зарядов.

В таблице 1 приведены изменение площади поверхности горения  $F_2$ , давления в КС  $p_k$ , тяги  $P$  и скорости горения топлива  $u$  посводно, с шагом 65 мм.

Давление в КС определяется по формуле Бори:

$$p_k(t) = \left( \frac{u_1' \cdot \rho_T \cdot F_T(t) \cdot \sqrt{\chi \cdot R \cdot T_k}}{\varphi_c \cdot F_{kp} \cdot A(k)} \right)^{\frac{1}{1-\nu}}.$$

Тяга РДТТ:

$$P(t) = p_k(t) \cdot F_{kp} \cdot \frac{f(\lambda_a)}{q(\lambda_a)}.$$

Скорость горения вычисляем по формуле:

$$u_i = u_1 \cdot \left( \frac{p_{ki}}{98066,5} \right)^\nu$$

Значение времени работы при данной величине сгоревшего свода определяется следующим образом:

$$t_i = t_{i-1} + \frac{65}{u_{i-1}}$$

Все расчетные данные представлены в таблице 1.1 .

Таблица 1.1 – Внутрибаллистические параметры

$e_j, \text{мм}$	$F_T, \text{м}^2$	$p_k, \text{МПа}$	$U, \text{мм/с}$	$t_\Sigma, \text{сек}$	$P, \text{кН}$
Заряд с коническим компенсатором					
0	6,850413	10,09	20,17698	0	709
65	7,147382	10,74	20,44919	3,221494	749716
130	7,059901	10,50	20,36982	6,442984	737665
195	7,028976	10,44	20,3416	9,664473	733416
260	6,899749	10,19	20,22275	12,88596	715726
325	6,658475	9,72	19,99671	16,10745	682978
390	6,358296	9,15	19,70752	18,32894	642756
455	5,948311	8,38	19,29705	21,55043	588787
520	5,310241	7,22	18,61783	23,77192	507127
585	4,224647	5,34	17,32062	26,99341	375342
650	3,462415	4,11	16,26581	30,2149	288887
715	2,762415	3,06	15,14607	33,23639	214616
720	2,662415	2,91	14,97073	35	204452
Заряд с внутренним каналом в виде трапеций					
0	7,184365	10,7414	20,48252	0	728915
65	7,567369	11,58634	20,821449	3,173437643	797918
130	7,68555	11,74202	20,923506	6,295218468	814348
195	8,109222	12,60087	21,281334	9,40177247	874041

Продолжение таблицы 1.1

260	8,60864	13,63188	21,686411	12,4560923	945235,5
325	9,314703	14,75951	22,105977	15,45336101	1024096
390	10,36811	17,31832	22,998028	18,39374226	1205915
455	10,96935	18,74631	23,411294	21,22007158	1300657
520	11,61135	20,2144	23,8359	23,99650928	1401424
585	4,3496	5,548656	17,480668	26,7234883	385049
650	0,267692	0,141564	7,2479129	30,44188163	9802
Заряд с внутренним каналом в виде лучей					
0	14,09736	20,86596	25,34155	0	1809419
65	14,11154	21,04076	25,34974	2,564957	1811610
130	13,9247	20,53191	25,24327	5,129086	1779847
195	13,51302	19,73374	25,00514	7,70403	1711391
260	13,90468	20,49171	25,23193	10,30349	1776561
325	14,29635	21,25369	25,45369	12,8796	1842826
390	15,27329	23,07345	25,99106	15,43325	2010405
455	6,096937	6,924169	19,44809	17,93411	600219

Исходя из этих данных, построены графики, представленные на рисунках 2 и 3.

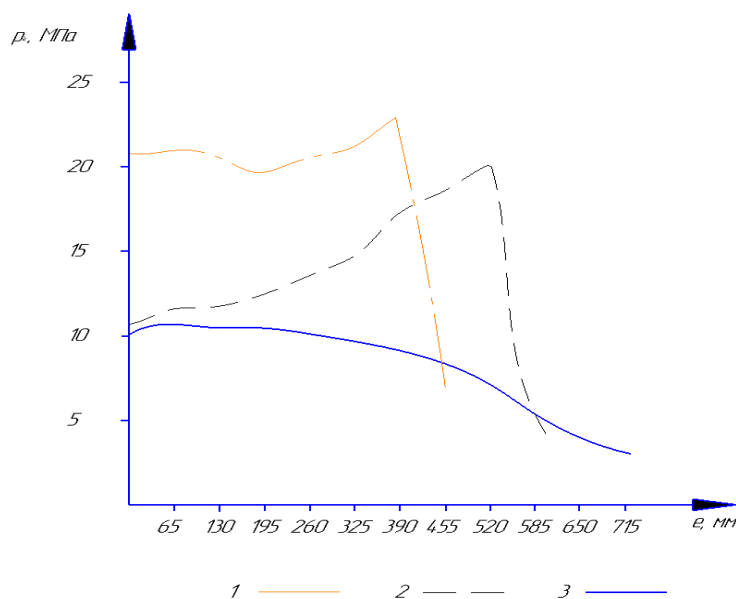


Рис. 1.2 – Давление в камере сгорания:

1 – заряд с внутренним каналом в виде лучей; 2 – заряд с внутренним каналом в виде трапеций; 3 – заряд с коническим компенсатором.

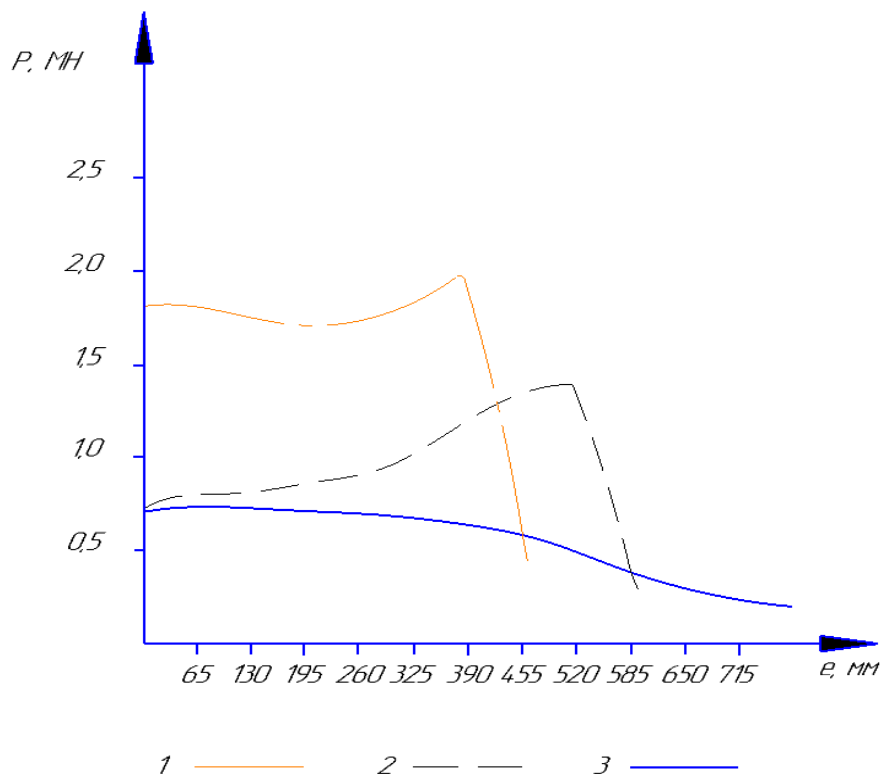


Рис. 1.3 – Давление в камере сгорания:

1 – заряд с внутренним каналом в виде лучей; 2 – заряд с внутренним каналом в виде трапеций; 3 - заряд с коническим компенсатором.

### 1.5 Данные для определения теплового состояния корпуса

Для проведения расчетов использованы параметры теплового воздействия на внутреннюю поверхность корпуса.

К параметрам теплового воздействия на внутреннюю поверхность корпуса относятся:

- термодинамические и теплофизические характеристики ПС топлива ПХА-4М (см. табл. 2.);
- содержание окисляющих компонентов в ПС, в особенности трехатомных молекул  $H_2O$  и  $CO_2$ ;
- давление в корпусе;



- скорости обтекания продуктами сгорания внутренних поверхностей переднего днища  $W = 30 \text{ м/с}$ , заднего днища  $W = 280 \text{ м/с}$ , в области конического компенсатора  $W = 180 \text{ м/с}$ .

В качестве материала для ТЗП применяется абляционный материал, относящийся к эластичной группе абляторов. Представляет собой композиционный материал с основой связующего из термопластичного полимера и дисперсно-волокнутого наполнителя из керамики.

Данный аблятор обладает следующими характеристиками:

- плотность материала покрытия –  $\rho_n = 1300 \text{ кг/м}^3$ .
- теплоемкость –  $c_{p_n} = 2600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .
- теплопроводность –  $\lambda_n = 0,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .
- коэффициент линейного расширения материала ТЗП –  $\alpha_n = 2 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ .
- температура пиролиза ТЗП –  $T_w = 2500 \text{ К}$ .
- удельная энтальпия материала покрытия –  $I_n = -4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ .
- массовое содержание связующего –  $\varphi = 0,6$ .
- удельная теплота абляции материала –  $Q_n = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ .

Таблица 1.2 - Термодинамические и теплофизические характеристики

ПС топлива ПХА-4М

Наименование характеристики	Значение
Давление $p_k, \text{МПа}$	10,7
Температура $T_k, \text{К}$	3935
Средняя молярная масса $M, \text{г/моль}$	34,49
Удельная газовая постоянная $R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	241,87
Удельная теплоемкость газа $c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	1909
Показатель адиабаты $k$	1,15
Содержание КФ $z_{\text{кф}}$	0,355

Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{Вт}{м \cdot К}$	0,362
Полная энтальпия ПС в КС $I_k, КДж/кг$	-2034
Коэффициент динамической вязкости $\eta, Па \cdot с$	$1,019 \cdot 10^{-4}$

## 1.6 Расчет толщины ТЗП

Рассматриваются наиболее опасные сечения. Расчет толщины ТЗП рассмотрен на примере заряда с коническим компенсатором.

### 1.6.1 Расчет толщины ТЗП в области переднего днища

Расчет конвективного теплового потока.

Эквивалентный размер области:

$$d_э \approx \frac{\pi \cdot d_k}{4} = \frac{\pi \cdot 2}{4} = 1,57 м.$$

Характерная скорость течения газа:

$$W = 30 \frac{м}{с}.$$

Время взаимодействия ПС со стенкой:

$$t = \tau_p = 35 с.$$

Число Маха в данной зоне:

$$M = \frac{W}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_k}} = \frac{30}{\sqrt{1,15 \cdot 241,9 \cdot 3935}} = 0,029.$$

Предположим, температура адиабатической стенки  $T_w = 2500 К$ , что соответствует температуре пиролиза материала ТЗП. Статическая температура продуктов сгорания (ПС) в районе переднего днища равна:

$$T_k^1 = \frac{T_k}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2} = \frac{3935}{1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,029^2} = 3934,8 К.$$

Критерий Прандтля для ПС:

$$Pr_w = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{1,019 \cdot 10^{-4} \cdot 1909}{0,362} = 0,5373.$$

Коэффициент восстановления температуры:

$$r_w = \sqrt[3]{Pr_w} = \sqrt[3]{0,5373} = 0,813.$$

Температура восстановления газа на адиабатической стенке:

$$T_\gamma = T_\kappa^1 \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2\right) = 3934,8 \cdot \left(1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,813 \cdot 0,029^2\right) = 3934,9 \text{ К.}$$

Энтальпия восстановления газа на адиабатической стенке:

$$H_\gamma = c_p \cdot T_\gamma = 1909 \cdot 3934,9 = 7,511 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия и плотность продуктов сгорания при температуре стенки:

$$H_w = c_p \cdot T_w = 1909 \cdot 2500 = 4,772 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}},$$

$$\rho_w = \frac{p_\kappa}{R \cdot T_w} = \frac{10,7 \cdot 10^6}{241,8 \cdot 2500} = 16,543 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Значение числа Рейнольдса у стенки:

$$Re_w = \frac{W \cdot d_3 \cdot \rho_w}{\eta} = \frac{30 \cdot 1,57 \cdot 16,543}{1,019 \cdot 10^{-4}} = 7,64 \cdot 10^6.$$

Значение числа Стантона:

$$\begin{aligned} St^* &= 0,0326 \cdot Re_w^{-0,2} \cdot Pr_w^{-0,6} \cdot \left(\frac{H_w}{H_\gamma}\right)^{0,39} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2\right)^{0,11} = \\ &= 0,0326 \times (7,64 \cdot 10^6)^{-0,2} \cdot 0,5373^{-0,6} \cdot \left(\frac{4,772}{7,551}\right)^{0,39} \\ &\cdot \left(1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,813 \cdot 0,029^2\right)^{0,11} = 1,438 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Поправочные коэффициенты, учитывающие:

– шероховатость стенки

$$k_{\text{ш}} = 1 + 0,151 \cdot k_s^{0,29} = 1 + 0,151 \cdot 0,2^{0,29} = 1,095;$$

– вдув газа в результате разложения газа

$$k_{\text{в}} = 0,9;$$

– влияние К-фазы в ПС

$$k_p = 1 + 0,0246 \cdot Re_w^{-0,3} \cdot \left( \frac{z_{\text{кф}}}{1 - z_{\text{кф}}} \right)^{2,45} =$$

$$= 1 + 0,0246 \cdot (1,221 \cdot 10^7)^{-0,3} \cdot \left( \frac{0,355}{1 - 0,326} \right)^{2,45} = 1,004$$

$$St = St^* \cdot k_b \cdot k_{\text{ш}} \cdot k_p = 1,438 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 1,095 \cdot 1,004 = 1,422 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \rho_w \cdot W \cdot St \cdot c_p = 16,543 \cdot 30 \cdot 1,422 \cdot 10^{-3} \cdot 1909 = 1347 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Конвективный тепловой поток:

$$q_k = \alpha \cdot (T_k - T_w) = 1347 \cdot (3935 - 2500) = 1,933 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Расчет радиационного теплового потока.

Степень черноты стенки принята равной  $\varepsilon_w = 0,8$

По номограммам определены интегральные излучательные способности трехатомных молекул и газообразных продуктов сгорания в целом:  $\varepsilon_{H_2O} = 0,26, \varepsilon_{CO_2} = 0,035$ .

Излучательная способность ПС:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2} = 0,26 + 0,035 - 0,26 \cdot 0,035 = 0,2859.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:

$$\bar{d}_{\text{кч}} = 10,68 \cdot d_{\text{кр}}^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot z_{\text{кф}} \cdot t_k \cdot p_k}{10^6}} \right) =$$

$$= 10,68 \cdot 320^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot 0,326 \cdot 0,3 \cdot 9,5 \cdot 10^6}{10^6}} \right) = 5,161 [\text{мкм}].$$

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания и величина  $\varepsilon_{\text{пс}}$  равны:

$$k_{\text{эф}} = 0,042 \cdot \frac{1}{p_k} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{\bar{d}_{\text{кч}}^2}} \cdot z_{\text{кф}} = 0,042 \cdot \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{3935}{(5,161 \cdot 10^{-6})^2}} \cdot 0,355$$

$$= 0,01812,$$

$$\varepsilon_{\text{пс}} = 1 - [(1 - \varepsilon_r) \cdot e^{-k_{\text{эф}} \cdot l_3}] = 1 - [(1 - 0,2859) \cdot e^{-0,01812 \cdot 2,471}] = 0,3171.$$

Радиационный тепловой поток:

$$q_p = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{\text{пс}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_k^4 - T_w^4) = 0,8 \cdot 0,3171 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (3935^4 - 2500^4) \\ = 2,886 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Скорость уноса массы материала ТЗП рассчитывается в предположении равенства начальной температуры ТЗП  $T_n^0 = 293 \text{ K}$ :

$$u_{\text{п}} = \frac{q_k + q_p}{\rho_{\text{п}} \cdot (Q_{\text{п}} - \varphi \cdot (I_k - I_{\text{п}}) + c_{p_{\text{п}}} \cdot (T_w - T_{\text{п}}^0))} = \\ = \frac{1,933 \cdot 10^6 + 2,886 \cdot 10^6}{1300 \cdot (3 \cdot 10^6 - 0,6 \cdot (-3,986 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6) + 2600 \cdot (2500 - 293))} \\ = 4,24 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При выборе толщин внутреннего ТЗП максимально допустимая температура на границе «ТЗП – силовая оболочка» принята равной  $100^\circ\text{C}$  на момент времени окончания теплового воздействия –  $35 \text{ сек}$ . Тогда с учетом определенных выше значений расчет необходимой толщины слоя абляционного ТЗП выполняется по формуле:

$$a_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot c_{p_{\text{п}}}} = \frac{0,9}{1300 \cdot 2600} = 2,663 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \\ \delta_{\text{п}} = \frac{a_{\text{п}}}{u_{\text{п}}} \cdot \ln \left( \frac{T_w - T_{\text{п}}^0}{T_{\text{м}} - T_{\text{п}}^0} \right) + u_{\text{п}} \cdot \tau_p = \\ = \frac{2,663 \cdot 10^{-7}}{4,24 \cdot 10^{-4}} \cdot \ln \left( \frac{2500 - 293}{373 - 293} \right) + 4,24 \cdot 10^{-4} \cdot 35 = 0,019 \text{ мм}.$$

Принято:  $\delta_{\text{п}} = 19 \text{ мм}$ .

### 1.6.2 Расчет толщины ТЗП в области конического компенсатора

Расчет конвективного теплового потока.

Эквивалентный размер области:

$$d_3 = 2 \text{ м}.$$

Характерная скорость течения газа:

$$W = 180 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Время взаимодействия ПС со стенкой:

$$t = \tau_p = 35 \text{ с.}$$

Число Маха в данной зоне:

$$M = \frac{W}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_k}} = \frac{180}{\sqrt{1,15 \cdot 241,9 \cdot 3935}} = 0,141.$$

Предположим, температура адиабатической стенки  $T_w = 2500 \text{ К}$ , что соответствует температуре пиролиза материала ТЗП. Статическая температура продуктов сгорания (ПС) в районе переднего днища равна:

$$T_k^1 = \frac{T_k}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2} = \frac{3935}{1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,141^2} = 3934 \text{ К.}$$

Критерий Прандтля для ПС:

$$Pr_w = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{1,019 \cdot 10^{-4} \cdot 1909}{0,362} = 0,5373.$$

Коэффициент восстановления температуры:

$$r_w = \sqrt[3]{Pr_w} = \sqrt[3]{0,5373} = 0,831.$$

Температура восстановления газа на адиабатической стенке:

$$T_\gamma = T_k^1 \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2\right) = 3934 \cdot \left(1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,831 \cdot 0,141^2\right) = 3934 \text{ К.}$$

Энтальпия восстановления газа на адиабатической стенке:

$$H_\gamma = c_p \cdot T_\gamma = 1909 \cdot 3934 = 7,511 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия и плотность продуктов сгорания при температуре стенки:

$$H_w = c_p \cdot T_w = 1909 \cdot 2500 = 4,772 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}},$$

$$\rho_w = \frac{p_k}{R \cdot T_w} = \frac{10,7 \cdot 10^6}{241,8 \cdot 2500} = 17,701 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Значение числа Рейнольдса у стенки:

$$Re_w = \frac{W \cdot d_3 \cdot \rho_w}{\eta} = \frac{180 \cdot 2 \cdot 17,701}{1,019 \cdot 10^{-4}} = 6,372 \cdot 10^7.$$

Значение числа Стантона:

$$\begin{aligned} St^* &= 0,0326 \cdot Re_w^{-0,2} \cdot Pr_w^{-0,6} \cdot \left( \frac{H_w}{H_\gamma} \right)^{0,39} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2 \right)^{0,11} = \\ &= 0,0326 \cdot (7,64 \cdot 10^6)^{-0,2} \cdot 0,5373^{-0,6} \cdot \left( \frac{4,772}{7,551} \right)^{0,39} \\ &\cdot \left( 1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,813 \cdot 0,029^2 \right)^{0,11} = 9,296 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Поправочные коэффициенты, учитывающие:

– шероховатость стенки

$$k_{ш} = 1 + 0,151 \cdot k_s^{0,29} = 1 + 0,151 \cdot 0,2^{0,29} = 1,095;$$

– вдув газа в результате разложения газа

$$k_B = 0,9;$$

– влияние К-фазы в ПС

$$\begin{aligned} k_p &= 1 + 0,0246 \cdot Re_w^{-0,3} \cdot \left( \frac{Z_{кф}}{1 - Z_{кф}} \right)^{2,45} = \\ &= 1 + 0,0246 \cdot (6,372 \cdot 10^7)^{-0,3} \cdot \left( \frac{0,355}{1 - 0,326} \right)^{2,45} = 1,004 \end{aligned}$$

$$St = St^* \cdot k_B \cdot k_{ш} \cdot k_p = 1,438 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 1,095 \cdot 1,004 = 9,159 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \rho_w \cdot W \cdot St \cdot c_p = 17,701 \cdot 180 \cdot 9,159 \cdot 10^{-4} \cdot 1909 = 5571 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Конвективный тепловой поток:

$$q_K = \alpha \cdot (T_K - T_w) = 5571 \cdot (3935 - 2500) = 7,994 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Расчет лучистого теплового потока.

Степень черноты стенки принята равной  $\varepsilon_w = 0,8$

По номограммам определены интегральные излучательные способности трехатомных молекул и газообразных продуктов сгорания в целом:  $\varepsilon_{H_2O} = 0,26, \varepsilon_{CO_2} = 0,035$ .

Излучательная способность ПС:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2} = 0,26 + 0,035 - 0,26 \cdot 0,035 = 0,2859.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:

$$\begin{aligned} \bar{d}_{кч} &= 10,68 \cdot d_{кр}^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot z_{кф} \cdot t_k \cdot p_k}{10^6}} \right) = \\ &= 10,68 \cdot 320^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot 0,326 \cdot 0,3 \cdot 9,5 \cdot 10^6}{10^6}} \right) = 5,161 \text{ [мкм]}. \end{aligned}$$

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания и величина  $\varepsilon_{пс}$  равны:

$$\begin{aligned} k_{эф} &= 0,042 \cdot \frac{1}{p_k} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{\bar{d}_{кч}^2}} \cdot z_{кф} = 0,042 \cdot \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{3935}{(5,161 \cdot 10^{-6})^2}} \cdot 0,355 \\ &= 0,01812, \end{aligned}$$

$$\varepsilon_{пс} = 1 - [(1 - \varepsilon_r) \cdot e^{-k_{эф} \cdot l_3}] = 1 - [(1 - 0,2859) \cdot e^{-0,01812 \cdot 2,471}] = 0,3171.$$

Радиационный тепловой поток:

$$\begin{aligned} q_p &= \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{пс} \cdot \sigma_0 \cdot (T_k^4 - T_w^4) = 0,8 \cdot 0,3171 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (3935^4 - 2500^4) \\ &= 2,886 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}. \end{aligned}$$

Скорость уноса массы материала ТЗП рассчитывается в предположении равенства начальной температуры ТЗП  $T_{п}^0 = 293 \text{ К}$ :

$$\begin{aligned} u_{п} &= \frac{q_k + q_p}{\rho_{п} \cdot \left( Q_{п} - \varphi \cdot (I_k - I_{п}) + c_{p_{п}} \cdot (T_w - T_{п}^0) \right)} = \\ &= \frac{7,994 \cdot 10^6 + 2,886 \cdot 10^6}{1300 \cdot (3 \cdot 10^6 - 0,6 \cdot (-3,986 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6) + 2600 \cdot (2500 - 293))} \\ &= 1,635 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}. \end{aligned}$$



При выборе толщин внутреннего ТЗП максимально допустимая температура на границе «ТЗП – силовая оболочка» принята равной 100°С на момент времени окончания теплового воздействия – 33 сек. Тогда с учетом определенных выше значений расчет необходимой толщины слоя абляционного ТЗП выполняется по формуле:

$$a_{\Pi} = \frac{\lambda_{\Pi}}{\rho_{\Pi} \cdot c_{p_{\Pi}}} = \frac{0,9}{1300 \cdot 2600} = 2,663 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

$$\delta_{\Pi} = \frac{a_{\Pi}}{u_{\Pi}} \cdot \ln \left( \frac{T_w - T_{\Pi}^0}{T_{\text{м}} - T_{\Pi}^0} \right) + u_{\Pi} \cdot \tau_p =$$

$$= \frac{2,663 \cdot 10^{-7}}{1,635 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left( \frac{2500 - 293}{373 - 293} \right) + 1,635 \cdot 10^{-3} \cdot 33 = 0,058 \text{ мм.}$$

Принято:  $\delta_{\Pi} = 58 \text{ мм.}$

### 1.6.3 Расчет толщины ТЗП в области заднего днища

Расчет конвективного теплового потока.

Эквивалентный размер области:

$$d_{\text{э}} \approx \frac{\pi \cdot d_{\kappa}}{4} = \frac{\pi \cdot 2}{4} = 1,57 \text{ м.}$$

Характерная скорость течения газа:

$$W = 280 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Время взаимодействия ПС со стенкой:

$$t = \tau_p = 35 \text{ с.}$$

Число Маха в данной зоне:

$$M = \frac{W}{\sqrt{k \cdot R \cdot T_{\kappa}}} = \frac{280}{\sqrt{1,15 \cdot 241,9 \cdot 3935}} = 0,274.$$

Предположим, температура адиабатической стенки  $T_w = 2500 \text{ К}$ , что соответствует температуре пиролиза материала ТЗП. Статическая температура продуктов сгорания (ПС) в районе переднего днища равна:

$$T_{\kappa}^1 = \frac{T_{\kappa}}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2} = \frac{3935}{1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,029^2} = 3920,8 \text{ K.}$$

Критерий Прандтля для ПС:

$$Pr_w = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} = \frac{1,019 \cdot 10^{-4} \cdot 1909}{0,362} = 0,574.$$

Коэффициент восстановления температуры:

$$r_w = \sqrt[3]{Pr_w} = \sqrt[3]{0,574} = 0,831.$$

Температура восстановления газа на адиабатической стенке:

$$T_{\gamma} = T_{\kappa}^1 \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2\right) = 3934,8 \cdot \left(1 + \frac{1,15-1}{2} \cdot 0,813 \cdot 0,029^2\right) = 3933,9 \text{ K.}$$

Энтальпия восстановления газа на адиабатической стенке:

$$H_{\gamma} = c_p \cdot T_{\gamma} = 1909 \cdot 3933,9 = 10,22 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия и плотность продуктов сгорания при температуре стенки:

$$H_w = c_p \cdot T_w = 1909 \cdot 2500 = 6,500 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}},$$

$$\rho_w = \frac{p_{\kappa}}{R \cdot T_w} = \frac{10,7 \cdot 10^6}{241,8 \cdot 2500} = 16,543 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Значение числа Рейнольдса у стенки:

$$Re_w = \frac{W \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho_w}{\eta} = \frac{30 \cdot 1,57 \cdot 16,543}{1,019 \cdot 10^{-4}} = 70,24 \cdot 10^6.$$

Значение числа Стантона:

$$\begin{aligned} St^* &= 0,0326 \cdot Re_w^{-0,2} \cdot Pr_w^{-0,6} \cdot \left(\frac{H_w}{H_{\gamma}}\right)^{0,39} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot r_w \cdot M^2\right)^{0,11} = \\ &= 0,0326 \times (70,24 \cdot 10^6)^{-0,2} \cdot 0,574^{-0,6} \cdot \left(\frac{6,500}{10,22}\right)^{0,39} \\ &\cdot \left(1 + \frac{1,10-1}{2} \cdot 0,813 \cdot 0,029^2\right)^{0,11} = 7,524 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Поправочные коэффициенты, учитывающие:

— шероховатость стенки

$$k_{ш} = 1 + 0,151 \cdot k_s^{0,29} = 1 + 0,151 \cdot 0,2^{0,29} = 1,095;$$

– вдув газа в результате разложения газа

$$k_{в} = 0,9;$$

– влияние К-фазы в ПС

$$k_p = 1 + 0,0246 \cdot Re_w^{-0,3} \cdot \left( \frac{Z_{кф}}{1 - Z_{кф}} \right)^{2,45} =$$

$$= 1 + 0,0246 \cdot (70,24 \cdot 10^6)^{-0,3} \cdot \left( \frac{0,355}{1 - 0,326} \right)^{2,45} = 1,004$$

$$St = St^* \cdot k_{в} \cdot k_{ш} \cdot k_p = 7,524 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9 \cdot 1,095 \cdot 1,004 = 7,413 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \rho_w \cdot W \cdot St \cdot c_p = 16,543 \cdot 280 \cdot 1,422 \cdot 10^{-3} \cdot 1909 = 8925 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Конвективный тепловой поток:

$$q_k = \alpha \cdot (T_k - T_w) = 8925 \cdot (3935 - 2500) = 12,81 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Расчет лучистого теплопотока

Степень черноты стенки принята равной  $\varepsilon_w = 0,8$

По номограммам определены интегральные излучательные способности трехатомных молекул и газообразных продуктов сгорания в целом:  $\varepsilon_{H_2O} = 0,26, \varepsilon_{CO_2} = 0,035$ .

Излучательная способность ПС:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2} = 0,26 + 0,035 - 0,26 \cdot 0,035 = 0,2859.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС:

$$\bar{d}_{кч} = 10,68 \cdot d_{кр}^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot Z_{кф} \cdot t_k \cdot p_k}{10^6}} \right) =$$

$$= 10,68 \cdot 320^{0,293} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,1128 \cdot 0,326 \cdot 0,3 \cdot 9,5 \cdot 10^6}{10^6}} \right) = 5,161 [\text{мкм}].$$

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча в продуктах сгорания и величина  $\varepsilon_{пс}$  равны:

$$k_{\text{эф}} = 0,042 \cdot \frac{1}{p_k} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{\bar{d}_{\text{кч}}^2}} \cdot z_{\text{кф}} = 0,042 \cdot \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{3935}{(5,161 \cdot 10^{-6})^2}} \cdot 0,355$$

$$= 0,01812,$$

$$\varepsilon_{\text{пс}} = 1 - [(1 - \varepsilon_{\text{г}}) \cdot e^{-k_{\text{эф}} \cdot l_{\text{э}}}] = 1 - [(1 - 0,2859) \cdot e^{-0,01812 \cdot 2,471}] = 0,3171.$$

Радиационный тепловой поток:

$$q_p = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{\text{пс}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_k^4 - T_w^4) = 0,8 \cdot 0,3171 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (3935^4 - 2500^4)$$

$$= 2,886 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}.$$

Скорость уноса массы материала ТЗП рассчитывается в предположении равенства начальной температуры ТЗП  $T_n^0 = 293 \text{ K}$ :

$$u_{\text{п}} = \frac{q_k + q_p}{\rho_{\text{п}} \cdot (Q_{\text{п}} - \varphi \cdot (I_k - I_{\text{п}}) + c_{p_{\text{п}}} \cdot (T_w - T_{\text{п}}^0))} =$$

$$= \frac{12,81 \cdot 10^6 + 2,886 \cdot 10^6}{1300 \cdot (3 \cdot 10^6 - 0,6 \cdot (-3,986 \cdot 10^6 + 4 \cdot 10^6) + 2600 \cdot (2500 - 293))}$$

$$= 2,799 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При выборе толщин внутреннего ТЗП максимально допустимая температура на границе «ТЗП – силовая оболочка» принята равной  $100^\circ\text{C}$  на момент времени окончания теплового воздействия –  $35 \text{ сек}$ . Тогда с учетом определенных выше значений расчет необходимой толщины слоя абляционного ТЗП выполняется по формуле:

$$a_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot c_{p_{\text{п}}}} = \frac{0,9}{1300 \cdot 2600} = 2,663 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

$$\delta_{\text{п}} = \frac{a_{\text{п}}}{u_{\text{п}}} \cdot \ln \left( \frac{T_w - T_{\text{п}}^0}{T_{\text{м}} - T_{\text{п}}^0} \right) + u_{\text{п}} \cdot \tau_p =$$

$$= \frac{2,663 \cdot 10^{-7}}{2,799 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left( \frac{2500 - 293}{373 - 293} \right) + 2,799 \cdot 10^{-3} \cdot 35 = 0,098 \text{ мм}.$$

Принято:  $\delta_{\text{п}} = 98 \text{ мм}$ .

Итогом работы является 3-D модель, созданная по вышеописанным данным.

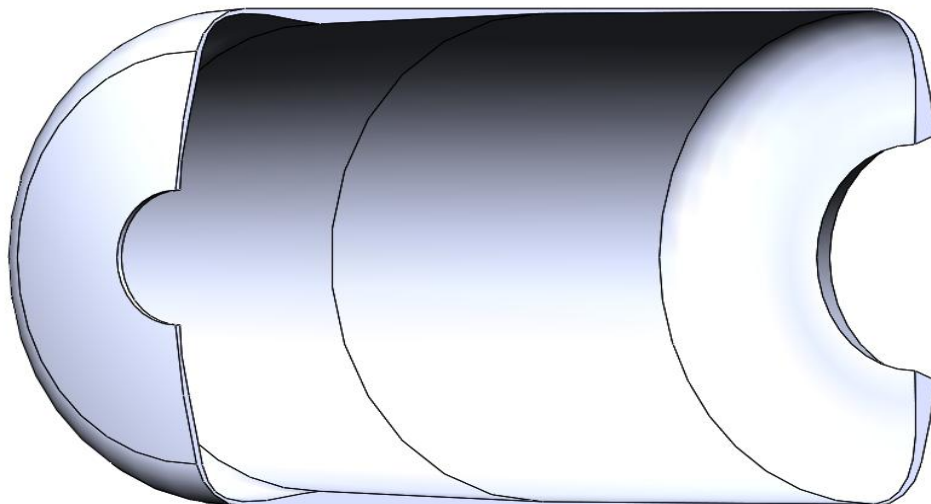


Рис. 1.4 – 3-D модель ТЗП

#### 1.6.4 Результат расчета ТЗП

По данным таблицы 1.3 были построены соответствующие модели, зная объем которых были найдены массы используемого количества ТЗП.

Таблица 1.3 – Характеристики ТЗП

Форма заряда	Толщина ТЗП переднего днища, мм.	Толщина ТЗП опасного сечения цилиндричес кой части, мм.	Толщина ТЗП заднего днища, мм.	Объем ТЗП, м <sup>3</sup> .	Масса ТЗП, кг.
Внутренний канал в виде лучей	50	61	132	1,24	1612
Внутренний канал в виде трапеций	47	48	110	1,02	1326
С коническим компенсатором	19	61	98	0,65	845

## 1.7 Прочность корпуса

В настоящее время в РДТТ применяются в основном три типа обечаек: металлические, из композиционных материалов и комбинированные. Как наиболее перспективные широко используются пластиковые корпуса типа «кокон», выполненных методом спирально-кольцевой намотки из органопластика на основе арамидных волокон.

Выбор материала для корпуса РДТТ зависит от назначения ракеты, размеров двигателя, действующих нагрузок и условий эксплуатации

В настоящее время для различных типов ракет применяются следующие материалы: легкосвариваемые легированные сплавы, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, стекло-, угле- и органопластики. Значительная роль в улучшении весового совершенства РДТТ принадлежит волокнистым материалам.

Корпус проектируемого ракетного двигателя выполнен методом непрерывной намотки лентой органопластика на основе арамидных волокон, пропитанных эпоксидным связующим. Его основные характеристики приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Характеристики материала «Армос»

Параметр	$[\sigma_b]$ , МПа	$E$ , ГПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{[\sigma_b]}{\rho \cdot g_0}$ , км	$a_k \cdot 10^5$ , К <sup>-1</sup>
Значение	2500	93	1240	189	0,3...0,6

Использование органических волокон обеспечивает дальнейшее повышение характеристик корпусов РДТТ и является перспективным направлением развития ракетной техники. Органопластик обладает рядом преимуществ перед стеклопластиком. Прежде всего, он имеет самое высокое значение удельной прочности, которая в 6 раз превышает удельную прочность титана. Анализ весовых характеристик двигателей из стеклопластика и органопластика показывает, что выигрыш в массе по сравнению с двигателями,

изготовленных из высокопрочных конструкционных сталей, составляет для стеклопластиков 15 ... 25%, а для органопластиков 30...50%.

Кроме того, композиционный материал на основе органоволокна обладает на 20 ... 30% большей, чем у стекловолокна, сопротивлением к поверхностным повреждениям, хорошими электро- и теплоизоляционными свойствами, антикоррозионной стойкостью. К недостаткам органопластиков можно отнести сравнительно низкую прочность на сжатие, высокую ползучесть и высокую стоимость.

Расчет, аналогично предыдущему пункту, проведен для заряда с коническим компенсатором.

В качестве исходных данных для расчета силовой оболочки корпуса примем следующие величины:

- $p_k^{max} = 10,74 \text{ МПа}$  – максимальное давление в камере сгорания;
- $d_{01} = 0,50 \text{ м}$ ,  $d_{02} = 1,130 \text{ м}$  – диаметры переднего и заднего полюсных отверстий;
- $d = 2,0 \text{ м}$  – наружный диаметр корпуса.

Допустимое напряжение определяется соотношением:

$$\sigma_b = \frac{[\sigma_b]}{k_3} = \frac{2500}{1,25} = 2000 \text{ МПа},$$

где  $k_3 = (1,15 \dots 1,30)$  – коэффициент запаса прочности;

$[\sigma_b]$  – предел прочности на разрыв в тангенциальном направлении.

Вычислим значения:

$$\bar{d}_{01} = \frac{d_{01}}{d} = \frac{0,50}{2,0} = 0,22,$$

$$\bar{d}_{02} = \frac{d_{02}}{d} = \frac{1,13}{2,0} = 0,49.$$

Найдем допустимые напряжение при спиральной  $\sigma_{\theta,c}$  и кольцевой намотке  $\sigma_{\theta,k}$ . Так как  $\bar{d}_{01} < 0,22$ , примем  $\alpha = 0,7$ .

Тогда получим:

$$\sigma_{B,K} = \sigma_B = 2000 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{B,c} = \sigma_{B,K} \cdot \alpha = 2000 \cdot 0,7 = 1400 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем углы намотки волокон у переднего  $\beta_1$  и заднего  $\beta_2$  днищ:

$$\beta_1 = \arccos\left(\sqrt{1 - \bar{d}_{01}^2}\right) = \arccos\left(\sqrt{1 - 0,22^2}\right) \approx 13^\circ,$$

$$\beta_2 = \arccos\left(\sqrt{1 - \bar{d}_{02}^2}\right) = \arccos\left(\sqrt{1 - 0,73^2}\right) \approx 30^\circ.$$

Рассчитаем толщины обечаек спиральной намотки в месте соединения цилиндрической обечайки с передним  $h_{c1}$  и задним  $h_{c2}$  днищами:

$$h_{c1} = \frac{p_K^{max} \cdot d}{2 \cdot \sigma_{B,c} \cdot (\cos(\beta_1))^2} = \frac{10,74 \cdot 10^6 \cdot 2,0}{2 \cdot 1400 \cdot 10^6 \cdot (\cos(13^\circ))^2} = 0,0081 \text{ м},$$

$$h_{c2} = \frac{p_K^{max} \cdot d}{2 \cdot \sigma_{B,c} \cdot (\cos(\beta_2))^2} = \frac{10,74 \cdot 10^6 \cdot 2,0}{2 \cdot 1400 \cdot 10^6 \cdot (\cos(30^\circ))^2} = 0,011 \text{ м}.$$

Определим угол намотки волокон цилиндрической части оболочки:

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \frac{13^\circ + 30^\circ}{2} = 22^\circ.$$

Так как выполняется условие  $\bar{d}_{01} < \bar{d}_{02}$ , тогда толщины спиральной и кольцевой намоток в центральной части обечайки:

$$h_c = h_{c2} \cdot \frac{\cos(\beta_2)}{\cos(\beta_1)} = 0,011 \cdot \frac{\cos(30^\circ)}{\cos(13^\circ)} = 0,0097 \text{ м},$$

$$h_K = \alpha \cdot h_c \cdot \left(3 \cdot (\cos(\beta))^2 - 1\right) = 0,7 \cdot 0,0097 \cdot \left(3 \cdot (\cos(22^\circ))^2 - 1\right) = 0,011 \text{ м},$$

а толщина центральной части цилиндрической обечайки будет равна:

$$\delta_{ц} = h_c + h_K = 0,0097 + 0,011 = 0,020 \text{ м} = 20 \text{ мм}$$

Рассчитаем толщины обечаек в центральной части переднего и заднего днища:

$$\delta_1 = \frac{h_{c1}}{\bar{d}_{01}} = \frac{0,0081}{0,22} = 0,036 \text{ м} \approx 36 \text{ мм},$$



$$\delta_2 = \frac{h_{c2}}{\bar{d}_{02}} = \frac{0,011}{0,49} = 0,022 \text{ м} \approx 22 \text{ мм.}$$

Итогом работы является 3-D модель, созданная по вышеописанным данным.

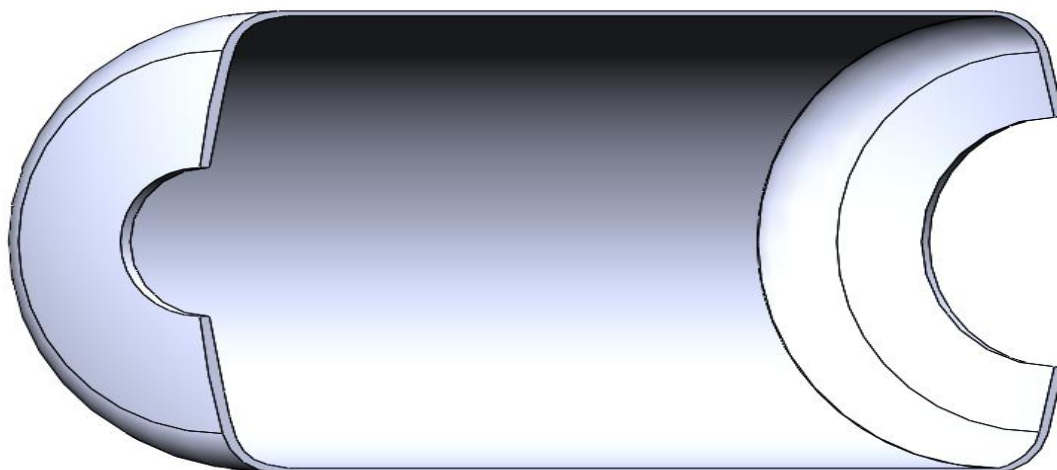


Рис. 1.5 – 3-D модель корпуса

Результаты расчетов для всех рассматриваемых зарядов представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики корпусов

Форма заряда	Толщина обечайки переднего днища, мм.	Толщина корпуса цилиндрической части, мм.	Толщина ТЗП заднего днища, мм.	Объем корпуса, м <sup>3</sup> .	Масса корпуса, кг.
Внутренний канал в виде лучей	40	33	84	1,20	1488
Внутренний канал в виде трапеций	35	30	73	0,76	942,4
С коническим компенсатором	22	20	36	0,53	657,2

## 1.8 Сравнение характеристик зарядов

Итоговым критерием служит отношение массы двигателя к массе топлива  $\alpha_{\text{ДВ}}$ :

$$\alpha_{\text{ДВ}} = \frac{M_{\text{К.ДВ}}}{M_{\text{Т}}},$$

где  $M_{\text{К.ДВ}} = M_{\text{ТЗП}} + M_{\text{к}} + M_{\text{ф}}$

Результаты расчетов для всех рассматриваемых зарядов представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Сравнение массовых характеристик зарядов

Форма заряда	Масса топлива, кг.	Масса ТЗП, кг.	Масса корпуса, кг.	Масса конструкции двигателя, кг.	Коэффициент массового совершенства двигателя
Заряд с внутренним каналом в виде лучей	9800,5	1612	1488	3100	0,316
Заряд с внутренним каналом в виде трапеций	9800,5	1326	942,4	2268,4	0,223
Заряд с коническим компенсатором	9800,5	845	657,2	1502,2	0,153

Из таблицы очевидно, что наилучшим является заряд с коническим компенсатором. Так же из графика тяги видно, что заряд с коническим компенсатором обладает наиболее постоянной кривой, что положительно сказывается на итоговом критерии, не утяжеляя ее.

## 1.9 Расчет отклонений и оценка предельных значений внутрибаллистических характеристик

Данный расчет ставит целью определение предельных значений внутрибаллистических характеристик РДТТ, вызванных случайными и неслучайными отклонениями параметров двигателя от номинальных.

### 1.9.1 Случайные отклонения параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда твердого топлива

Относительное случайное отклонение единичной скорости горения, вызванное разбросом технологических режимов и свойств исходного сырья в пределах одной партии зарядов:

$$\delta u_1^{cl1} = 0,01 \dots 0,04 = 0,025.$$

Относительное случайное отклонение единичной скорости горения из-за неточности измерения начальной температуры заряда:

$$\delta u_1^{cl2} = \frac{\Delta u_1}{u_1} = \frac{\partial u_1}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{u_1},$$

$$u_1 = u_1^* [1 + D \cdot \Delta T],$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial T} = u_1^* \cdot D,$$

$$\delta u_1^{cl2} = \frac{u_1^* \cdot D}{u_1} \cdot \Delta T = \frac{u_1^* \cdot D \cdot \Delta T}{u_1^* [1 + D \cdot \Delta T]} = \frac{D \cdot \Delta T}{[1 + D \cdot \Delta T]} = \frac{0,003 \cdot 4}{1 + 0,003 \cdot 4} = 0,0118,$$

Где  $\Delta T$  – неточность измерения начальной температуры заряда,  $\Delta T = 3^\circ \dots 5^\circ = 4^\circ$ .  $D$  – эмпирический коэффициент,  $D = 0,003$ .

Случайное отклонение единичной скорости горения:

$$\delta u_1^{cl} = \delta u_1^{cl1} + \delta u_1^{cl2} = 0,025 + 0,0118 = 0,0368.$$

Случайное отклонение площади поверхности горения заряда твердого топлива:

$$\delta F_2^{cl} = 0,005 \dots 0,007 = 0,006.$$

Случайное отклонение плотности твердого топлива из-за отклонений технологических режимов при изготовлении заряда, а также из-за изменения химического состава топлива в пределах допуска:

$$\delta\rho_m^{cl} = 0,005 \dots 0,007 = 0,006.$$

Относительное случайное отклонение энергетической характеристики твердого топлива, вызванное разбросом технологических режимов и свойств исходного сырья в пределах одной партии зарядов:

$$\delta(RT_k)^{cl1} = 0,005 \dots 0,015 = 0,01.$$

Относительное случайное отклонение комплекса  $RT_k$  из-за неточности измерения начальной температуры заряда:

$$\delta(RT_k)^{cl2} = m \cdot \Delta T = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4 = 0,001,$$

где  $m$  – эмпирический коэффициент,  $m = 0,0002 \dots 0,0003 = 0,00025$ .

Случайное отклонение энергетической характеристики твердого топлива:

$$\delta(RT_k)^{cl} = \delta(RT_k)^{cl1} + \delta(RT_k)^{cl2} = 0,01 + 0,001 = 0,011.$$

Случайное отклонение коэффициента тепловых потерь, вызванное изменениями толщины стенок камеры сгорания, условий теплопередачи от газов к стенкам камеры и т.п.:

$$\delta\chi^{cl} = 0,002 \dots 0,003 = 0,0025.$$

Случайное отклонение коэффициента расхода сопла, вызванное изменениями геометрических размеров и состояния поверхности сопла в пределах допуска на изготовление:

$$\delta\varphi_c^{cl} = 0,002 \dots 0,004 = 0,003.$$

Случайный разброс площади критического сечения сопла из-за допуска на изготовление ( $\Delta d$  – половина поля допуска на изготовление вкладыша, допуск  $H12$ ,  $d^* = 320$  мм):

$$\Delta d = \frac{0,4}{2} = 0,2 \text{ мм},$$

$$\delta F_{кр}^{сл1} = \frac{(d^* + \Delta d)^2 - d^{*2}}{d^{*2}} \cong \frac{320,2 - 320}{320} = 0,0006.$$

Случайный разброс площади критического сечения сопла, вызванный разбросом скорости разгара сопла:

$$\delta F_{кр}^{сл2} = 0.$$

Случайное отклонение площади критического сечения:

$$\delta F_{кр}^{сл} = \delta F_{кр}^{сл1} + \delta F_{кр}^{сл2} = 0,0006 + 0 = 0,0006.$$

Случайное отклонение площади среза сопла, вызванное изменениями диаметра сопла на срезе в пределах допуска на изготовление:

$$\delta F_a^{сл} = 0,02 \dots 0,04 = 0,03.$$

Случайное отклонение комплекса  $\Phi \left[ \frac{p_a}{p_k} \right]$ :

$$f_4^* = \frac{\left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{f_1^{*2} + \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}},$$

$$\text{где } f_1^* = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

$$\text{Т.к. } p_k/p_a = 333, f_1^* = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,15}{1,15-1} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{333} \right)^{\frac{1,15-1}{1,15}} \right]} = 2,854,$$

$$f_4^* = \frac{\left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}}{f_1^{*2} + \left( \frac{p_a}{p_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{\left( \frac{1}{333} \right)^{\frac{1,15-1}{1,15}}}{2,854^2 + \left( \frac{1}{333} \right)^{\frac{1,15-1}{1,15}}} = 0,054,$$

Тогда:

$$\delta \Phi^{сл} = (-\delta \varphi_c^{сл} - \delta F_{кр}^{сл} + \delta F_a^{сл}) \cdot f_4^* = (-0,003 - 0,0006 + 0,03) \cdot 0,054 = 0,0014,$$

$$\bar{\Phi}_{сл} = \delta \Phi^{сл} + 1 = 0,0014 + 1 = 1,0014.$$

Предельное отклонение комплекса  $\Phi \left[ p_a / p_k \right]$ :

$$\begin{aligned} \delta \Phi_{пред}^{cl} &= \pm f_4^* \cdot \sqrt{(\delta \varphi_c^{cl})^2 + (\delta F_{kp}^{cl})^2 + (\delta F_a^{cl})^2} \\ &= \pm 0,054 \cdot \sqrt{(0,003)^2 + (0,0006)^2 + (0,03)^2} = \pm 0,0016. \end{aligned}$$

Предельное отклонение давления в камере сгорания:

$$\begin{aligned} \delta p_{к пред}^{cl} &= \\ &= \pm \frac{1}{1-\nu} \cdot \left[ (\delta F_c^{cl})^2 + (\delta \rho_m^{cl})^2 + (\delta \varphi_c^{cl})^2 + \left( \frac{\delta \chi^{cl}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\delta (RT_k)^{cl}}{2} \right)^2 + (\delta F_{kp}^{cl})^2 \right. \\ &\quad \left. + (\delta u_1^{cl})^2 \right]^{0,5} = \\ &= \pm \frac{1}{1-0,24} \cdot \left[ (0,006)^2 + (0,006)^2 + (0,003)^2 + \left( \frac{0,0025}{2} \right)^2 + \left( \frac{0,011}{2} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. 0,00062 + 0,036820,5 = \pm 0,064. \right. \end{aligned}$$

Предельное отклонение секундного расхода газов:

$$\begin{aligned} \delta \dot{m}_{пред}^{cl} &= \\ &= \pm \frac{1}{1-\nu} \cdot \left[ (\delta F_c^{cl})^2 + (\delta \rho_m^{cl})^2 + (\delta \varphi_c^{cl})^2 + \left( \nu \cdot \frac{\delta \chi^{cl}}{2} \right)^2 + \left( \nu \cdot \frac{\delta (RT_k)^{cl}}{2} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \nu \cdot \delta F_{kp}^{cl} \right)^2 + (\delta u_1^{cl})^2 \right]^{0,5} = \\ &= \pm \frac{1}{1-0,24} \cdot \left[ (0,006)^2 + (0,006)^2 + (0,003)^2 + \left( 0,4 \cdot \frac{0,0025}{2} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. 0,4 \cdot 0,01122 + 0,24 \cdot 0,00062 + 0,036820,5 = \pm 0,063. \right. \end{aligned}$$

Предельное отклонение тяги двигателя:

$$a = \frac{P^* + p_h \cdot F_a^*}{P^*} = \frac{700000 + 30000 \cdot 3,33}{700000} = 1,143,$$

$$b = \frac{p_h \cdot F_a^*}{P^*} = \frac{30000 \cdot 3,33}{700000} = 0,143,$$

$$\begin{aligned} \delta P_{пред}^{сл} &= \pm \left[ a^2 \cdot \left[ (\delta p_{к пред}^{сл})^2 + (\delta \varphi_c^{сл})^2 + (\delta F_{кр}^{сл})^2 + (\delta \Phi_{пред}^{сл})^2 \right] + (b \cdot \delta F_a^{сл})^2 \right]^{0,5} \\ &= \pm [1,143^2 \cdot [(0,064)^2 + (0,003)^2 + (0,0006)^2 + (0,0016)^2] \\ &\quad + (0,143 \cdot 0,03)^2]^{0,5} = \pm 0,161. \end{aligned}$$

Предельное отклонение удельного импульса:

$$\delta I_{у пред}^{сл} = \pm \sqrt{(\delta P_{пред}^{сл})^2 + (\delta \dot{m}_{пред}^{сл})^2} = \pm \sqrt{(0,161)^2 + (0,063)^2} = \pm 0,173.$$

Предельное отклонение времени работы двигателя:

$$t = \frac{e}{u_1 \cdot p_{к}^v},$$

$$\ln t = \ln e - \ln u_1 - v \cdot \ln p_{к},$$

Продифференцируем и заменим дифференциалы конечными приращениями:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{\Delta e}{e} - \frac{\Delta u_1}{u_1} - v \cdot \frac{\Delta p_{к}}{p_{к}},$$

$$\delta t = \delta e - \delta u_1 - v \cdot \delta p_{к},$$

$$\delta e = 0,$$

$$\begin{aligned} \delta t_{пред}^{сл} &= \pm \sqrt{(\delta u_1^{сл})^2 + (v \cdot \delta p_{к пред}^{сл})^2} = \pm \sqrt{(0,0368)^2 + (0,24 \cdot 0,064)^2} \\ &= \pm 0,04, \end{aligned}$$

Предельное отклонение импульса тяги:

$$I_T = P \cdot t,$$

$$\ln I_T = \ln P + \ln t.$$

Продифференцируем и заменим дифференциалы конечными приращениями:

$$\frac{\Delta I_T}{I_T} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta t}{t},$$

$$\delta I_T = \delta P + \delta t,$$

$$\delta I_{T \text{ пред}}^{cl} = \pm \sqrt{(\delta P_{пред}^{cl})^2 + (\delta t_{пред}^{cl})^2} = \pm \sqrt{(0,161)^2 + (0,04)^2} = \pm 0,167.$$

### 1.9.2 Предельные отклонения параметров, вызванные неслучайными отклонениями параметров камеры сгорания, соплового блока и заряда твердого топлива

Отклонения из-за разных начальных температур заряда:

$$\bar{u}_{1 \min} = 1 + 0,003 \cdot (T_{\min} - 293) = 1 + 0,003 \cdot (223 - 293) = 0,79,$$

$$\bar{u}_{1 \max} = 1 + 0,003 \cdot (T_{\max} - 293) = 1 + 0,003 \cdot (323 - 293) = 1,09,$$

$$\delta u_{1 \min} = \bar{u}_{1 \min} - 1 = 0,79 - 1 = 0,21,$$

$$\delta u_{1 \max} = \bar{u}_{1 \max} - 1 = 1,09 - 1 = 0,09,$$

$$\delta p_{\kappa u}^{\min} = [\bar{u}_{1 \min}]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = [0,79]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = -0,267,$$

$$\delta p_{\kappa u}^{\max} = [\bar{u}_{1 \max}]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = [1,09]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = 0,12,$$

$$\delta \dot{m}_u^{\min} = [\bar{u}_{1 \min}]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = [0,79]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = -0,267,$$

$$\delta \dot{m}_u^{\max} = [\bar{u}_{1 \max}]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = [1,09]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 = 0,12,$$

$$\begin{aligned} \delta P_u^{\min} &= \left( [\bar{u}_{1 \min}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 \right) \cdot (1 + b) = \left( [0,79]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 \right) \cdot (1 + 0,143) \\ &= -0,305, \end{aligned}$$

$$\delta P_u^{\max} = \left( [\bar{u}_{1 \max}]^{\frac{1}{1-\nu}} - 1 \right) \cdot (1 + b) = \left( [1,09]^{\frac{1}{1-0,24}} - 1 \right) \cdot (1 + 0,143) = 0,137.$$

Отклонения, вызванные разгаром сопла равны нулю.

Предельные отклонения основных параметров двигателя определяются по формулам:

$$\delta p_{\kappa \Sigma}^{\min} = \delta p_{\kappa \text{ пред}}^{cl} + \delta p_{\kappa u}^{\min} = -0,064 - 0,267 = -0,331,$$

$$\delta p_{\kappa \Sigma}^{\max} = \delta p_{\kappa \text{ пред}}^{cl} + \delta p_{\kappa u}^{\max} = 0,064 + 0,12 = 0,184,$$

$$\delta \dot{m}_{\Sigma}^{\min} = \delta \dot{m}_{пред}^{cl} + \delta \dot{m}_u^{\min} = -0,063 - 0,267 = 0,33,$$

$$\delta \dot{m}_{\Sigma}^{\max} = \delta \dot{m}_{пред}^{cl} + \delta \dot{m}_u^{\max} = 0,063 + 0,12 = 0,183,$$

$$\delta P_{\Sigma}^{\min} = \delta P_{пред}^{cl} + \delta P_u^{\min} = -0,161 - 0,305 = 0,466,$$

$$\delta P_{\Sigma}^{\max} = \delta P_{пред}^{cl} + \delta P_u^{\max} = 0,161 + 0,137 = 0,298,$$



По результатам определяются максимальные диапазоны давления в камере сгорания, расхода и тяги:

$$p_{\kappa \min} = p_{\kappa N} \cdot (1 + p_{\kappa \Sigma}^{\min}) = 10000000 \cdot (1 - 0,331) \approx 6,69 \text{ МПа},$$

$$p_{\kappa \max} = p_{\kappa N} \cdot (1 + p_{\kappa \Sigma}^{\max}) = 10000000 \cdot (1 + 0,184) \approx 10,18 \text{ МПа},$$

$$\dot{m}_{\min} = \dot{m}_N \cdot (1 + \dot{m}_{\Sigma}^{\min}) = 245,87 \cdot (1 - 0,33) = 164,73 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

$$\dot{m}_{\max} = \dot{m}_N \cdot (1 + \dot{m}_{\Sigma}^{\max}) = 245,87 \cdot (1 + 0,183) = 290,86 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

$$P_{\min} = P_N \cdot (1 + P_{\Sigma}^{\min}) = 700000 \cdot (1 - 0,466) \approx 373,8 \text{ кН},$$

$$P_{\max} = P_N \cdot (1 + P_{\Sigma}^{\max}) = 700000 \cdot (1 + 0,298) \approx 908,6 \text{ кН}.$$

### 1.10 Расчет разъемных соединений

Для монтажа элементов конструкции, а также для соединения РДТТ с составными частями ЛА используются разъемные соединения. Одним из наиболее распространенных среди них, является штифто-шпилечное соединение. Расчет такого рода соединения проводят с целью определения основных размеров соединительных элементов (диаметр резьбы, количество болтов и т.п.), либо выполняют поверочный расчет для оценки реализуемого коэффициента запаса при выбранных параметрах соединений и крепежных деталей.

Как правило, воспламенительное устройство (ВУ) и сопловой блок РДТТ крепятся к фланцам с помощью шпилек. Проведем расчет шпилечного соединения (на переднем днище). Исходными данными для расчета являются:

- Максимальное давление в камере сгорания –  $p_{\kappa}^{\max} = 10,74 \text{ МПа}$ ;
- Материал шпилек – сталь ЧС5-ВИ;
- Предел прочности –  $[\sigma_s] = 1,6 \cdot 10^9 \text{ Па}$ ;
- Радиус установки уплотнительного кольца  $R_y = 0,207 \text{ м}$ ;
- Число шпилек –  $z = 12$ .

Усилие, раскрывающее соединение:

$$F_p = \frac{\pi \cdot R_y^2 \cdot p_k^{max}}{z} = \frac{\pi \cdot 0,207^2 \cdot 10,74 \cdot 10^6}{12} = 120,419 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Сила затяжки из условия нераскрытия стыка:

$$F_{зат} = F_p \cdot k_n \cdot \frac{(1 - \chi)}{z} = 120,419 \cdot 10^3 \cdot 1,1 \cdot \frac{(1 - 0,7)}{12} = 3311,51 \text{ Н.}$$

Здесь  $k_n = 1,1$  – коэффициент запаса нераскрытия стыка,  $\chi$  – коэффициент основной нагрузки, который при установке жестких уплотнительных прокладок может быть принят из диапазона 0,2 ... 0,3, а при использовании мягких – из диапазона 0,4 ... 0,9. Заметим, что в случае приложения к соединению центрального результирующего момента  $M$ , усилие затяжки шпильки, а также действующая на нее суммарная нагрузка, должны учитывать нагрузки от изгибающего момента.

Величина нагрузки  $N$ , действующая на одну шпильку, определяется усилием затяжки  $F_{зат}$  и усилием  $F_p$  за счет силы, раскрывающей соединение:

$$N = F_{зат} + F_p = 3311,51 + 120,419 \cdot 10^3 = 123,76 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Напряжения, возникающие в шпильке, определяются по формуле:

$$\sigma_b = \frac{[\sigma_b]}{k_3} = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d_1^2},$$

где  $k_3 = (1,2 \dots 1,3)$  – коэффициент запаса прочности.

Найдем необходимый диаметр резьбы по заданному числу шпилек:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot N \cdot k_3}{\pi \cdot [\sigma_b]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 123,76 \cdot 10^3 \cdot 1,3}{\pi \cdot 1,6 \cdot 10^9}} = 11,32 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Диаметр резьбы шпилек из стандартных рядов выбирается согласно ГОСТ.

Определяется действительное значение коэффициента запаса при выбранных параметрах соединений и крепежных деталей

$$k_3^d = \frac{[\sigma_b] \cdot \pi \cdot d_1^2}{4 \cdot N} = \frac{1,6 \cdot 10^9 \cdot \pi \cdot (16 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 123,76 \cdot 10^3} = 2,6.$$

Вывод: условие  $k_3^d > k_3$  выполняется, следовательно, конструкция обладает необходимыми прочностными свойствами.

### **1.11 Расчет воспламенительного устройства**

Основным назначением системы воспламенения является зажигание топливного заряда РДТТ за заданное время по определенному закону и при выполнении совокупности дополнительных требований:

- обеспечение заданного времени задержки воспламенения и выхода на квазистационарный режим работы;
- обеспечение заданной скорости нарастания давления в КС при выходе на режим;
- отсутствие «забросов»  $p_k$  при воспламенении заряда за установленный предел;
- надежность, приемлемость габаритно-массовых характеристик и др. эксплуатационные требования.

Основными задачами при проектировании системы воспламенения являются:

- выбор способа воспламенения;
- выбор конструктивной схемы системы воспламенения и её пространственного размещения в камере сгорания двигателя;
- выбор марки воспламенительного состава;
- определение массовых, геометрических параметров системы воспламенения.

Так как в проектируемом РДТТ используется смесевое твердое топливо, то для воспламенения выбираем пиротехнический состав Б-20СН. Его характеристики приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Характеристики пиротехнического состава

Параметр	Состав Б-20СН
Удельная теплоемкость $c_p$ , Дж/(кг·К)	977
Удельная теплоемкость $c_v$ , Дж/(кг·К)	905
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,2
Коэффициент динамической вязкости, Па·с	0,0001
Молекулярная масса, кг/кмоль	115
Температура продуктов сгорания, К	3676
Полная энтальпия, кДж/кг	3140,1
Относительная массовая концентрация к- фазы	0,562
Единичная скорость горения, м/с	0,011
Показатель степени в законе горения, $\nu$	0,37

Для надёжного воспламенения пиротехнического состава используется навеска дымного ружейного пороха, которая предварительно воспламеняется от пиропатронов. Так как проектируемый РДТТ в ракете 48нбе, то для повышения надёжности запуска используется два пиропатрона. Затем продукты сгорания навески ДРП обеспечивают надёжное зажигание пиротехнического состава.

Потребное давление в КС, создаваемое воспламенителем:

$$p_6 = (0,3 \dots 0,5) \cdot p_k = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ МПа}$$

Ввиду высокого потребного давления в камере сгорания, создаваемого воспламенителем, массой находящегося в камере воздуха можно пренебречь.

Свободный объем камеры сгорания:  $V_{св} = 1,6 \text{ м}^3$

Давление, создаваемое воспламенителем:  $p = \frac{m}{V_{св}} \cdot R_{nc} \cdot T_{nc}$

Газовая постоянная продуктов сгорания:  $R = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{115} = 72,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Тогда масса воспламенителя:  $m = \frac{p \cdot V_{св}}{R \cdot T_{nc}} = \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 1,6}{72,3 \cdot 3288} = 26,9 \text{ кг}$

Объем воспламенительного состава с учетом насыпной плотности:

$$V_{\text{воспл}} = \frac{m}{\rho_{\text{нас}}} = \frac{26,9}{1670} = 0,01612 \text{ м}^3.$$

Диаметр заряда воспламенителя:

$$d = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot V_{\text{воспл}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0,01612}{\pi}} = 0,220 \text{ м} \approx 220 \text{ мм}$$

Длина заряд воспламенителя:  $l = \frac{4 \cdot V_{\text{воспл}}}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,01612}{\pi \cdot (0,220)^2} = 0,424 \text{ м} \approx 424 \text{ мм}$

Более подробно конструкция воспламенителя изображена на листе курсового проекта.

## 1.12 Расчет и проектирование соплового блока

Качество профилирования контура сужающейся, трансзвуковой и расширяющейся частей сопла определяет массово-габаритные и тягово-импульсные характеристики, как двигательной установки, так и ЛА в целом. Поэтому проектирование соплового блока является одной из основных задач создания РДТТ.

### 1.12.1 Профилирование сужающейся части сопла

Профиль утопленной части сопла выполнен поверхностью, образованной вращением эллипса с полуосями  $a$  и  $b$  относительно оси сопла, где

$$a/b = 3/2$$

Для уменьшения эрозии сопла входное сечение выполняется в соответствии с рекомендацией:

$$R_{\text{вх}}/R_{\text{кр}} > 1,25;$$

$$R_{\text{кр}} = 0,160 \text{ м} = 160 \text{ мм}$$

Пусть  $R_{\text{вх}} = 265 \text{ мм}$ , тогда  $R_{\text{вх}}/R_{\text{кр}} = 265/160 = 1,65 > 1,25;$

$$b = R_{\text{вх}} - R_{\text{кр}} = 265 - 160 = 105 \text{ мм};$$

$$a = \frac{3 \cdot b}{2} = \frac{3 \cdot 105}{2} = 157,5 \text{ мм}.$$

### 1.12.2 Профилирование трансзвуковой части сопла

Неоптимальный профиль в районе критического сечения сопла, как и неверный профиль сужающейся части, могут привести к возникновению системы скачков уплотнения, которые приводят к потерям энергии и уменьшению удельного импульса.

Минимальную длину расширяющейся части сопла обеспечивает сверхзвуковой контур с «угловой точкой», в котором сопряжение дозвукового и сверхзвукового участков сопла выполнено с изломом. Но при наличии «угловой точки» возникает скачок уплотнения и унос материала проточного тракта в начальной части расширяющегося участка сопла.

Для профилирования расширяющейся части сопла используется метод Рао.

Из внутрибаллистического расчёта известны следующие геометрические характеристики и заданы параметры ПС:

$$R_{\text{кр}} = \frac{D_{\text{кр}}}{2} = \frac{0,320}{2} = 0,16 \text{ м} = 160 \text{ мм};$$

$$R_a = \frac{D_a}{2} = \frac{2,060}{2} = 1,03 \text{ м} = 1030 \text{ мм};$$

$$k = 1,15.$$

Для профилирования расширяющейся части сопла будем использовать метод огибающих. Зная, что  $R_a/R_{кр} = 6,5$  и, задавшись относительной длиной сопла  $L_{отн} = L/R_{кр} = 12$ , по номограмме определяем углы наклона образующей на входе  $\beta_{вх} = 29^\circ$  и на срезе сопла  $\beta_a = 17^\circ$ .

Далее определяем длину сверхзвуковой части сопла:

$$L = R_{кр} \cdot L_{отн} = 0,16 \cdot 13 = 2,08 \text{ м.}$$

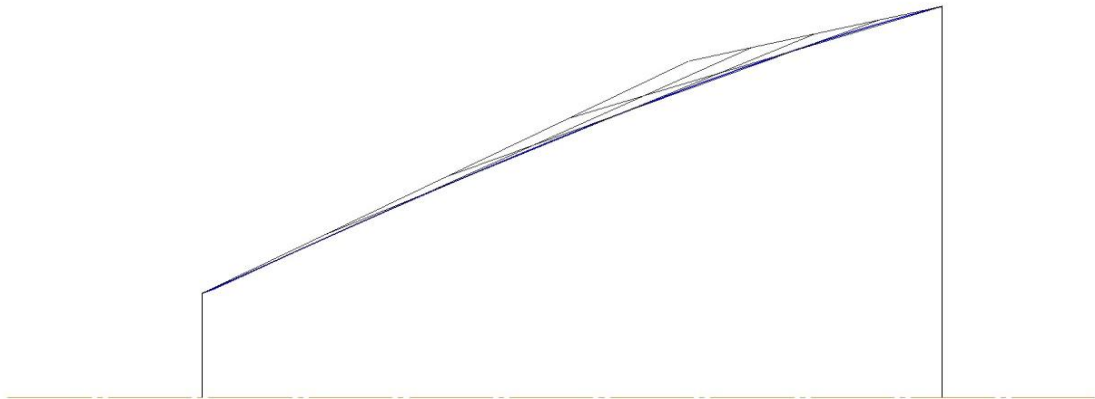


Рис. 1.6 – Профилирование расширяющейся части сопла

### 1.12.3 Требования, предъявляемые к соплу РД

Газодинамический тракт формируют набором композиционных материалов (углепластик, графит, тугоплавкие сплавы, углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ)).

Утопленные сопла имеют следующие основные особенности:

- повышенный эрозионный износ зоны «воротника», входящего в КС;
- выпадение К-фазы в зоне за «воротником»;
- потери удельного импульса составляет порядка 0,6 – 1,2%, в зависимости от степени утопленности сопла.

Основной особенностью РДТТ является наличие К-фазы в продуктах сгорания, поэтому к сопловым блокам предъявляют следующие требования:

– сопловой блок должен выдерживать все факторы рабочего процесса (давление, температуру, воздействие конденсированной фазы, космического излучения и пр.);

– сопловой блок должен удовлетворять эксплуатационным требованиям, т.е. должен обеспечивать возможность управления вектором тяги в полете, удобство транспортировки и пр.

– сопловой блок должен обеспечивать минимальность осевых габаритов двигателя;

– сопловой блок должен быть технологичным в изготовлении.

С целью достижения высоких качеств сопла (малые потери и масса), большой степени расширения и возможности использовать ПУС для регулирования вектором тяги по направлению, выберем из всех известных типов сопловых блоков односопловую конструкцию с центральным расположением относительно оси корпуса. СБ спроектируем утопленным.

Коэффициент утопленности сопла:

$$k_{ym} = \frac{k}{l}$$

где  $l$  – полная длина сопла, а  $k$  – глубина погружения (расстояние от входа в сопло до точки пересечения оси сопла с контуром заднего днища).

Тогда:

$$k_{ym} = \frac{494 \text{ мм}}{2342 \text{ мм}} = 0,21.$$

## **1.13 Расчет тепловых потоков в сопле**

### **1.13.1 Определение конвективных тепловых потоков**

Радиус минимального сечения  $R_{KP} = 160 \text{ мм}$

Степень расширения сопла  $\bar{y}_a = \frac{2060}{320} = 6,43$

Безразмерные координаты осесимметричного контура приведены в таблице 1.8.



Таблица 1.8 – Контур сопла

№	x, мм	y, мм	s, мм	$q(\lambda_a)$
1	0,0	265,0	320,0	0,365
2	52,5	204,5	400,0	0,615
3	110	173,2	466,2	0,855
4	198	160,3	553,2	1,000
5	373	228,6	741,8	0,492
6	548	327,2	939,4	0,239
7	723	419,3	1135,4	0,146
8	898	504,9	1329,1	0,101
9	1037	582,2	1516,3	0,076
10	1248	654,0	1705,2	0,060
11	1423	721,0	1893,2	0,049
12	1598	784,6	2080,8	0,042
13	1773	845,2	2268,8	0,036
14	1948	907,0	2456,7	0,031
15	2123	967,7	2639,3	0,027
16	2348	1030,0	2876,6	0,024

Показатели продуктов сгорания топлива:

- температура торможения  $T_k = 3935 \text{ K}$ ;
- показатель адиабаты  $k = 1,10$  ;
- газовая постоянная  $R = 274,177 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  ;
- давление торможения  $p_0 = 10 \text{ МПа}$  .

Параметры газового потока – одномерное адиабатическое течение идеального газа.

С помощью ГДФ в выбранных расчётных сечениях сопла вычисляются значения давления, температуры, скорости газа, а также числа Маха.

Для расчёта используется программный комплекс MathCAD 15.

Газодинамические функции определяются по формулам:

$$q = \frac{F_{кр}}{F} = \frac{\pi \cdot R_{кр}^2}{\pi \cdot R^2} = \left(\frac{R_{кр}}{R}\right)^2$$

$$q = \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \rightarrow \lambda$$

$$\tau(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$\pi(\lambda) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Давление газа:

$$p = p_k \cdot \pi$$

Температура газа:

$$T_\infty = T_k \cdot \tau$$

Скорость газа:

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_k} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,17}{1,17+1} \cdot 274,177 \cdot 3935} = 1078 \frac{м}{с}$$

$$w = w_{кр} \cdot \lambda$$

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T}$$

Число Маха:

$$M = \frac{w}{a}$$

Результаты представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Газодинамические функции

	$\lambda$	$\pi(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$p, \text{МПа}$	$T_{\infty}, K$	$w, \text{м/с}$	$M$
1	0,230	0,972	0,996	10,42	3919	248,08	0,2213
2	0,414	0,911	0,987	9,749	3882	446,29	0,4002
3	0,624	0,808	0,969	8,645	815	673,45	0,6084
4	1	0,57	0,922	6,103	3627	1078	1
5	1,821	0,126	0,74	1,352	2913	1964	2,032
6	2,149	0,045	0,638	0,486	2511	2318	2,5826
7	2,314	0,024	0,581	0,253	2284	2496	2,8158
8	2,418	0,015	0,542	0,158	2133	2608	3,1534
9	2,486	0,011	0,516	0,112	2030	2681	3,3231
10	2,540	0,0078	0,495	0,084	1946	2740	3,4675
11	2,582	0,0061	0,478	0,066	1880	2785	3,5865
12	2,618	0,0049	0,463	0,053	1822	2824	3,6936
13	2,643	0,0042	0,453	0,045	1782	2851	3,7711
14	2,670	0,0036	0,442	0,038	1737	2880	3,8578
15	2,694	0,0031	0,431	0,032	1698	2906	3,9377
16	2,714	0,0027	0,423	0,028	1664	2927	4,0065

Вычисление температуры и энтальпии восстановления газа на адиабатической стенке в выбранных сечениях сопла.

Температура восстановления газа:

$$T_r = T_{\infty} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} \cdot r \cdot M^2 \right)$$

Энтальпия восстановления газа:

$$H_r = C_{pr} \cdot T_r$$

$C_{pr}$  – удельная теплоемкость газа при температуре восстановления газа на адиабатической стенке.

Результаты представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Температура и энтальпия

	$c_{pr}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$Pr$	$T_r, \text{К}$	$H_r, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
1	1,924	0,505	3932	7,565
2	1,923	0,502	3924	7,550
3	1,922	0,497	3910	7,552
4	1,919	0,487	3869	7,441
5	1,893	0,456	3700	7,104
6	1,872	0,441	3595	6,897
7	1,788	0,429	3529	6,767
8	1,762	0,421	3484	6,676
9	1,747	0,416	3452	6,614
10	1,727	0,411	3425	6,561
11	1,716	0,408	3404	6,520
12	1,708	0,405	3385	6,483
13	1,704	0,403	3372	6,457
14	1,700	0,400	3357	6,426
15	1,694	0,398	3344	6,400
16	1,689	0,397	3333	6,380

Вычисление коэффициентов теплообмена в выбранных сечениях сопла.

Температурный фактор:

$$\bar{T}_w = 0,83$$

Температура стенки:

$$T_w = \bar{T}_w \cdot T_r = 0,83 \cdot T_r$$

$$H_w = c_{pw} \cdot T_r$$

Плотность потока при температуре стенки:

$$\rho_w = \frac{p}{R \cdot T_w}$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{ws} = \frac{\rho_w \cdot w \cdot s}{\mu_w}$$

Число Стантона:

$$St_w = 0,0326 \cdot (Re_{ws})^{-0,2} \cdot (Pr_w)^{-0,6} \cdot \left(\frac{H_w}{H_r}\right)^{0,39} \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot \sqrt[3]{Pr_w} \cdot M^2\right)^{0,11}$$

Коэффициенты, учитывающие отличие реальных процессов от идеальных:

$$k_\epsilon = 0,98$$

$$k_u = 1 + 0,151 \cdot k_s^{0,29} = 1 + 0,151 \cdot 0,2^{0,29} = 1,095$$

$$k_p \approx 1$$

где  $k_\epsilon$  – коэффициент, учитывающий вдув газа в результате разложения ТЗП.

$k_u$  – коэффициент, учитывающий шероховатость стенки.

$k_p$  – коэффициент, учитывающий влияние конденсированных частиц в ПС.

$$St = St_w \cdot k_\epsilon \cdot k_u \cdot k_p$$

Коэффициент теплообмена:

$$\alpha = \rho_w \cdot C_{pw} \cdot w \cdot St$$

Плотность конвективного теплового потока:

$$q_K = \alpha \cdot (T_r - T_w)$$

Результаты представлены в таблицах 1.11 и 1.12.

Таблица 1.11- Коэффициенты теплообмена

	$T_w, K$	$\rho_w, кг/м^3$	$C_{pw}, Дж/кг \cdot K$	$H_w, МДж/кг$	$\mu_w \cdot 10^4, Па \cdot с$	$Re_{ws} \cdot 10^{-6}$	$Pr_w$
1	3263	10,781	1,9128	6,242	0,849	10,08	0,366
2	3257	10,127	1,9127	6,230	0,849	21,31	0,366
3	3245	9,013	1,9125	6,207	0,848	33,35	0,365

Продолжение таблицы 1.11

4	3212	6,43	1,9119	6,140	0,845	45,40	0,365
5	3071	1,487	1,9095	5,863	0,832	26,01	0,365
6	2984	0,552	1,908	5,693	0,824	14,56	0,365
7	2989	0,293	1,9071	5,586	0,819	10,12	0,364
8	2891	0,185	1,9064	5,512	0,817	7,85	0,364
9	2865	0,133	1,906	5,461	0,816	6,918	0,364
10	2843	0,1	1,9056	5,417	0,815	5,735	0,362
11	2826	0,079	1,9053	5,383	0,810	5,164	0,361
12	2810	0,064	1,9050	5,353	0,805	4,697	0,359
13	2799	0,055	1,9048	5,332	0,802	4,466	0,358
14	2786	0,047	1,9046	5,306	0,797	4,150	0,357
15	2775	0,05	1,9044	5,285	0,794	3,871	0,356
16	2767	0,035	1,9043	5,268	0,791	3,731	0,355

Таблица 1.12 – Коэффициенты теплообмена

	$St \cdot 10^3$	$\alpha, \frac{\kappa Bm}{m^2 \cdot K}$	$q_K, \frac{MBm}{m^2}$
1	2,209	11300	7,408
2	1,903	16460	8,074
3	1,743	20220	9,084
4	1,646	21820	10,89
5	1,873	10450	12,32
6	2,130	5197	14,73
7	2,310	3218	14,74
8	2,444	2246	14,35
9	2,602	23,96	13,18
10	2,634	1765	11,70
11	2,705	1377	10,31

12	2,771	1139	8,877
13	2,810	959	7,792
14	2,863	734	6,743
15	2,915	646	5,292
16	2,945	575	3,883

### 1.13.2 Расчёт параметров радиационного теплообмена по длине сопла

Лучистый тепловой поток к поверхности сопла РДТТ складывается из излучения трехатомных газов и конденсированных частиц, находящихся в продуктах сгорания твердого топлива. В данном разделе рассмотрим тепловой поток, обусловленный излучением только газообразных ПС. Излучение газовой фазы ПС ТРТ в первую очередь обусловлено содержанием в них водяных паров и углекислого газа.

Лучистый тепловой поток от газов к стенке определяется по формуле:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_{\text{пс}} \cdot \sigma_0 \cdot (T_{\text{г}}^4 - T_w^4),$$

где  $\varepsilon_{\text{пс}}$  – эффективная интегральная излучательная способность (степень черноты) стенки и продуктов сгорания;

$\varepsilon_w = 0,8$  – эффективная степень черноты стенки;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  – постоянная Стефана-Больцмана;

Парциальные давления:

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 10,514 \text{ бар},$$

$$p_{\text{CO}_2} = 1,37 \text{ бар}.$$

$$d_3 \approx \frac{\pi \cdot d_{\text{входа}}}{4} = \frac{\pi \cdot 0,365}{4} = 0,297 \text{ м}.$$

Длина пути луча:

$$l_3 = 0,9 \cdot d_3 = 0,9 \cdot 0,297 = 0,258 \text{ м};$$

$$p_{H_2O} \cdot l_3 = 10,514 \cdot 0,258 = 2,713;$$

$$p_{CO_2} \cdot l_3 = 1,37 \cdot 0,258 = 0,353.$$

По номограммам определяются интегральные излучательные способности трехатомных молекул и газообразных ПС в целом:

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,105; \varepsilon_{CO_2} = 0,025.$$

Излучательная способность ПС:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{H_2O} \cdot \varepsilon_{CO_2} = 0,105 + 0,025 - 0,105 \cdot 0,025 = 0,127.$$

Среднемассовый диаметр конденсированных частиц ПС алюминизированного смесового топлива, рассчитанный ранее:

$$\bar{d}_{кч} = 5,161 \text{ мкм.}$$

Тогда эффективный коэффициент ослабления луча  $k_{эф}$  в продуктах сгорания и величина  $\varepsilon_{nc}$  при этом равны:

$$k_{эф} = 0,042 \cdot \frac{1}{p_k} \cdot \sqrt{\frac{T_k}{\bar{d}_{кч}^2}} \cdot z_{кф} = 0,042 \cdot \frac{1}{10 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{3935}{(5,161 \cdot 10^{-6})^2}} \cdot 0,326$$

$$= 0,01878,$$

$$\varepsilon_{nc} = 1 - [(1 - \varepsilon_T) \cdot e^{-k_{эф} \cdot l_3}] = 1 - [(1 - 0,127) \cdot e^{-0,01878 \cdot 0,258}] = 0,131.$$

Результаты расчета значений лучистого и конвективного тепловых потоков по длине сопла, а также их суммарное значение приведены в таблице 1.13.

Таблица 1.13 – Значения лучистого и конвективного тепловых потоков

№ сечения	$q_k$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_n$ , МВт/м <sup>2</sup>	$q_{\Sigma}$ , МВт/м <sup>2</sup>
1	7,592	1,708	9,301
2	11,16	1,695	12,86
3	13,95	1,671	15,62
4	15,79	1,603	17,39
5	9,032	1,339	10,37
6	4,943	1,194	6,137



7	3,236	1,109	4,346
8	2,344	1,053	3,397
9	1,888	1,015	2,903
10	1,504	0,984	2,488
11	1,264	0,960	2,224
12	1,081	0,939	2,019
13	0,956	0,924	1,884
14	0,844	0,908	1,752
15	0,749	0,893	1,643
16	0,675	0,883	1,555

### 1.13.3 Расчет потерь в сопловом блоке

Потери удельного импульса в сопловом блоке можно разделить на ряд составляющих:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{\text{рас}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_s + \xi_{\text{ут}},$$

где  $\xi_{\text{рас}}$  – потери из-за рассеяния потока;  $\xi_{\text{тр}}$  – потери на трение;  $\xi_s$  – потери на многофазность потока;  $\xi_{\text{ут}}$  – потери на утопленность соплового блока.

В нашем случае сопло выполнено профилированным, поэтому потери удельного импульса из-за рассеяния потока рассчитываются по формуле:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{рас}} &= \left( 0,906 - 0,029 \cdot \frac{d_a}{d_{\text{кр}}} \right) \cdot \left[ \sin \left( \frac{\beta_{\text{вх}} + 1,1 \cdot \beta_a}{4,1} \right) \right]^2 = \\ &= (0,906 - 0,029 \cdot 6,43) \cdot \left[ \sin \left( \frac{29 + 1,1 \cdot 19}{4,1} \right) \right]^2 = 0,03316. \end{aligned}$$

Потери удельного импульса из-за трения потока рассчитываются по формуле:

$$\xi_{\text{тр}} = 0,00272 \cdot \sqrt{\frac{d_a}{d_{\text{кр}}}} - 1 \cdot \left( \frac{2,62}{k^2 \cdot \bar{T}_{\text{ст}}^{0,33}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{k_s}{d_{\text{кр}}} \right)^{0,3} \right) =$$

$$= 0,00272 \cdot \sqrt{6,43 - 1} \cdot \left( \frac{2,62}{1,18^2 \cdot 0,7^{0,33}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + 3,98 \cdot \left( \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,320} \right)^{0,3} \right) \\ = 0,0113.$$

Здесь  $k_s = 0,4 \text{ мм}$  – параметр шероховатости внутренней поверхности сопла. В точной постановке определение потерь из-за трения производится в процессе комплексного расчета течения ПС в сопле с учетом турбулентного пограничного слоя на стенке сопла, теплообмена и вдува продуктов разложения ТЗП в пограничный слой.

Потери удельного импульса из-за наличия конденсированных ПС со средним размером  $\bar{d}_{кч}$  определяются по выражению:

$$\xi_s = \xi_{s0} \cdot k_1(p_k) \cdot k_2(y_a) \cdot k_3(L_{отн}) = 0,0295 \cdot 0,923 \cdot 0,872 \cdot 1,269 = 0,0301, \\ \text{где } \bar{d}_{кч} = 5,161 \text{ мкм};$$

$$\xi_{s0} = 0,144 \cdot \left( \frac{d_{кр}}{10^{-3}} \right)^{-0,33} \cdot \left( \frac{z_{кф}}{0,3} \right)^2 \cdot (0,162 + 0,168 \cdot \bar{d}_{кч}) = \\ = 0,144 \cdot \left( \frac{0,32}{10^{-3}} \right)^{-0,33} \cdot \left( \frac{0,355}{0,3} \right)^2 \cdot (0,162 + 0,168 \cdot 5,161) = 0,02951$$

(причем значение  $d_{кр}$ ,  $\bar{d}_{кч}$  подставляются соответственно в метрах и мкм,  $z_{кф}$  – относительная массовая концентрация к-фазы в продуктах сгорания. Данная корреляция справедлива, если  $3 \text{ мкм} < \bar{d}_{кч} < 7 \text{ мкм}$ ,  $0 < z_{кф} < 0,5$ );

$k_1(p_k)$  – коэффициент, учитывающий абсолютное значение давления в КС РДТТ и обуславливающий снижение потерь при увеличении давления торможения вследствие ускорения процессов скоростной релаксации потока:

$$k_1(p_k) = 1,047 - 0,0013 \cdot \frac{p_k}{10^5} = 1,047 - 0,0013 \cdot \frac{10 \cdot 10^6}{10^5} = 0,923;$$

$k_2(y_a)$  – коэффициент учета влияния геометрической степени расширения сопла РДТТ, обуславливающего уменьшение двухфазных потерь за счет снижения градиента скорости потока по длине сопла:

$$k_2(y_a) = 1,112 - 0,037 \cdot \frac{d_a}{d_{кр}} = 1,112 - 0,037 \cdot 6,43 = 0,872;$$

$k_3(L_{\text{отн}})$  – коэффициент, учитывающий степень укорочения сопла:

$$k_3(L_{\text{отн}}) = 1,3 - 0,462 \cdot \frac{L_{\text{отн}}}{5,88 \cdot \frac{d_a}{d_{\text{кр}}} - 5,44} = 1,3 - 0,462 \cdot \frac{13,5}{5,88 \cdot 6,5 - 5,44} = 1,2692.$$

При учете прочих потерь можно принять, что потери удельного импульса из-за утолщенности сопла  $\xi_{yt}$  для РДТТ, работающих в высотных условиях, имеют величину порядка 0,001;

Суммарные потери удельного импульса в сопловом блоке составляют:

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{\text{рас}} + \xi_{\text{тр}} + \xi_s + \xi_{yt} = 0,03316 + 0,0113 + 0,0301 + 0,001 = 0,076.$$

Коэффициент потерь сопла:

$$\varphi'_c = 1 - \xi_{\Sigma} = 1 - 0,076 = 0,924.$$

Значение реального удельного импульса:

$$I_{\text{уд}} = I_{\text{уд}}^{\text{теор}} \cdot \varphi'_c = 2858,21 \cdot 0,924 = 2639,86 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

#### 1.14 Заключение конструкторской части

В данной части проекта произведен расчет заряда твердого топлива, определена зависимость изменения площади горения, давления в камере сгорания, скорости горения и тяги от времени работы двигателя, расчет воспламенительного устройства, расчет толщин силовых оболочек двигателя, профилирование соплового блока, расчёт тепловых потоков по длине сопла, а также потерь удельного импульса.

Характеристики стартового РДТТ:

- Тяга двигателя в процессе работы лежит в диапазоне  $P = 200 - 750 \text{ кН}$
- Удельный импульс  $I_y = 2639 \text{ м/с}$
- Время работы  $\tau_p = 35 \text{ с}$
- Коэффициент объемного заполнения камеры сгорания топливом  $\varepsilon_w = 0,78$

– Длина РДТТ  $L = 5,536\text{ м}$

## **2 Технологическая часть**

### **Введение**

В этой части дипломного проекта рассмотрен технологический процесс намотки корпуса ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ). Впоследствии в корпус будет залит заряд из смесового твердого ракетного топлива прикреплен сопловой блок и установлено воспламенительное устройство, что будет являть собой полноценный РДТТ. Корпус предназначен для работы в экстремальных условиях.

Корпус должен обладать минимальной массой для увеличения дальности полёта всего изделия при сохранении надежности его работы. Для изготовления таких корпусов, удовлетворяющих всему спектру требований, создана специальная технология, включающая в себя разнообразные операции.

В данной части представлены описание и назначение детали; технические требования на изготовление детали; данные по материалу детали – марка, состав, свойства; основные операции технологического процесса изготовления детали; расчеты, определяющие конструкторские параметры оболочки корпуса РДТТ.

### **2.1 Выбор метода изготовления**

Наибольшее распространение для изготовления корпусов и раструбов сопел получили следующие методы намотки:

- тканевая спиральная и кольцевая;
- ленточная продольно-поперечная;
- ленточная спиральная;
- спиральная однонаправленными нитями.

Наиболее перспективной на данный момент времени является намотка корпусов совместно с днищами способом спиральной намотки однонаправленными нитями. Это наиболее распространенный и наиболее эффективный способ намотки, позволяющий получить, корпуса, силовые оболочки раструбов сопел, и оболочки с днищами самых разнообразных форм (цилиндрических, конических, сферических, тороидальных, сетчатых и др.) Способ намотки может быть «мокрым» или «сухим». Выбираем способ «мокрой» намотки, при котором структура нитей намоточного композиционно-волокнистого материала формируется в пропиточно-натяжном тракте, а структура композиционного материала в процессе укладки нитей на оправку.

## **2.2 Выбор материалов силовой оболочки**

Прогресс космической техники привел, за последнее время, к значительному уменьшению пассивной массы конструкции. Значительная роль в этих достижениях отводится созданию волокнистых материалов, обладающих таким высоким уровнем прочностных, физических и других свойств, которые практически не достижимы в традиционных металлических сплавах.

Установлено, что стекловолокно в 50...100 раз прочнее массивного стекла. Это объясняется преимущественной ориентацией и суммированием прочности микромолекул в направлении оси волокна и резким снижением возникновения дефектов. Объединяя волокна с помощью связующих, можно получить волокнистые композиционные материалы с уникальными свойствами.

Основными факторами и параметрами, определяющими выходные характеристики корпуса, являются: вид и свойства армирующего материала; вид связующего; технологические параметры намотки (натяжение

армирующего материала, содержание связующего в ленте, вязкость связующего и т.д.); программа намотки; режим термообработки.

На первых этапах развития армирующий материал перерабатывался в ткани различной текстуры и появилась тканевая намотка, в значительной степени использовавшая традиционную технологию, оборудование и т. д. По мере повышения требований к изделиям и изучения причин потерь исходной теоретической прочности осуществлен переход на крученую нить. Для этого потребовалась принципиально новая технология и новое оборудование. По мере развития нитяной программированной намотки наряду с ее преимуществами выявились недостатки, и в практику начала внедряться некрученая нить.

Рост габаритных размеров изделий и в связи с этим рост требований к производительности процесса намотки и поиски путей дальнейшего повышения реализации прочности в изделии привели к использованию некрученого жгута

На современном этапе программированная намотка использует широкую гамму армирующих материалов, получаемых в виде волокон, начиная от наиболее изученного стекловолокна и кончая последними разработками полимерных волокон, таких как терлон, борных волокон, комплексных (составных) нитей и т. д.

Свойства ряда армирующих материалов, получаемых в виде волокон, начиная от наиболее изученного стекловолокна и кончая последними разработками полимерных волокон, нашедших наиболее широкое распространение в процессах изготовления изделий приведены в таблице 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Прочность армирующих материалов

Волокно	$\sigma_{\epsilon}, ГПа$
Органоволокно (Армос)	4
Углеволокно	3
Стекловолокно	6
Бороволокно	3,5

Как видно из таблицы, совершенствование армирующих материалов идет по пути повышения исходной прочности и жесткости при одновременном улучшении показателей по технологичности их изготовления и переработки.

Таблица 2.2 – Физические свойства армирующих материалов

Материал	$\rho, \frac{г}{см^3}$	$\sigma_{\epsilon}^{расч}, ГПа$	$\frac{\sigma_{\epsilon}^{расч}}{\rho}, \frac{км^2}{с^2}$	Температура снижения прочности, °С
Стеклопластик	2,07	1	483	350
Органопластик	1,35	2,35-2,5	1500	250
Углепластик	1,54	0,55	357	200
Боропластик	2,06	0,88	427	500

В настоящее время «Армос» занимает первое место в "семействе арамидов" одновременно по двум основным показателям - механической прочности и устойчивости к открытому огню, не уступая другим арамидам по остальным характеристикам.



Нити армос имеют высокие термические характеристики, их рабочие температуры при длительной эксплуатации - 250-270 °С, а в течение ограниченного времени - 300-330 °С. Очень важный показатель - полное отсутствие усадки до температур - 300-350 °С, а при температуре 400-450 °С усадка не более 3-4 %.

Важная особенность армоса - негорючесть на воздухе и устойчивость к действию открытого пламени - "кислородный индекс" (содержание кислорода в окружающей среде, при котором материал может загореться) составляет 38-43 %; он практически такой же, как для СВМ - волокон, что на 10-15 единиц выше, чем всех других видов арамидных волокон.

Волокна армос могут длительно храниться без изменения свойств, незначительно меняются свойства в мокром состоянии, устойчивы к длительному пребыванию в воде, биостойки.

Очень важной особенностью армоса, является отсутствие хрупкости, что позволяет производить переработку нитей на обычных видах текстильного оборудования по специально уточненным режимам. На базе армоса созданы новые виды текстильных материалов и изделий: сверхпрочные канаты и тросы; грузонесущие ленты; высокопрочные ткани; текстильные структуры для армирования конструкционных композитов и резинотехнических изделий.

Применение армоса наиболее целесообразно в тех видах композитных материалов и изделий, которые должны обладать максимальной прочностью при минимальной массе. В качестве армирующих структур используются нити, жгуты, ленты, ткани. Применяются высокопрочные термореактивные связующие, чаще всего - эпоксидные смолы.

Из вышеперечисленного следует, что корпус будет обладать наиболее высокими характеристиками при использовании в качестве армирующего материала органоволокно (в частности марки Армос-600-А-К).

Специфика «мокрой» намотки, требующая низкой вязкости связующих при невысоких температурах переработки, отсутствия токсичных выделений при температуре переработки, высокой живучести, определяет преимущественное использование некоторых видов связующих. Было выбрано связующее ЭДТ-10 ОСТ 3-4759-80.

Свойства связующего ЭДТ-10:

- вязкость 10-30 с и краевой угол 25 °, при  $t=70$  °С.
- температура полимеризации  $t=95$  °С.
- температура переработки  $t=66$  °С.

### 2.3 Технологический процесс

№	Наименование и содержание перехода	Технологический режим
000	<b>Комплектовочная</b>	
	1. Скомплектовать материалы, детали и сборочные единицы для изготовления корпуса в соответствии с требованиями комплектовочной карты	
	2. Проверить применяемые материалы, детали, сборочные единицы на соответствие требований соответствующих нормативных документов	
005	<b>Раскроечная</b>  оборудование: стол для раскройки  инструмент: линейка 1000 ГОСТ427-75,	

	ножницы РСТРСФСР 145-71	
	1.Выкроить из полотна резины заготовку – барьерный слой	
	2.Выкроить из полотна резины заготовку – теплозащитный слой	
	3.Выкроить из полотна резины заготовку – герметизирующий слой	
	4.Раскроить из перкалевого полотна секторов на переднее днище	
	5. Раскроить из полотна стеклоткани секторов на переднее днище	
010	<b>Установочная (ТЗП)</b>  оборудование: оправка  инструмент: ключ гаечный	
	1.Установить на оправку шляпу ТЗП для переднего днища	
	2. Установить передний фланцедержатель на фланец шляпы ТЗП	
	3. Установить задний фланцедержатель	
	4. Затянуть фланцедержатели гайками	
015	<b>Установочная (оправка)</b>	

	оборудование: станок КУ–421М, шпулярник КУ421.71.00	
	2. Установить оправку на станок	
	3. Подготовить системы контроля и регулирования технологических параметров намотки к работе	
	4. Установить на станок шпулярник заправленный стеклонитью  (ВМПС 6-7 2х4х2-78 ТУ-6-48-90-92)	
	5. Заправить нитетракт станка стеклонитью	
	6. Залить связующее (ЭДТ-10 ОСТ 3-4759-80) в пропиточную ванну	Температура связующего $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$
020	<b>Обжимная</b>  оборудование: станок КУ–421М, шпулярник КУ421.71.00  инструмент: нож П-22438, ножницы РСТРСФСР 145-71, игла швейная	
	1. Уложить на цилиндрическую часть оправки с нахлестом (100-200 мм) на шляпу ТЗП переднего днища один слой полиэтиленовой пленки. Закрепить пленку любым материалом	
	2. Намотать обжимной спиральный слой из пропитанных стеклонитей	Натяжение ленты ( $130 \pm 30$ ) кгс

	3. По окончании намотки обжимного слоя перейти по произвольной винтовой линии на цилиндрическую часть шляпы ТЗП переднего днища, намотать кольцевые витки. Обрезать ленту	Намотать 15-20 кольцевых витков на ручном режиме
	4. Срезать с цилиндрической части оправки обжимной слой на расстоянии 5-20 мм от кольцевой подмотки на шляпе переднего днища	
	5. Удалить с цилиндрической части оправки полиэтиленовую пленку	
	6. Торцевать ТКЭТ (ткань капроновая эластичная техническая) шляпы ТЗП переднего днища по всему периметру оставляя припуск ( $10 \pm 1$ ) мм	
	7. Сшить припуски ТКЭТ шляпы ТЗП переднего днища между собой по окружности, подтягивая кромки ткани	Сшить встык, вручную, швом «елочка» с шагом 5-10 мм. Ширина стежка 5-15 мм
	8. Снять с поверхности шляпы ТЗП переднего днища остатки спирального обжимного слоя, кольцевую подмотку и полиэтиленовую пленку	
025	<b>Выкладочная</b>	

	инструмент: ветошь х/б, кисть фоллейтц	
	1.Обезжирить заготовки подготовленные по 005 п.п.1-3 из резины  (51-1615, 54-67) ацетоном (ГОСТ 2768-84)	
	2. Нанести на заготовку для барьерного слоя, раскроенную по 005 п.1, клей (К-153) с одной стороны	Наносить одним слоем
	3. Сушить	На воздухе при $t=20\pm5$ °С 15 мин.
	4.Уложить на цилиндрическую часть оправки заготовку для барьерного слоя	Укладку производить с максимальным натяжением, создаваемым вручную, исключая провисания полотна. Кольцевой нахлест 15-20 мм.
	5.Обезжирить поверхность барьерного слоя ацетоном	
	6. Нанести на заготовку для теплозащитного слоя, раскроенную по 005 п.2, клей с одной стороны	Наносить одним слоем
	7. Сушить	На воздухе при $t=20\pm5$ °С 15 мин

	8. Уложить на цилиндрическую часть оправки заготовку для теплозащитного слоя	Укладку производить с максимальным натяжением, создаваемым вручную, исключая провисания полотна. Кольцевой нахлест 15-20 мм. Сместить нахлест на 50-150 мм относительно нахлеста барьерного слоя.
	9. Обезжирить поверхность теплозащитного слоя ацетоном	
	10. Нанести на заготовку для герметизирующего слоя, раскроенную по 005 п.2, клей с одной стороны	Наносить одним слоем
	11. Сушить	На воздухе $t=20\pm5$ °С 15 мин
	12. Уложить на цилиндрическую часть оправки заготовку для герметизирующего слоя	Укладку производить с максимальным натяжением, создаваемым вручную, исключая провисания полотна.

		Кольцевой нахлест 15-20 мм. Сместить нахлест на 50-150 мм относительно нахлеста теплозащитного слоя
030	<b>Защитная</b>  инструмент: ветошь х/б, кисть фоллейтц, шаблон, мелки, ножницы	
	1. Обезжирить заготовки полос резины	
	2. Обезжирить поверхность «уса» фланца переднего днища	
	3. Нанести на заготовку с одной стороны клей	Наносить одним слоем
	4. Сушить	На воздухе $t=20\pm 5$ °С 15 мин
	5. Уложить полосы резины на «ус» фланца переднего днища	Кольцевой нахлест 15-20 мм. Укладку производить с натяжением обеспечив плотное облегание «уса» фланца
035	<b>Укладочная (ткани)</b>	



	инструмент: ветошь х/б, кисть фоллейтц	
	1. Разметить рулон ткани	Ширина линии разметки 2 мм 4 полосы
	2. Выкроить 4 полосы ткани	4 полосы
	3. Обезжирить поверхность ТЗП по местам укладки ткани	
	4. Произвести разметку базовых плоскостей корпуса липкой лентой	
	5. Нанести клей по местам укладки ткани	Наносить одним слоем
	6. Сушить	На воздухе $t=20\pm 5$ °С 15 мин
	7. Уложить полосы ткани на связующее	Контролировать размер «а»
	8. Удалить липкую ленту	
040	<b>Подготовительная (общие требования к намотке)</b>  оборудование: психометр аспирационный	
	1. Все работы по намотке оболочки производить при температуре воздуха в цехе 17-35 °С и относительной влажности не более 80%	

	<p>2. В процессе намотки силовой оболочки производить непрерывный автоматический контроль и по показаниям вторичного прибора регулирование:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- натяжения армирующих нитей</li> <li>- температуры дна пропиточной ванны</li> <li>- температуры подпрессовочного ролика</li> </ul>	
	<p>3. При намотке каждого слоя допускается:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- производить вырезку узлов жгута после закрепления ленты последующими витками (не менее трех)</li> <li>- одновременный обрыв не более 50% количества жгутов в ленте с последующей их подвязкой</li> <li>- непропитанные участки ленты суммарной длиной не более 4 м любой ширины в пределах ширины ленты</li> <li>- местное увеличение содержания связующего в ленте (наплывы) на участке не более 4 м любой ширины ленты</li> <li>- зазоры в стыках лент спиральных слоев общей шириной не более 100 мм на каждый слой, при этом единичные не более 20 мм</li> <li>- защипы резины при намотке первого и второго тангенсальных слоев (количество и</li> </ul>	

	<p>размеры защипов не регламентируются)</p> <p>- расколы зазоры между прядями в ленте шириной не более 5 мм, единичные не более 10 мм в количестве не более 10 шт на каждый слой</p> <p>- обрезка части ленты первого витка спирального слоя в случае жгутования ее после закрепления</p> <p>- путанка жгутов участками длиной не более 140 мм, шириной не более 10 мм в количестве не более 10 шт на все слои</p>	
	<p>4. При намотке каждого слоя не допускается полный обрыв ленты и механическое повреждение ранее намотанных слоев</p>	
	<p>5. В случае необходимости допускается размотка слоев с последующей их намоткой. При вынужденной размотке слоев допускается пушение поверхности оболочки</p>	
	<p>6. Контроль ширины ленты при намотке тангенциальных слоев производить на расстоянии 50-60 мм от нитераскладчика</p>	
	<p>7. Время намотки силовой оболочки должно быть не более 6 суток</p> <p>При этом допускается время перерывов:</p> <p>- между окончанием намотки каждого</p>	



	Армос-600-А-К и заправить им нитетракт станка	заправки
	4. Залить связующее ЭДТ-10 ОСТ 3-4759-80 в пропиточную ванну	Температура связующего $t=75\pm5^{\circ}\text{C}$
	5. Намотать первый и второй тангенциальные слои	Перед началом намотки закрепить ровинг за вал оправки. См. общие требования к намотке силовой оболочки. Натяг 90 Н
	6. Контролировать деформацию резины и сдвиг радиоткани.  Не допускаются складки пузыри резины более 5 мм и сдвиги радиоткани более 2 мм.  Допускается ремонт резинового покрытия (устранить дефекты проколом и ввести клей)	
	7. Продолжить намотку до 14 слоя с подпрессовкой	См. общие требования к намотке силовой оболочки.  Производить подпрессовку. Натяг 180 Н

	8. Слить связующее из пропиточной ванны станка	
	9. Уложить слой непропитанной стеклоткани (ТТ-I ВМ) на цилиндрическую часть и на переднее днище	На переднее днище уложить «лепестки» раскроенные в соответствии с 005 п.10
	10. Установить на шпулярник бобины с стеклонитью и заправить ими нитетракт станка	14 бобин.  См. схему заправки
	11. Намотать дренажные слои	Натяг 180 Н
	12. Термостатировать оболочку	См. график. Точность поддержания температуры $t \pm 5^{\circ}\text{C}$
	13. Снять дренажные слои	
	14. Установить приставки	
	15. Контролировать расстояние между торцами фланцедержателей	Данные занести в технологический паспорт
	16. Нанести на цилиндрическую часть приставки слои фторопластовой суспензии	Наносить в два слоя с выдержкой каждого слоя 20-30

		мин. Не допускается попадание суспензии на силовую оболочку
	17. Намотать на цилиндрическую часть приставки фторопластовую пленку	Намотать с нахлестом 50 % ширины ленты. Закрепить конец пленки липкой лентой
	18. Уложить обезжиренную заготовку из резины (ИРП-1310-1 ТУ105233-88) и ремень-клин	Склеивание нахлестов (15-20)мм и приклейку ремня к уложенной резине производить ацетоном
050	<b>Термическая (первая термообработка)</b>  оборудование: кран мостовой, мобильная подставка, печь ЕК 10000/500,  вентилятор ДН-13	
	1. Установить полуфабрикат на подставку	
	2. Закатить подставку в печь	
	3. Термообработать	См. график. Точность поддержания

		температуры $t \pm 5^\circ \text{C}$
	4. Выкатить подставку с изделием	
	5. Снять изделие с подставки	
055	<b>Подготовительная (шпангоут)</b>	
	1. Очистить посадочные и стыкуемые поверхности рам, держателя и переходника от заусенцев и остатков связующего	
	2. Обезжирить наружные поверхности рам и торец ацетоном	
	3. Нанести на обезжиренные поверхности суспензию (ТУ 6-05-1246-81)	
060	<b>Установочная (шпангоут)</b>	
	1. Установить на вал со стороны переднего днища в качестве переходника держатель, закрепить его на валу (4 болта М12)	
	2. Установить на держатель переходник, закрепить его на держателе  (6 болтов М16)	
	3. Закрепить на переходнике раму	
	4. Установить на задний фланец держатель бандаж и закрепить  (12 болтов М16)	



	5. Придвинуть бандажи к силовой оболочке до получения равномерно зазора между резиной, уложенной на силовую оболочку, и краем бандажа	Зазор $0,5 \div 1,5$ мм
	6. Зафиксировать положение бандажа рамы передней	
	7. Намотать на поверхности бандажей рам фторопластовую пленку любой толщины	нахлест $\sim 50\%$
	8. Обернуть детали фторопластовой пленкой или обработать фторопластовой суспензией	$2 \div 3$ слоя
	9. Установить на раму вплотную к клиньям детали и острыми скосами наружу	
	10. Обезжирить резину с помощью нефраса (ТУ38.401-67-108-92)	выдержка не менее 15 минут и не более 2 ч
	11. Обезжирить посадочную поверхность шпангоута ацетоном	
	12. Нанести на посадочную поверхность шпангоута связующее	
065	<b>Подготовительная</b>	
	1. Произвести торцовку рулонов ткани	
	2. Обезжирить резину, уложенную на силовую оболочку и клинья нефрасом	выдержка не менее 15 минут и не более 2 ч

	3. Нанести на поверхность шпангоута связующее	
070	<b>Намоточная (узел стыка)</b>	
	1.Намотать узел стыка (ПУС)	
	2. Намотать «утолщение» (органоткань ТТ - СВМ пропитанная связующим ЭДГ-М)	
	<p>3. Намотать технологическую рубашку по технологии:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- намотать на цилиндрическую часть изделия слой перфорированной фторопластовой пленки с шагом 50% от ширины ленты</li> <li>- уложить на цилиндрическую часть изделия отрезок ленты холоднокатаной из пружинной стали, и закрепить любым материалом. Не допускается смещение и гофрирование ленты, для этого:</li> <li>- намотать двойной кольцевой слой из непропитанной стеклонити</li> <li>- намотать двойной кольцевой слой из пропитанной стеклоткани</li> </ul>	
	4. Обезжирить резину, выступающую из под ткани	выдержка не менее 15 мин и не более 2 ч
075	<b>Термическая (вторая термообработка)</b>	

	оборудование: кран мостовой, мобильная подставка, печь ЕК 10000/500,  вентилятор ДН-13	
	1. Установить полуфабрикат на подставку	
	2. Закатить подставку в печь	
	3. Термообработать	См. график. Точность  поддержания температуры $t \pm 5^{\circ}\text{C}$
	4. Выкатить подставку с изделием	
	5. Снять изделие с подставки	
080	<b>Слесарная (удаление вала)</b>  оборудование: кран мостовой, гидросъемник, опорный каток  инструменты: ключ гаечный	
	1. Снять приставки для намотки узлов стыка	Снять 2 гайки и 2 приставки
	2. Снять фланцедержатели	Снять 4 гайки и 2 фланцедержателя
	3. Установить оправку с валом на гидросъемник	
	4. Присоединить тянущее устройство	

	гидросъемника к валу	
	5. Вытащить вал придерживая его опорным катком	Усилие 7-10 кН
085	<b>Слесарная (удаление оправки)</b>  оборудование: подставка цеховая, заглушки, смесители, отводящие и  подводящие рукава, манометр, термометр, паровая  установка, компрессор	
	1. Установить заготовку корпуса с оправкой на подставку	
	2. Установить на фланцы изделия заглушки со смесителями	
	3. Присоединить отводящие и подводящие рукава	
	4. Присоединить регистрирующие приборы	
	5. Подать паровоздушную смесь	$t \text{ пара } 115^{\circ}\text{C}$ , $p=2..3$ атм-5..3 ч
	6. Отключить пар, воздух, приборы	
	7. Отсоединить рукава и заглушки	
	8. Произвести охлаждение корпуса	На воздухе $t=20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 2 ч

	9. Промыть корпус	
	10. Просушить корпус	
	11. Контроль внутренней поверхности корпуса и поверхности фланцев	Отклонения фиксировать в технологическом паспорте
090	<b>Токарная</b>  оборудование: кран мостовой, приспособление (вал с фланцами),  токарный станок  инструменты: резец 20x12 ВК8 ГОСТ 18877-73	
	1. Установить приспособление в заготовку	
	2. Установить приспособление на станок	Контролировать торцевое (не более 0,3 мм) и радиальное (не более 0,5 мм) биения
	3. Отрезать припуск и подрезать торец узла стыка переднего днища	$n=10 \text{ об/мин}$ $S=0,7 \text{ мм/об}$  $V=62,5 \text{ м/мин}$ $t=5 \text{ мм}$ .  Контролировать

		перпендикулярность торцов главной оси изделия
095	<b>Сверлильная</b>  оборудование: Кран мостовой, агрегатный станок, подставка цеховая  инструменты: сверло ц/хв. 20,0 мм Р6М5 ГОСТ 10903-77	
	1. Установить приспособление с заготовкой на станок	
	2. Настроить станок	
	3. Сверлить радиальное глухое отверстие диаметром 20 мм на расстоянии 42 мм от торца ПУС	$n=300 \text{ об/мин}$ $S=0,3$ мм/об  $V=20,41 \text{ м/мин}$ $t=20$ мм
	4. Повторить операции 3 и 4	24 отверстий
	5. Снять приспособление со станка и установить на подставку	
100	<b>Гидроиспытательная</b>  оборудование: стенд для гидроиспытаний	
	1. Протереть насухо поверхность оболочки	
	2. Установить заглушку на задний фланец	Вентиль на заглушке должен

		быть закрыт
	3. Установить оболочку на стенд	
	4. Подключить к заднему фланцу магистраль для подачи воды в оболочку	
	5. Заполнить оболочку водой	
	6. Закрыть вентиль на заглушке	
	7. Довести давление воды до установленного значения	$p=12\text{кг/см}^2$
	8. Выдержать оболочку под давлением в течение установленного времени	$t=10\text{мин}$  Не допускаются потение стенок, капеж и струйки воды с наружных поверхностей, деформация стенок оболочки
	9. Снять оболочку со стенда и установить на подставку	
105	<b>Сушка</b>	
	1. Просушить оболочку на воздухе в течении 24 ч.	$t=20\pm 5^\circ\text{C}$
110	<b>Дефектоскопия</b>	
115	<b>Контроль размеров</b>	

## 2.4 Расчет режимов резания

При назначении элементов режимов резания учитывают характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования.

Элементы режима резания обычно устанавливают в следующем порядке:

1. глубина резания ( $t$ ): при черновой (предварительной) обработке назначают по возможности максимальную глубину резания –  $t$ , равную всему припуску на обработку или большей части его. При чистовой (окончательной) обработке в зависимости от требований точности размеров и шероховатости обработанной поверхности;

2. подача ( $S$ ): при черновой обработке выбирают максимально возможную подачу, исходя из жёсткости и прочности системы СПИД, мощности привода станка, прочности твёрдосплавной пластинки и других ограничивающих факторов. При чистовой обработке – в зависимости от требуемой степени точности и шероховатости обработанной поверхности;

3. скорость резания ( $V$ ) – рассчитывают по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки, которые имеют общий вид.

Рассмотрим расчет режима резания для токарной операции. Производительность обработки [шт./мин.] определяется числом деталей, изготовленных в единицу времени:  $Q=1/T$ , время  $T$  складывается из основного, подготовительного, заключительного.

Подрезка торца цилиндрической детали  $\varnothing 2000$  мм.. Режущий инструмент - резец проходной отогнутый с пластинкой из инструментальной стали ВК8. Работа без охлаждения. Глубину резания принимаем равной  $t=5$  мм. По таблицам справочника технолога-машиностроителя определяем подачу  $S_o=0,7$  мм/об.

Определяем скорость резания:



$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} = \frac{165}{60^{0,33} \cdot 5^{0,2} \cdot 0,3^{0,88}} = 89,34 \frac{\text{м}}{\text{мин}},$$

где  $T$  - заданное значение стойкости в минутах ( $T = 60$  мин);

$C_v, m, x_v, y_v, k_v$  - определяются из таблиц справочника технолога-машиностроителя.

Вводим поправочные коэффициенты на скорость резания. Марка обрабатываемого материала  $K_{mat}=1$ . Период стойкости резца  $K_v=1,1$ . Наличие охлаждения  $K_o=1$ . Тогда

$$V = V \cdot K_m \cdot K_v \cdot K_o = 89,34 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1 = 98,27 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

Определяем частоту вращения шпинделя по установленной скорости резания:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 98,27}{3,14 \cdot 324} = 96,59 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

По паспорту станка принимаем ближайшее значение  $n = 100 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

При этом фактическая скорость резания:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 324 \cdot 100}{1000} = 101,7 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

Расчет режима сверления отверстия  $\varnothing 20$ . Режущий инструмент – сверло Р6М5 ГОСТ 10903-77. Работа без охлаждения. Глубину резания принимаем равной  $t=5$  мм. По таблицам справочника технолога-машиностроителя определяем подачу  $S_o=0,3$  мм/об,  $n=300$  об/мин.

Скорость резания:

$$V = \frac{C_v \cdot d^{z_v}}{T^m \cdot S^{y_v}} = \frac{2,8 \cdot 20^{0,34}}{8^{0,27} \cdot 0,1^{0,7}} = 22,17 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

$T$  - заданное значение стойкости в минутах (принимаем  $T = 8$  мин);

$C_v, m, y_v, z_v$  - определяются из таблиц справочника технолога-машиностроителя.

Определяем частоту вращения шпинделя по установленной скорости резания:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 22,17}{3,14 \cdot 20} = 353,03 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

По паспорту станка принимаем ближайшее значение  $n = 360 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

При этом фактическая скорость резания:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 20 \cdot 360}{1000} = 22,6 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

## 2.5 Приспособление

Приспособление, рассматриваемое в данном курсовом проекте – оправка

Оправка является приспособлением определяющим, конфигурацию и геометрические размеры изделия.

Необходимость создания изделий особой конфигурации, например оболочек совместно с днищами, методами «мокрой» программированной намотки привела к созданию сложных конструкций оправок.

Возникает необходимость решения целого комплекса проблем: воспроизведения сложного профиля днищ, обеспечения жесткости и прочности, достаточных для сохранения геометрических размеров в условиях воздействия собственного веса, усилий, возникающих при намотке и полимеризации композиционного материала силовой оболочки.

Присоединительные узлы корпусов – шпангоуты, поэтому требуется изыскание рациональных конструкторских решений для узлов оправки, обеспечивающих намотку этих элементов корпуса.

По конструктивным особенностям, оправки можно подразделить на разборные и не разборные. Все виды оправок должны обеспечивать возможность извлечения оправки, геометрические размеры изделия, а также целостность и чистоту внутренних поверхностей изделия, технологичность и

низкую трудоемкость ее изготовления, оправка должна иметь низкую стоимость.

В качестве оправки выбрана песчано-полимерная оправка, изготовление и удаление которой значительно менее трудоемка, чем для других видов оправок.

Сборка оправки:

- промазать вал в области установки деталей переднего, заднего днищ и цилиндрической части и стыкуемые поверхности самих деталей клеем К-153-ХЗ (детали отдельно формуются и термообрабатываются);

- надеть заготовки переднего, заднего днищ и цилиндрической части на вал и выдержать 24 часа;

- установить оправку с валом на токарный станок и обработать её поверхность.

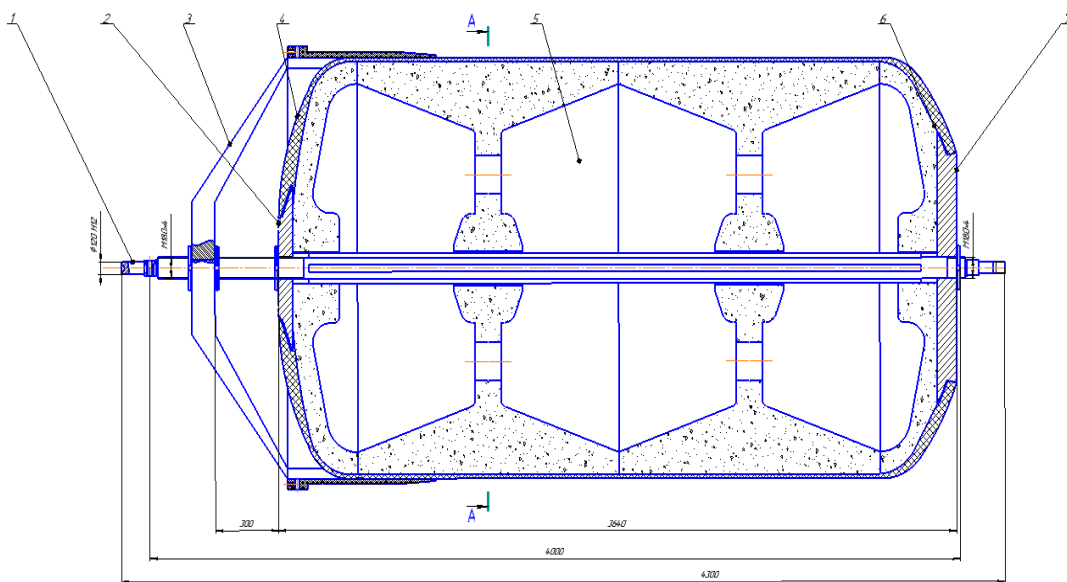


Рис. 2.1 – Технологическая оправка:

1 – вал; 2 – передний фланец; 3 – приставка для подмотки шпангоута; 4 – переднее днище; 5 – цилиндрическая часть; 6 – заднее днище; 7 – задний фланец.

## **2.6 Заключение технологической части**

В рамках дипломного проектирования была разработана технология изготовления корпуса РДТТ, были подобраны материалы корпуса, отвечающие технологическим и конструкторским требованиям, предъявляемым к изделию. Была спроектирована оправка для намотки корпуса, которая сочетает в себе оптимальные характеристики: качества, экономики, и трудоемкости изготовления и удаления оправки.

### **3 Охрана труда и экология**

#### **3.1 Анализ вредных и опасных факторов**

На всех стадиях жизненного цикла двигателя (разработки (испытания), производства и утилизации) человек часто подвергается опасным воздействиям со стороны РДТТ.

Испытание РДТТ проводится в специально оборудованном боксе, который включает в себя: стапельное оборудование, на которое производится установка двигателя, системы управления, измерения, пожаротушения и т.д. В ходе самого испытания человек не находится непосредственно рядом с двигателем, но при всем том существуют вредные для жизни и деятельности человека факторы:

1. Наличие высокотемпературной выхлопной струи продуктов сгорания, т.е. наличие открытого источника огня с температурой свыше 1000°C.
2. Высокотемпературный рабочий процесс горения, при котором отдельные узлы двигателя (камеры сгорания) нагреваются в процессе испытания до высоких температур.
3. Высокий уровень шума, который создается вследствие турбулентного истечения продуктов сгорания из сопла двигателя. Двигатель современного летательного аппарата создает уровень шума, превышающий порог болевого ощущения. Уровень шума в значительной степени зависит от скорости истечения выхлопной струи продуктов сгорания.
4. Наличие вибраций двигателя, его отдельных узлов и испытательного стенда (установки), возникающих при пульсации газоздушного потока и из-за неуравновешенности вращающихся масс отдельных узлов двигателя. Вибрации могут оказывать неблагоприятные

воздействия на персонал, обслуживающий испытательный стенд и на строительные конструкции испытательной станции.

5. Опасные и вредные для обслуживающего персонала и окружающей среды агрессивные и токсичные вещества, которые в результате аварий, нарушения герметизации способны загрязнять почвы и водоемы.

При разработке генерального плана по размещению испытательных станций, лабораторий и отдельных испытательных установок необходимо оставлять между ними и жилыми и общественными зданиями санитарно-защитную зону. Величина этой зоны определяется в зависимости от предельно допустимых значений уровня звукового давления и спектра шума у жилых и общественных зданий и уровня шума на испытательных станциях, лабораториях и установках. Выбранная санитарно-защитная зона с учетом рассеяния вредных веществ в атмосферном воздухе согласовывается с органами Государственной санитарной инспекции. Требования к предприятиям перечислены в постановлении Главного государственного санитарного врача РФ от 10 мая 2017г. №62 "Об утверждении санитарных правил СП 2.2.1.3471-17 "Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению безопасности персонала предприятий и населения прилегающих территорий при испытании и утилизации зарядов ракетных двигателей на твердом топливе методом сжигания".

Утилизация является заключительным этапом жизненного цикла любого образца военной техники, если оно не использовано по прямому назначению, выработало гарантийные ресурсы и сроки или морально устарело.

Основные способы утилизации РДТТ:

- подрыв. Государственным ракетным центром "КБ им.Макеева" (ГРЦ, г.Миасс) была разработана ликвидация ракет РСМ-52 методом подрыва после запуска с подводной лодки. Подрыв и последующее сжигание 40 ракет реализовано в 1995-1998 годах над отчужденными морскими акваториями;

- открытое сжигание. Уничтожение сжиганием на открытом стенде проводится по отработанной методике испытаний РДТТ. Сжигание ступеней проводится в горизонтальном или вертикальном положении двигателя (соплом вверх или вниз). ГРЦ совместно с ФНПЦ "Алтай" в кооперации с "Московским институтом теплотехники" провели в 1998-2000 годах экспериментальные сжигания двигателей первой ступени ракет РСМ-52 без сопловых блоков и без передней крышки. Работа проводилась в рамках российско-американской программы создания базы ликвидации твёрдотопливных ракет России. Программа не проходила экологической экспертизы, противоречит принципам безопасности, но во многом определила существующие подходы к подготовке и проведению массовой ликвидации ракет РСМ-52 на промышленных предприятиях;

- закрытое сжигание. Для малогабаритных изделий НПО "Искра" (г.Пермь) создало стационарную установку локализованного сжигания. Установка обеспечивает очистку вредных выбросов в атмосферу 95-95,5% при уничтожении малогабаритных РДТТ массой до 20 кг и секундным расходом до 15 кг/с. Производительность установки сжигания 10-15 т топлива в год. По заверениям разработчиков установка обеспечивает полный контроль, очистку и нейтрализацию продуктов сгорания и отходов, а также соблюдение природоохранных требований. Проект установки прошел экспертизу в Пермском областном комитете природы;

- резка стружки и переработка. Относительно низкие механические характеристики (начальный модуль 15-30 кг/см<sup>2</sup> и разрывная прочность 3-5 кг/см<sup>2</sup> при деформации 20-50%) позволяют применять резку топлива. Опасность загорания подавляется присутствием воды.

Исторически сложилось так, что в настоящее время одним из основных способов утилизации крупногабаритных зарядов РДТТ являются так называемые статические сжигания РДТТ на открытом стенде в штатной

комплектации без соплового блока. При этом чтобы уменьшить выбросы продуктов сгорания в атмосферу, используется водная экологическая защита, обеспечивающая орошение водой струи продуктов сгорания твердого топлива и осаждение части вредных компонентов в рабочей зоне стенда.

Предельно допустимые концентрации вредных веществ и соединений представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — ПДК (мг/м³) компонентов продуктов сгорания

Вещество	Химическая формула	ПДК в рабочей зоне	ПДК в воздухе населенных мест	
			максимальная разовая	Среднесуточная
Пыль	—	—	0,5	0,05
Сажа	C	—	0,15	0,05
Углерода оксид	CO	20	3,0	1,0
Бензин	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	100	5,0	1,5
Бензапирен	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0,00015	—	0,000001
Формальдегид	HCHO	0,05	0,035	0,003
Азота диоксид	NO <sub>2</sub>	5	0,085	0,085
Серы диоксид	SO <sub>2</sub>	10	0,5	0,05
Водород хлористый	HCl	5	0,2	0,2
Кислота серная	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1	0,3	0,1
Свинец и его соединения	—	—	—	0,0007

### 3.2 Анализ вредных и опасных факторов, возникающих при работе с эпоксидным связующим

При изготовлении корпуса данного ракетного двигателя используется метод «мокрой» намотки, при котором полотно композиционного материала силовой оболочки создаётся за счёт пропитки нитей армирующего материала жидким связующим. В данном случае используется эпоксидное связующее ЭДТ-10.

Подготовка оборудования для намотки, наблюдение за процессом требует непосредственного участия человека. Поскольку связующее содержит вредные для человека вещества и, как и любая жидкость, обладает испаряемостью,



необходимо соблюдать правила работы с данным веществом. Данные правила перечислены в постановлении министерства труда и социального развития РФ от 14 августа 2002г. «Об утверждении межотраслевых правил по охране труда при работе с эпоксидными смолами и материалами на их основе».

В данном документе перечислены: общие требования; требования безопасной организации работ к производственным (технологическим) процессам; требования к производственным помещениям; требования к производственному оборудованию, его размещению и организации рабочих мест; требования к исходным материалам, заготовкам и полуфабрикатам, а также способам хранения и транспортирования исходных материалов, заготовок, полуфабрикатов, готовой продукции и отходов производства; требования к применению средств защиты работников; режимы труда и отдыха.

Вредные вещества, которые могут выделяться в воздух, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Перечень основных вредных веществ, которые могут выделяться в воздух рабочей зоны из эпоксидных смол и композиционных материалов на различных этапах синтеза и переработки

№ п/п	Наименование вредного вещества	Величин а ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Преимуществен ное агрегатное состояние в условиях производства	Класс опасно сти	Особеннос ти действия на организм	Метод опреде ления (МУ, ТУ)
1.	Эпихлоргидрин+	1,0	п	2	А	МУ N 2715- 83

Продолжение таблицы 3.2

2.	Толуол	50,0	п	3		МУ N 1986- 79
3.	Дифенилолпропа н	5,0	а	3		МУ N 1665- 77
4.	Фенол+	0,3	п	2		МУ N 1461- 76
5.	Анилин+	0,1	п	2		МУ N 1647- 77
6.	Формальдегид+	0,5	п	2	О, А	МУ N 1696- 77, 1986- 79
7.	Спирт бутиловый	10,0	п	3		МУ N 2802- 83
8.	Этилендиамин	2,0	п	2		МУ N 2881- 83

Условные обозначения: п - пары или газы; а - аэрозоль; п+а - смесь паров и аэрозоля; + - требуется специальная защита кожи и глаз; О - вещества с остронаправленным механизмом действия, требующие автоматического

контроля за их содержанием в воздухе; А - вещества, способные вызывать аллергические заболевания в производственных условиях.

Предельно допустимые концентрации летучих элементов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Официально утвержденные предельно допустимые концентрации летучих продуктов наиболее распространенных эпоксидных смол и композиций

№ п/п	Марка смолы или композиции	Величина ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Преимуществен ное агрегатное состояние в условиях производства	Класс опаснос ти	Особеннос ти действия на организм
1.	Эпоксидиановые смолы ЭД-20 (ЭД- 5), Э-40 эпокситрифеноль ная (по эпихлоргидрину)	1,0	п	II	А
2.	Эпоксидные смолы УП-666-1, УП-666-2, УП- 666-3, УП-671, УП-671-Д, УП- 677, УП-680, УП- 682 (по эпихлоргидрину)	0,5	п	II	А
3.	Эпоксидные смолы УП-650	0,3	п+а	II	А

Продолжение таблицы 3.3

4.	Эпоксидные смолы УП-2124, Э-181, ДЭГ-1 (по эпихлоргидрину)	0,2	п	II	А
5.	Эпоксидная смола ЭА (по эпихлоргидрину)	0,1	п	II	А
6.	Полиоксипропиленэпоксиды ТЭ-1500, ТЭ-750 (по ацетону)	100,0	п	IV	
7.	Полиоксипропиленэпоксиды ДЭ-1000, ДЭ-500 (по ацетону)	100,0	п	IV	
8.	Эпоксидные клеи УП-5-207, УП-5-207-III, УП-5-240 (по эпихлоргидрину)	1,0	п	II	А
9.	Эпоксидный клей УП-5-253 (по эпихлоргидрину)	0,5	п	II	А

Условные обозначения: п - пары и/или газы; п+а - смесь паров и аэрозоля; А - вещества, способные вызывать аллергические заболевания в производственных условиях.

Также при работе с эпоксидными связующими возникает опасность их утечек и попадания вредных веществ в окружающую среду. Основные вредные вещества представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 — Перечень основных вредных веществ, которые могут поступать в атмосферный воздух населенных мест

№ п/ п	Наименование вредного вещества	ПДК, мг/м <sup>3</sup>		Класс опасности
		максимально разовая	среднесуточная	
1.	Эпихлоргидрин	0,2	0,2	II
2.	Толуол	0,6	0,6	III
3.	Фенол	0,01	0,003	II
4.	Анилин	0,05	0,03	II
5.	Формальдегид	0,035	0,03	II
6.	Спирт бутиловый	0,1	0,1	III
8.	Малеиновый ангидрид	0,2	0,05	II
9.	Спирт изопропиловый	0,6	0,6	III
10.	Ацетон	0,35	0,35	IV

При работе с эпоксидными связующими предъявляются требования к освещённости рабочей зоны. Нормы освещённости представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 — Нормы освещенности рабочих поверхностей при искусственном освещении в производстве эпоксидных смолы композиционных материалов на их основе

Наименование места работы	Разряд и подразряд зрительной работы	Освещенность рабочих поверхностей при общем освещении, лк
<b>Производство эпоксидных смол</b>		
Рабочие места аппаратчиков и слесарей ремонтников	VIIIa, VIIIб	75,50
Рабочие места лаборантов цеховых лабораторий	IVa	300
<b>Производство эпоксидных клеев и компаундов</b>		
Рабочие места при подготовке исходных компонентов и их загрузке в реактор, расфасовке, дозировке	VIIIa, VIIIб	75,50
<b>Производство эпоксидных порошковых композиций</b>		
Рабочие места при дроблении, измельчении, загрузке исходных компонентов, вальцевании	VIIIa, VIIIб	75,50
<b>Применение эпоксидных и композиционных материалов на их основе</b>		
Рабочие места в эпоксидных цехах и участках в авиа-, судо-, машиностроении, строительной, радиоэлектронной, электротехнической и других отраслях промышленности	Ia, VIIIб	В соответствии с разрядами и подразрядами зрительных работ, выполняемых в эпоксидном цехе (участке) конкретного производства

К работе с эпоксидными связующими не допускаются люди без спецодежды. Рекомендации по средствам индивидуальной защиты перечислены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 — Рекомендуемые средства индивидуальной защиты  
в производстве эпоксидных смол и композиционных материалов на их основе

Наименование средства	ГОСТ, ТУ
Халат женский рабочий	ГОСТ 11621-73
Халат мужской рабочий	ГОСТ 11622-73
Средства защиты органов дыхания (противогазовые универсальные респираторы)	РУ-60М ГОСТ 17269-71
Очки защитные	ГОСТ 12.4 013-75
Респиратор У-2К	ТУ 6-16-2267-78
Респираторы ШБ-1 "Лепесток-200", "Лепесток-40", "Лепесток-5"	ТУ 95-7039-73
Фартуки (типы А, Б, В, Г)	ГОСТ 12.4.029-76
Нарукавники	ТУ 17 РСФСР 7362-76

При проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации производственных помещений промышленных предприятий, цехов, участков, а также лабораторий (производственных, исследовательских, учебных), в которых осуществляются синтез и промышленное применение эпоксидных смол (диановых, азотсодержащих, галогенсодержащих, циклоалифатических, сложных диглицидиловых эфиров, алифатических смол на основе ди- и полиолов, модифицированных эпоксидных смол) и композиционных материалов на их основе (связующих для армированных стеклопластиков,

заливочных и пропиточных компаундов, клеев, герметиков, шпаклевок, красок, лаков, эмалей и др.) обязательны правила закреплённые в документе от 28 ноября 1989г. «Санитарные правила при производстве и применении эпоксидных смол и материалов на их основе».

В данном документе приводятся требования к: размещению промышленных предприятий, зданий, сооружений и содержанию территории; производственным зданиям промышленных предприятий; производственным процессам и оборудованию; основным рабочим местам и трудовому процессу; отоплению и вентиляции; освещению; средствам индивидуальной защиты и меры личной гигиены; контролю за содержанием вредных веществ в воздухе рабочей зоны; санитарно-бытовому обеспечению; организации и выполнению работ в период реконструкции и ремонта; санитарной охране окружающей среды.

Непосредственно при изготовлении силовой оболочки данного двигателя предъявляются следующие требования техники безопасности: к работе допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, инструктаж по технике безопасности и обученные безопасным методам работы, сдавшие экзамен правил и норм промышленной санитарии; все работающие должны проходить периодический медицинский осмотр не реже одного раза в год; работы проводить только при наличии действующей приточно-вытяжной вентиляции и достаточном освещении; на рабочем месте должен производиться периодический контроль за содержанием в воздухе рабочей зоны вредных веществ; оборудование для механической резки должно быть снабжено индивидуальными отсосами; свежий воздух должен подаваться в верхнюю зону рассеянно, в зимнее время воздух, подаваемый в производственные помещения, должен быть подогрет; с целью безопасного ведения процесса каждый исполнитель должен руководствоваться при работе конкретными инструкциями по рабочему месту; рабочий участок должен быть обеспечен пожарным инвентарем. Подходы к пожарному



инвентарю должны быть свободны; рабочие места и проходы необходимо содержать в чистоте, не допуская их загромождения; по окончании работы в помещении должна производиться тщательная влажная уборка; спецодежда и личная одежда рабочих должна храниться отдельно.

## **4 Экономическая часть**

### **Введение**

Разработка ракетного двигателя твёрдого топлива подразумевает также разработку и производство множества его различных частей. Одной из основных деталей является корпус ракетного двигателя. Он объединяет в себе функции корпуса ракеты, «топливного бака» и камеры сгорания.

Таким образом необходимо определить фронт работ по разработке корпуса ракетного двигателя, его производству, а также спланировать его испытания. Для обоснования разработки двигателя нужно дать технико-экономическую оценку изделия в целом и отдельных его элементов.

В дипломном проекте рассматривается разработка ракетного двигателя твёрдого топлива второй ступени. Корпус двигателя представляет собой мотаную конструкцию из органопластика “Армос”.

Оценка затрат на разработку корпуса РДТТ должна проводиться не традиционным способом – учёт численности разработчиков и сроков возможного окончания работ. Должны учитываться необходимый объем огневой стендовой отработки и, следовательно, количество испытываемых изделий, темп нарастания коэффициента их использования при испытаниях и определение производственной базы (заводов и стендов).

На основе опытного мнения можно сказать, что основные затраты при создании ракетных двигателей и их частей состоят не из затрат на этап проектирования и изготовления головного образца, а из затрат на производство необходимого количество изделий и испытания каждого изделия для подтверждения заданных требований по техническому заданию.

С целью аргументировать необходимость в разработке нового двигателя и проводится экономический расчет. Экономический расчёт проводится с

целью обосновать разработку корпуса как часть ракетного двигателя твёрдого топлива.

#### **4.1 Подготовка исходных данных для проведения расчета затрат на создание корпуса РДТТ**

Для определения затрат на разработку и проведения испытаний до этапа сдачи заказчику всего изделия в целом необходимо рассчитать затраты, связанные с:

- разработкой проекта корпуса РДТТ и конструкторской документации,
- её последовательным уточнением по результатам технологического освоения и доводки;
- подготовкой производства по всему циклу (создание технологической документации, чертежей на оснастку и инструмент);
- изготовлением первых партий корпуса РДТТ;
- проведением огневых испытаний;
- отработкой корпуса в составе РДТТ с подтверждением заданных характеристик и точности, соответствующих требованиям технического задания применительно к задачам дальнейшего использования.

Данные проектно-экономических расчетов представляют собой систему оценок на базе опытных данных, накопленных в проектных и производственных организациях.

Для выполнения работ по расчету затрат на создание корпуса РДТТ необходимо иметь два массива исходных данных: технические характеристики изделия и проект графика разработки с указанием сроков выполнения работ.

## 4.2 Основные этапы работ

Чтобы начать экономический расчёт, необходимо определить порядок и содержание работ по созданию корпуса ракетного двигателя. Можно выделить следующие основные этапы работ:

- фундаментальные поисковые научно-исследовательские работы;
- техническое предложение (аванпроект);
- разработка технического задания;
- эскизное проектирование;
- техническое проектирование;
- подготовка стендовой установки;
- рабочий проект;
- изготовление опытных образцов;
- конструкторско-доводочные огневые стендовые испытания опытных образцов;
- корректировка рабочей конструкторской документации;
- изготовление натурных образцов;
- натурные испытания;
- подготовка серийного производства.

Данные этапы работ определяют стоимость разработки корпуса ракетного двигателя. В таблице 4.1 представлен план работ по разработке корпуса двигателя.

Таблица 4.1 - План работ по разработке корпуса двигателя

Наименование этапа	Недели													
ФПНИР	■													
Техническое предложение		■												
Разработка ТЗ			■											
Эскизное проектирование			■	■										
Техническое проектирование				■	■									
Подготовка стенда					■	■								
Рабочий проект						■	■							
Изготовление опытных образцов							■	■	■	■				
Испытания опытных образцов								■	■	■	■			
Корректировка РКД								■	■	■	■			
Изготовление натуральных образцов									■	■	■			
Натурные испытания												■		
Подготовка производства													■	■

### 4.3 Сетевая модель

Чтобы определить длительность всего процесса разработки корпуса, а также отдельных его этапов, необходимо построить сетевой график (табл. 4.2).

Таблица 4.2 - Основные события и работы проекта

Событие	Код работы	Работа	Трудоемкость	
			чел/дни	чел/час
Начало работ	0-1	ФПНИР	20	160
Окончание НИР	1-2	Аванпроект	20	160

Подготовка аванпроекта	2-3	Разработка ТЗ	20	160
	2-4	Эскизное проектирование	40	320
Подготовка ТЗ	3-5	Техническое проектирование	40	320
Начало подготовки стенда	4-6	Подготовка стенда	40	320
Окончание технического проектирования	5-6	Рабочий проект	140	320
Готовность рабочего проекта	6-7	Изготовление опытных образцов	80	640
	6-8	Испытания опытных образцов	80	640
	6-9	Корректировка РКД	100	800
Готовность опытных образцов	7-9	Изготовление натуральных образцов	20	160
Получение результатов испытаний	8-9	-	-	-
Подготовка натуральных образцов	9-10	Натурные испытания	20	160
Окончание проектирования	10-11	Подготовка производства	60	480
Окончание работ	-	-	-	-

Графические изображения сетевого графика, а также календарного графика (диаграмма Ганта) представлены на листе проекта.

#### 4.4 Затраты на проект

Заработная плата:

Заработная плата за выполнение работ, связанных с проектированием корпуса ракетного двигателя твёрдого топлива, рассчитывается исходя из недельного оклада и занятости.

$$C_{\text{з.окл.}} = T_{\text{зан}} \cdot O_{\text{нед}} ,$$

где  $T_{\text{зан}}$  приравнивается полному времени занятости работника в проекте, а  $O_{\text{нед}}$  соответствует окладу работника за неделю.

При расчёте необходимо учесть подоходный налог:

$$C_{\text{з.осн}} = C_{\text{з.окл}} \cdot (1 + N_{\text{дфл}}).$$

Применяя приведённые формулы, можно рассчитать величину заработной платы для каждого из работников. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 4.3 - Заработная плата работников

№	Должность	Численнос	Нед. оклад	Занятос	Оклад	Зарплата
1	Проектировщ	1	12000	12	18000	203400
2	Технолог	1	10000	10	90000	101700
3	Испытатель	2	8000	8	48000	54240

Дополнительная заработная плата:

$$C_{\text{з.доп}} = 0,2 \cdot C_{\text{з.осн}}$$

Отчисления с заработной платы:

$$C_{\text{з.отч}} = (C_{\text{з.осн}} + C_{\text{з.доп}}) \cdot N_{\text{соц}}$$

Суммарные затраты на заработную плату:

$$C_{\text{зп}} = C_{\text{з.осн}} + C_{\text{з.доп}} + C_{\text{з.отч}} = (1 + 0,2 + 1,2 \cdot 0,26) \cdot C_{\text{з.осн}} = 1,512 \cdot C_{\text{з.осн}}$$

Итого получаем:

$$C_{\text{зп}} = 1,512 \cdot \sum C_{\text{з.осн}} = 1,512 \cdot (203400 + 101700 + (2 \times 54240)) = 625\,333 \text{ руб.}$$

Затраты на оборудование:

Для разработки документации, проведения расчётов, поиска информации необходимо иметь технику, которая позволит в комфортных условиях и без траты лишнего времени произвести все нужные работы. Проектировщик и технолог должны мобильно обмениваться информацией, а также иметь возможность быстро переносить информацию на материальный носитель. Таким образом необходимо приобрести два компьютера, способных работать с 3D графикой и производить многопараметрическое моделирование, принтер для печати листов малого формата и плоттер для печати листов большого формата. Стоимость данной техники приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Стоимость оборудования

Сотрудники	Оборудован	Кол-	Срок	Цена, руб.
Проектировщик и технолог	Компьютер	2	покупк	100000
	Принтер	1	покупк	16000
	Плоттер	1	покупк	100000

Общая сумма затрат на оборудование:

$$C_{\text{ОБ}} = C_{\text{ПК}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{пл}} = 100000 \cdot 2 + 16000 + 100000 = 316\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на вспомогательное программное обеспечение:

Необходимо приобрести официально программное обеспечение для двух компьютеров: ПО для непосредственной работы с компьютером (Windows), для проведения числовых расчетов (Mathcad), для черчения и 3D моделирования (Компас 3D). Стоимость приобретения данных программ представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Стоимость программного обеспечения

Наименование	Стоимость, руб.
Microsoft Windows 10	5000
Mathcad Professional -	15500
КОМПАС-3D V17.1.0	50000



Суммарные затраты на ПО для двух компьютеров:

$$C_{\text{ПО}} = \sum C_i = 2 \cdot (5000 + 15500 + 50000) = 141\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на организацию рабочих мест:

Для работы проектировщика и технолога необходим офис минимум  $12\text{м}^2$ .

Был проведён поиск подходящих мест в пределах г. Москва. Результаты представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Арендуемые рабочие места

Район	Площадь,	Стоимость,
ст. м. Отрадное	20	10833
ст. м. Волгоградский	15	12529
ст. м. Волгоградский	13,7	10136
ст. м.	17,4	17400
ст. м. Бауманская	22,3	20442

Третий вариант нас устраивает по площади и имеет минимальную цену. Исходя из продолжительности наших работ, была рассчитана стоимость аренды:

$$C_{\text{ОРГ}} = C_{\text{ар}} \cdot T_{\text{ар}} = 10136 \cdot 4 = 40\,544 \text{ руб.}$$

Накладные расходы:

Предполагаем, что накладные расходы составят 80% от заработной платы:

$$C_{\text{НАКЛ}} = K_{\text{НАКЛ}} \cdot C_{\text{ЗП}} = 0,8 \cdot 625333 = 500\,266 \text{ руб.}$$

Определение суммарных затрат на проектирование:

$$\begin{aligned}
K_{\text{ПР}} &= C_{\text{ЗП}} + C_{\text{ОБ}} + C_{\text{ПО}} + C_{\text{ОРГ}} + C_{\text{НАКЛ}} \\
&= 625333 + 316000 + 141000 + 40544 + \\
&\quad + 500266 = 1\,623\,143 \text{ руб.}
\end{aligned}$$

Затраты на изготовление:

При условии, что основным материалом является Армос стоимость 5000 руб. за килограмм, а общая его масса на одно изделие равна 700 килограммам, выходит стоимость затрат на материалы:

$$S_{\text{м}} = 5000 \cdot 7000 = 3\,500\,000 \text{ руб.}$$

Затраты на зарплату работников производства, при условии, что средняя тарифная ставка составляет 120 руб./час, трудоемкость изготовления одного корпуса двигателя 120 норма-часов получаем:

$$L = 1,512 \cdot L_{\text{осн}} = 1,512 \cdot L_{\text{м.ст}} \cdot m_{\text{дв}} = 1,512 \cdot 120 \cdot 120 = 21\,773 \text{ руб.}$$

Принимаем суммарные затраты на обслуживание оборудования и электроэнергию равными 1600 руб. на изделие.

Тогда при условии, что дополнительные и косвенные расходы на производстве составляют до 250%, а внепроизводственные затраты до 15%, имеем себестоимость производства одного корпуса двигателя:

$$\begin{aligned}
S &= 1,15 \cdot [S_{\text{м}} + L \cdot (1 + 2,5) + S_{\text{об}}] = 1,15 \cdot [3\,500\,000 + 21\,773 \cdot 3,5 + 1\,600] = \\
&= 3\,577\,806 \text{ руб.}
\end{aligned}$$

Затраты на испытания:

Затраты на испытания рассчитаем из стоимости одного килограмма смесового ракетного топлива, которое составляет около 250 руб. за килограмм, а количество необходимых испытаний примем равным 10, где на одно будет необходимо 12000 килограмм топлива.

$$K_{\text{ИСП}} = n \cdot m \cdot S_{\text{топл}} = 10 \cdot 12000 \cdot 250 = 30\,000\,000 \text{ руб.}$$

Итоговые затраты по всем трем стадиям сведем в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 - Затраты на разработку корпуса двигателя

Наименование затрат	Сумма,	Доля в суммарных
Затраты на проектирование	1 623 143	5
Затраты на изготовление	3 577 806	10
Затраты на испытания	30 000 000	85
ИТОГО	35 200 949	100

Диаграмма суммарных расходов представлена на листе дипломного проекта.

#### 4.5 Заключение экономической части

Данный корпус ракетного двигателя твёрдого топлива требует 4 месяца на разработку. На разработку потребуется потратить 35 200 949 руб. Затраты на непосредственное проектирование составят 1 623 143 руб. (5%). Затраты на изготовление составят 3 577 806 руб. (10%). Затраты на испытания данного корпуса в составе двигателя составят 30 000 000 руб. (85%).

## Список использованных источников

1. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива,- М.: Машиностроение, 1987.- 328 с.
2. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива.-М.: Машиностроение, 1995.- 400 с,
3. Панин С.Д., Шишков А.А., Румянцев Б.В.. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1988.- 240 с.
4. Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей /Под ред. В.М. Кудрявцева, - М.: Высшая школа, 1993.
5. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей,- М.: Машиностроение, 1989,- 464 с.
6. Александренков В. П. Лекции по курсу «Теплообмен и прочность конструкции РДТТ»
7. Ягодников Д.А., Андреев Е.А. Основы проектирования ракетных двигательных установок на твердом топливе. Методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
8. Дорофеев А.А. Проектирование и расчёт параметров и характеристик камеры ракетного двигателя. Учеб. пособие – М.: Логос, 2002.
9. М.А. Комков, В.А. Тарасов «Технология намотки композиционных конструкция ракет и средств поражения».
10. Королев А.Н. Лекции по курсу «Технология энергомашиностроения»
11. В.А. Калинин, Д.А Ягодников Технология производства ракетных двигателей твердого топлива. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
12. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 10 мая 2017г. №62 об утверждении санитарных правил СП 2.2.1.3471-17 «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению безопасности

персонала предприятий и населения прилегающих территорий при испытании и утилизации зарядов ракетных двигателей на твердом топливе методом сжигания»

13. А. Г. Галеев «Экологическая безопасность при испытаниях и отработке ракетных двигателей», Учебное пособие, Издательство МАИ, 2006.

14. Ракетное топливо как экологическая опасность, из государственного доклада 1995 г., Сообщение UCS-INFO.97, 17 декабря 1996 г.

15. Постановление министерства труда и социального развития РФ от 14 августа 2002г. №56 «Об утверждении межотраслевых правил по охране труда при работе с эпоксидными смолами и материалами на их основе»

16. Постановление Главного государственного санитарного врача СССР от 28 ноября 1989г. Об утверждении санитарных правил СП 2.2.1.5159-89 «Санитарные правила при производстве и применении эпоксидных смол и материалов на их основе»

## Приложение А

### Результаты расчета состава ТРТ в программном комплексе «Астра-4»

#### Исходные данные

I=0.,  
P=10., Pa=кр., 0.03.,  
(100% C9.213 H24.948 O28.408 N7.428 CL2.979 AL7.413 [-2034]);

Брутто-формула раб. тела: C 9.21315 H 24.9484 O 28.4085 N 7.42812  
CL 2.97905 AL 7.41312

#### Характеристики равновесия - СИ

P=10	T=3935.49	V=0.0953523	S=8.76324	I=-2034
U=-2987.52	M=32.6256	Cp=1.79867	k=1.15567	Cp''=4.65807
k''=1.16557	A=1032.46	Mu=0.0001019	Lt=0.362575	Lt''=1.50678
MM=30.6507	Cp.r=1.9095	k.r=1.2451	MM.r=22.1198	R.r=375.891
Z=0.355436	Пл=0	Bm=0.097511		

#### Содержание компонентов - моль/кг

O	0.234802	O2	0.110124	H	1.60819
H2	4.37749	OH	1.13529	HO2	0.0010359
H2O	5.49994	H2O2	0.0001753	Cl	0.521464
Cl2	0.0008848	ClO	0.0022621	HCl	2.19523
HOCl	0.000959	N	0.0014348	N2	3.62408
NO	0.175557	NO2	0.0000852	N2O	0.0000426
NH	0.0014351	NH2	0.0004408	NH3	0.0002561
HNO	0.0003857	HNO2	0.0000201	ClNO	0.0000301
CO	8.07235	CO2	1.13832	CHO	0.0016233
CHO2	0.0003776	CH2O	0.0000526	CH2O2	0.000054
ClCO	0.000158	HClCO	0.5346e-5	CN	0.0000124
NCO	0.5933e-5	HCN	0.0001841	HNC	0.2052e-5
N2C	0.2204e-5	ClCN	0.1241e-5	Al	0.0090413
AlO2	0.0011542	Al2O	0.0057242	Al2O2	0.0008441
k*Al2O3	3.48599	Al2O3	0.0000326	AlH	0.0016233
AlH2	0.0000309	AlOH	0.114461	HALO	0.0000819
HALO2	0.0039111	AlO2H2	0.0288414	AlO3H3	0.0005546
AlCl	0.109183	AlCl2	0.0237817	AlCl3	0.0008652
AlOCl	0.0267399	AlOCl2	0.0007776	AlHCl	0.0016804
AlH2Cl	0.3704e-5	AlHCl2	0.00013	AlOHCl	0.0545375
AlO2H2Cl	0.0029364	AlOHCl2	0.0048856	AlN	0.0000291
-1*OH	0.5136e-5	-1*Cl	0.0003442	+1*Al	0.0003952
-1*AlO	0.000028	-1*AlO2	0.1498e-5	AlO	0.0422545
эл.газ	0.0000159				

#### Характеристики равновесия - СИ

#### (кр.сечение)

P=5.81037	T=3752.47	V=0.154983	S=8.76324	I=-
2537.16				
U=-3437.68	M=32.4165	Cp=1.79669	k=1.15416	Cp''=4.44234
k''=1.15913	A=1003.15	Mu=0.0000988	Lt=0.34986	Lt''=1.49984
MM=30.8485	Cp.r=1.90981	k.r=1.24545	MM.r=22.0912	R.r=376.379
Z=0.3624	Пл=0	Bm=0.0970429	n=1.11776	W=1003.15
W/A=1	F/F*=1	F''=0.0001545	Iудп=193.847	B=157.569

**Содержание компонентов - моль/кг**

O	0.191227	O2	0.0922724	H	1.48914
H2	4.38812	OH	0.988596	HO2	0.0006593
H2O	5.62283	H2O2	0.0001061	Cl	0.50425
Cl2	0.0007114	ClO	0.0015941	HCl	2.28186
HOCl	0.0006862	N	0.0009118	N2	3.64226
NO	0.140918	NO2	0.0000515	N2O	0.0000258
NH	0.000866	NH2	0.0002548	NH3	0.0001622
HNO	0.000228	HNO2	0.000011	ClNO	0.0000171
CO	8.02708	CO2	1.18458	CHO	0.0009851
CHO2	0.0002312	CH2O	0.0000304	CH2O2	0.0000318
ClCO	0.0000933	HClCO	0.2985e-5	CN	0.5840e-5
NCO	0.2863e-5	HCN	0.0001044	Al	0.0056313
AlO2	0.0006523	Al2O	0.0030153	Al2O2	0.0004577
k*Al2O3	3.55429	Al2O3	0.000015	AlH	0.0008724
AlH2	0.0000129	AlOH	0.0770784	HALO	0.0000401
HALO2	0.0025419	AlO2H2	0.0176561	AlO3H3	0.0003197
AlCl	0.0832218	AlCl2	0.0178313	AlCl3	0.0006727
AlOC1	0.0203632	AlOC12	0.0005058	AlHCl	0.0009389
AlH2Cl	0.1638e-5	AlHCl2	0.000076	AlOHCl	0.036736
AlO2H2Cl	0.001887	AlOHCl2	0.0034507	AlN	0.0000116
-1*OH	0.2380e-5	-1*Cl	0.0002297	+1*Al	0.000255
-1*AlO	0.0000123	AlO	0.0268032	эл.газ	0.9853e-5

**Характеристики равновесия - СИ**

**(вых.сечение)**

P=0.026	T=2326.97	V=20.1658	S=8.76324	I=-
6248.19				
U=-6772.51	M=30.8054	Cp=207.552	k=1.00109	Cp"=208.094
k"=1.00129	A=723.156	Mu=0.0000717	Lt=0.23367	
Lt"=0.554117				
MM=32.4618	Cp.r=1.81759	k.r=1.24885	MM.r=22.9575	R.r=362.175
Z=0.377864	Пл=0	Bm=0.0969686	n=1.1117	W=2903.16
W/A=4.01458	F/F*=44.9599	F"=0.0069461	Iудп=314.461	

**Содержание компонентов - моль/кг**

O	0.0019552	O2	0.0010917	H	0.244595
H2	4.6342	OH	0.0547308	H2O	6.25546
Cl	0.108228	Cl2	0.0000241	ClO	0.4158e-5
HCl	2.86944	HOCl	0.4946e-5	N	0.1027e-5
N2	3.71276	NO	0.002597	NH	0.1137e-5
NH3	0.2346e-5	CO	7.45307	CO2	1.76008
CHO	0.3268e-5	Al	0.1643e-5	k*Al2O3	3.70595
AlOH	0.0001208	HALO2	0.2029e-5	AlO2H2	0.0000164
AlCl	0.0006006	AlCl2	0.0001794	AlCl3	0.0000206
AlOC1	0.0001213	AlOHCl	0.0001031	AlO2H2Cl	0.6359e-5
AlOHCl2	0.0000347	AlO	0.9007e-5		

