



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

ФАКУЛЬТЕТ _____ «СПЕЦИАЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

КАФЕДРА _____ «РАКЕТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ» (СМ-6)

Домашнее задание

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

«Проектирование энергетических установок РО»

НА ТЕМУ:

«Проектирование двигательной установки»

Выполнил: студент группы _____ СМ6-82 _____ Широкопетлев Н.К.
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Преподаватель _____ Федоров. А.А.
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

Москва, 2022 г.

Содержание

1. Техническое задание	3
2. Выбор топлива и давления в КС	3
3. Проектирование заряда ТРТ	9
3.1. Первая стадия горения	10
3.2. Вторая стадия горения	10
3.3. Третья стадия горения	11
3.4. Расчет заряда	11
3.5. Построение зависимостей	12
4. Пересчет площади критического сечения	13
5. Определение массы навески воспламенителя	14
6. Расчет ОЗВБ и подтверждение заданных в ТТЗ параметров	18
7. Теоретический контур ДУ	22
Заключение	23
Список использованных источников	25

1. Техническое задание

Необходимо спроектировать стартовый однорежимный РДТТ для ЗУР, обеспечивающий следующие характеристики:

- суммарный импульс: не менее 65000 Н·с;
- время работы двигателя: не менее 4 с;
- диапазон температур эксплуатации: $-50^{\circ}\text{C} \dots + 50^{\circ}\text{C}$;
- наружный диаметр обечайки: 360 мм;
- суммарная масса снаряжённой ДУ: не более 375 кг;
- длина ДУ: не более 3,25 м.

2. Выбор топлива и давления в КС

Имея начальные данные, необходимые для проектирования ДУ, можем провести массовый анализ конструкции ДУ и выбрать требуемую массу топлива, исходя из его энергетических характеристик, а также назначить давление в камере сгорания ДУ, которое обеспечит заданный суммарный импульс.

Для проведения расчетов необходимо располагать дополнительными параметрами, в частности запасом топлива ω . Для получения опорной массы топлива необходимо назначить в первом приближении коэффициент конструктивно-массового совершенства, который необходимо будет уточнить, и снова повторить расчет до сходимости заданного и полученного коэффициентов.

Зададим $\alpha_{\text{зад}} = 0,25$. Максимальный запас топлива найдем следующим образом:

$$\omega_{\text{max}} = \frac{m_{\text{ду max}}}{1 + \alpha_{\text{зад}}} = \frac{375}{1,25} = 300 \text{ кг.}$$

Вычислим минимальный потребный удельный импульс:

$$J_{\text{уд min}} = \frac{J_{\Sigma}}{\omega_{\text{max}}} = \frac{650000}{300} \approx 2167 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Исходя из значения удельного импульса было выбрано смесевое топливо и сформирован банк топлив:

1. 25% ПБАК, 75% ПХА;
2. 20% ПБГГ, 80% RDX;
3. 20% ПБГГ, 40% ПХА, 40% RDX.

Характеристики топлив представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики выбранных топлив

	Топливо №1	Топливо №2	Топливо №3
Плотность ρ_t , кг/м ³	1524	1522	1557
Температура ПС T_0 , К	1789.24	1761,16	1954,05
Показатель адиабаты k	1,278	1,309	1,288
Газовая постоянная R , Дж/(кг·К)	408,872	462,973	426,036
Показатель степени в законе горения ν	0,41	0,67	0,44
Единичная скорость горения u_1 , мм/(с·МПа ^{ν})	2,45	1,02	2,46

Минимальное давление устойчивого горения топлива принимается равным $p_{\min} = 0,5$ МПа. При любых условиях, в том числе, при минимальной температуре, давление в камере должно быть выше p_{\min} . Исходя из этого:

$$p_{\text{ном}} = \left(p_{-50}^{\nu-1} \frac{F_3(T_{-50})}{F_3(T_{\text{ном}})} \right)^{\frac{1}{\nu-1}}.$$

Для выбранных топлив:

1. $p_{\text{ном}} = 0,707$ МПа;
2. $p_{\text{ном}} = 0,928$ МПа;
3. $p_{\text{ном}} = 0,72$ МПа.

Для проведения массового анализа конструкции необходимо назначить материалы всех элементов и назначить теплозащитные покрытия. На начальном этапе проектирования толщина ТЗП назначается и должна быть уточнена в дальнейшем. Материалы также должны быть сведены в банк данных и в процессе решения задачи должно быть проведено их варьирование.

В таблице 2 представлены материалы, используемые для различных элементов ДУ, а в таблице 3 представлены характеристики этих материалов.

Таблица 2. Набор комбинаций материалов элементов конструкции ДУ [1]

Номер комбинации/ Элемент конструкции	Переднее днище	Обечайка	Заднее днище	Сопловой стакан	СЗ часть сопла
1	СП-28Ш	СП-28Ш	СП-28Ш	ВТ23	ВТ23
2	Д6АС	Д6АС	Д6АС	ВТ23	ВТ23
3	СП-28Ш	СП-28Ш	СП-28Ш	ОТ4	ОТ4
4	ЭП 679-ВД	ЭП 679-ВД	ЭП 679-ВД	ВТ14	ВТ14
5	Стеклопластик	Стеклопластик	Стеклопластик	ВТ14	ВТ14

Таблица 3. Характеристики материалов

Материал	ρ , кг/м ³	σ_B , МПа
СП-28Ш	7840	1600
ЭП 679-ВД	7840	1750
Д6АС	7840	До 2100
Стеклопластик	2200	2100
ВТ23	4570	1050–1250
ОТ4	4570	700-900
ВТ14	4570	1200–1350

В процессе выполнения задачи принимаем следующее: толщина ТЗП переднего днища $\delta_{1\text{ТЗП}} = 4$ мм, толщина ТЗП обечайки $\delta_{2\text{ТЗП}} = 6$ мм, толщина ТЗП заднего днища $\delta_{3\text{ТЗП}} = 5$ мм, толщина соплового стакана $\delta_{4\text{ТЗП}} = 3$ мм, $\lambda_4 = 0,1$, $k_4 = 1,3$, $\delta_{5\text{ТЗП}} = 3$ мм, Заднее днище имеет угол полураствора $\alpha = 50^\circ$. Также при проведении расчетов приняты тепловые потери в камере РТДД $\chi = 0,95$. Проектирование ведется для давления окружающей среды на высоте 3000 метров $p_n = 72484,3$ Па. Коэффициент заполнения поперечного сечения назначим равным $\varepsilon_s = 0,65$.

Для деталей корпуса (переднее и заднее днище, обечайка) существуют технологические ограничения на толщину стенки. Поэтому расчет массовых коэффициентов \bar{c}_1 , \bar{c}_2 и \bar{c}_3 должен проводиться с учетом этих ограничений. Расчет массовых коэффициентов подробно представлен в пособии [1].

Для обечайки из условий прочности рассчитывается толщина стенки. Если она меньше технологической, то коэффициент \bar{c}_2 рассчитывается из уравнения (1) делением

массы обечайки m_2 на давление p и массу топлива ω . Если толщина стенки больше технологической, то расчет \bar{c}_2 проводится по формуле (2):

$$m_2 = c_2 p_K = \bar{c}_2 \omega p_K. \quad (1)$$

$$\delta_2 = \eta \frac{p_K D}{2[\sigma]} F_3(T_{3\max})^{\frac{1}{v-1}}. \quad (2)$$

Аналогично записываются выражения для переднего и заднего днищ. Масса переднего днища зависит от удлинения цилиндрической обечайки λ_2 , которое может меняться в процессе решения задачи. Поэтому \bar{c}_1 является функцией двух переменных.

Масса заднего днища также зависит от удлинения днища λ_3 . Удлинение днища λ_3 является зависимой переменной и определяется перепадом площадей камеры и критики и углом полураствора заднего днища.

Массовый коэффициент соплового стакана является константой и определяется по формуле:

$$\bar{c}_4 = 4k_4^2 \delta_4 E_4 \rho_4 \frac{\sqrt{\chi R_e T_0}}{\mu_c A(k) N_c t_p}. \quad (3)$$

Массовый коэффициент для СЗ части сопла определяется в зависимости от коэффициента уширения сопла:

$$\bar{c}_5(v_a) = \frac{8}{3} \lambda_5 \frac{\sqrt{R_e T_0}}{\mu_c A(k) N_c t_p} \left(3 + \frac{\sqrt{v_a}}{k_4} \right) (\rho_5 \delta_5 + \rho_{5\text{ТП}} \cdot \delta_{5\text{ТП}}) \frac{\sqrt{\chi R_e T_0}}{\mu_c A(k) N_c t_p}. \quad (4)$$

Удлинение λ_5 находится по формуле (5):

$$\lambda_5 = \frac{\sqrt{(10...35)(v_a - 1) - 0,25(v_a - 1)^2}}{k_4}. \quad (5)$$

Суммарные коэффициенты записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{C}_1(p, \lambda_2, \lambda_3) &= \bar{c}_1(p, \lambda_2) + \bar{c}_2(p) + \bar{c}_3(p, \lambda_2, \lambda_3) \\ \bar{C}_2(v_a) &= \bar{c}_4 + \bar{c}_5(v_a). \end{aligned} \quad (6)$$

Нахождение оптимального значения подразумевает построение базовых зависимостей при варьировании давления в допустимом диапазоне. Давление варьируется от минимально допустимого до максимального значения. Для каждого i -го давления из указанного диапазона решается система уравнений, которая «заводится» в итерационный цикл. Цикл работает следующим образом:

1. Задается первоначальное приближение по коэффициенту конструктивно-массового совершенства. Задается погрешность определения коэффициента α . В нашем случае

$\varepsilon = 0,0005$. Для начала цикла задается какое-либо большее значение (например, 100).

До тех пор, пока не будет получено решение с заданной точностью, выполняется цикл.

2. Исходя из максимальной массы двигателя и текущего значения коэффициента конструктивно-массового совершенства определяется максимально возможная масса топлива.
3. Задается начальное приближение по безразмерной скорости потока в выходном сечении сопла (для нахождения правильного корня уравнения больше 1) и из определения газодинамической функции $\pi(\lambda)$ определяется безразмерная скорость потока для расчетного сопла (давление в выходном сечении равно давлению окружающей среды p_n).
4. Из уравнения расхода через сверхзвуковое сопло, определив средний расход как ω/t_p , находится площадь критического сечения.
5. Из диаметра камеры сгорания D и диаметра соплового стакана $d_4 = d_{кр} k_4$ при заданном угле полураствора конуса определяется удлинение заднего днища λ_3 .
6. Принимая, что выходное сечение сопла не может быть больше диаметра двигателя (вводится коэффициент $f = 0,9$), находится предельный коэффициент уширения сопла $v_{a \max}$.
7. По определению газодинамической функции $q(\lambda)$ определяется коэффициент уширения сопла $v_{ар}$ соответствующий расчетному соплу и затем выбирается наименьшее значение из $v_{a \max}$ и $v_{ар}$ и определяется соответствующее ему значение безразмерной скорости потока в выходном сечении сопла λ_a .
8. По полученному значению определяется реализуемый удельный импульс:

$$J_{y\partial}(\lambda_a, p) = \frac{f(\lambda_a) - \frac{P_n}{p} \sqrt{\chi R_z T_0}}{q(\lambda_a) A(k)} \quad (7)$$

Газодинамическая функция $f(\lambda)$ выглядит следующим образом:

$$f(\lambda) = (\lambda^2 + 1) \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (8)$$

9. По вычисленной массе топлива определяется удлинение цилиндрической обечайки.
10. Далее вычисляется полученное значение коэффициента конструктивно-массового совершенства. Третье слагаемое в выражении равно 0,01, оно учитывает долю воспламенительного состава.

11. Затем вычисляется невязка ϵ как разность полученного и заданного значений. В случае если невязка больше требуемой точности, полученное решение задается в качестве начального и решение повторяется.

По результатам расчетов (л/р №1), выполненных для различных комбинаций материалов ДУ и топливных составов, рациональным вариантом была выбрана комбинация материалов ДУ №2 (табл. 2) и топливного состава №1 (табл. 1).

Для заданной комбинации имеем следующие графики, представленные на рисунке 1.

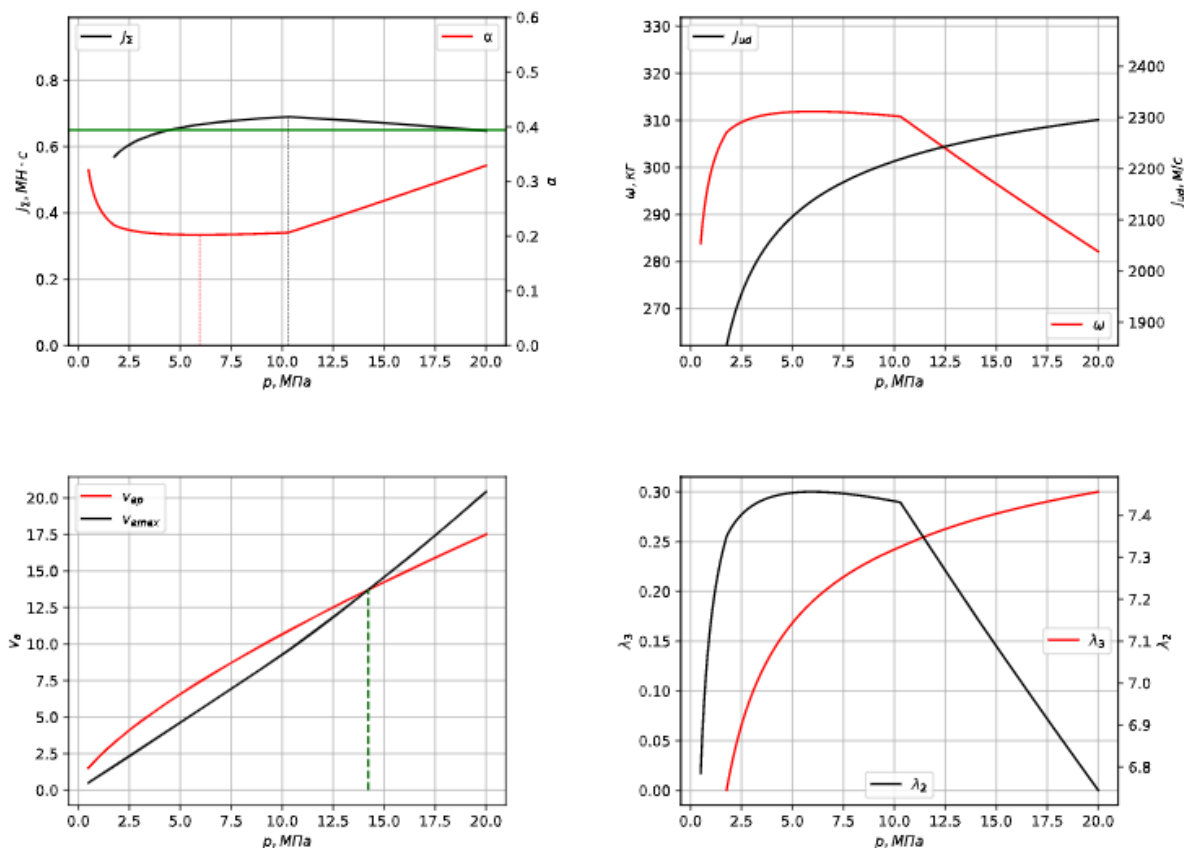


Рис. 1. Графики для топлива №1 и комбинации материалов №2

По результатам расчетов были выбраны следующие материалы элементов конструкции РДТТ:

- обечайка, переднее и заднее днища: среднеуглеродистая низколегированная сверхвысокопрочная сталь Д6АС;
- сопловой стакан и СЗ раструбы: титановый деформируемый сплав ВТ23.

Топливный состав: 25% ПБАК, 75% ПХА.

В результате проделанной работы были получены следующие характеристики проектируемого РДТТ:

- рациональным давлением в КС является 17,5 МПа;

- коэффициент конструктивно-массового совершенства $\alpha \approx 0,301$;
- суммарный импульс при заданном давлении в КС $J_{\Sigma} \approx 6,58 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с}$;
- удельный импульс топлива $J_{\text{уд}} = 2283 \text{ м/с}$;
- коэффициент уширения сопла $v_{\text{ар}} = 17,35$;
- удлинение обечайки $\lambda_2 = 4,88$, удлинение заднего днища $\lambda_3 = 0,295$.

3. Проектирование заряда ТРТ

Заряд твердого топлива формирует геометрический закон горения – зависимость площади горения от толщины горящего свода. В зависимости от формы заряда закон может быть прогрессивным (с увеличением площади горения), дегрессивным (с уменьшением площади горения) или нейтральным.

Заряд ТТ выбирается исходя из рекомендаций. Отношение толщины горящего свода, определяется по формуле:

$$e_0 = u_1 p^v t_p = 0,0324 \text{ м}; \quad (9)$$

$$\frac{e_0}{D} = 0,094. \quad (10)$$

Выбираем заряд звездообразного сечения.

Потребная площадь поверхности горения определяется по формуле:

$$S_{\text{з номр}} = \frac{\omega}{\rho e_1} = 0,5833 \text{ м}^2 \quad (11)$$

Достоинства заряда с каналом звездообразного сечения:

- развитая поверхность горения;
- высокий коэффициент заполнения поперечного сечения по сравнению с зарядом с цилиндрическим каналом при одинаковой толщине свода;

Основными геометрическими параметрами данного типа заряда являются:

- количество лучей «звезды» n ;
- полуугол выступа θ ;
- радиус скругления луча «звезды» r .

Отсюда имеем следующее:

- количество лучей «звезды»: $n = 8$;
- полуугол выступа: $\theta = 37,3^\circ$.
- радиус скругления луча «звезды»: $r = 0,006 \text{ м}$.

Полуугол выступа θ был определен из условия постоянства площади поверхности горения при заданном числе лучей n , методом половинного деления на отрезке от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Для заряда с каналом звездообразного сечения можно выделить 3 стадии горения:

- горение по цилиндрическим и плоским поверхностям;
- горение только по цилиндрическим поверхностям (преимущественно прогрессивное);
- горение дегрессивных остатков.

При последующих расчетах предполагается, что торцы заряда забронированы и они плоские. В этом случае площадь поверхности горения пропорциональна периметру профиля поперечного сечения канала:

$$S(z) = \Pi(z)l. \quad (12)$$

3.1. Первая стадия горения

Первая стадия горения подразумевает горение по цилиндрическим и плоским поверхностям.

Условие конца первой стадии горения выглядит следующим образом:

$$b(e_1) = 0, \quad (13)$$

откуда:

$$e_1 = R \frac{\sin \beta}{\cos \theta} - r = 0,0138 \text{ м.}$$

Зависимость периметра профиля поперечного сечения канала зависит от толщины сгоревшего свода:

$$\Pi_1(e) = 2n(\alpha_1(r+e) + b(e)), \quad (14)$$

$$\text{где } \alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \beta - \theta; \quad b(e) = R \frac{\sin \beta}{\sin \theta} - (r+e) \operatorname{ctg} \theta. \quad (15)$$

3.2. Вторая стадия горения

Условие конца горения второй стадии:

$$e_2 = e_0 = 0,0324 \text{ м.} \quad (16)$$

Зависимость периметра профиля поперечного сечения канала зависит от толщины сгоревшего свода:

$$\Pi_2(e) = 2n\alpha_2(e)(r+e), \quad (17)$$

где

$$\alpha_2(e) = \beta + \arcsin\left(\frac{R}{r+e} \sin \beta\right); \quad (18)$$

3.3. Третья стадия горения

Зависимость периметра профиля поперечного сечения канала зависит от толщины сгоревшего свода:

$$\Pi_3(e) = 2n\alpha_3(z)(r+e), \quad (19)$$

где

$$\alpha_3(e) = \pi - \arccos \left(\frac{R^2 + (r+e)^2 - (D/2)^2}{2D(r+e)} \right); \quad (20)$$

Условие конца горения третьей стадии:

$$e_3 = \sqrt{R^2 + (D/2)^2 - RD \cos \beta} - r = 0,0499\text{м}. \quad (21)$$

3.4. Расчет заряда

Для трех стадий горения окончательно получим:

$$\Pi(e) = \begin{cases} 2n(\alpha_1(r+e) + b(e)), & \text{если } 0 \leq e \leq e_1, \\ 2n\alpha_2(e)(r+e), & \text{если } e_1 < e \leq e_2, \\ 2n\alpha_3(e)(r+e), & \text{если } e_2 < e \leq e_3, \end{cases} \quad (22)$$

откуда несложно получить зависимость $S(z)$.

Зависимость площади свободного прохода канала заряда от толщины сгоревшего свода имеет следующий вид:

– для первой стадии:

$$F_{1cv}(e) = n \left(\alpha_1(r+e)^2 + \left(R \frac{\sin \beta}{\sin \theta} - (r+e) \operatorname{ctg} \theta \right) \cdot ((r+e) + R \cos \alpha_1) + R(r+e) \sin \alpha_1 \right); \quad (23)$$

– для второй стадии:

$$F_{2cv}(e) = n \left(\alpha_2(e)(r+e)^2 + R(r+e) \sin \alpha_2(e) \right); \quad (24)$$

– для третьей стадии:

$$F_{3cv}(e) = n \left(\alpha_3(e)(r+e)^2 + R(r+e) \sin \alpha_2(e) + \Delta\beta_3(z) \frac{D^2}{4} - R \frac{D}{2} \sin \Delta\beta_3(e) \right), \quad (25)$$

где

$$\Delta\beta_3(e) = \arccos \frac{R^2 + (D/2)^2 - (r+e)^2}{RD}. \quad (26)$$

Зависимость параметра Победоносцева от толщины сгоревшего свода:

$$\kappa(e) = \frac{S(e)}{F_{cv}(e)}. \quad (27)$$

Начальное значение параметра Победоносцева:

$$\kappa_0(e) = \frac{S(0)}{(1 - \varepsilon_f) F_{\kappa}}. \quad (28)$$

где коэффициент заполнения поперечного сечения КС ε определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{F_{сеч}}{F_{\kappa}}. \quad (29)$$

Длину заряда определим следующим образом:

$$l_{gr} = \frac{\omega}{\delta} \frac{1}{\varepsilon F_{\kappa}}, \quad (30)$$

Получаем следующие результаты:

- коэффициент заполнения поперечного сечения КС: $\varepsilon = 0,645$;
- начальное значение параметра Победоносцева: $\kappa_0 = 111,79$;
- длина заряда: $l_{gr} = 2,565$ м;
- среднее значение площади поверхности горения (с учетом дегрессивных остатков): $S_{cp} = 5,863$ м²;
- $e_1 = 0,0138$ м; $e_2 = 0,0324$ м; $e_3 = 0,0499$ м.

3.5. Построение зависимостей

Графики зависимостей поверхности горения заряда и значения параметра Победоносцева от толщины сгоревшего свода приведены на рисунках 2 и 3.

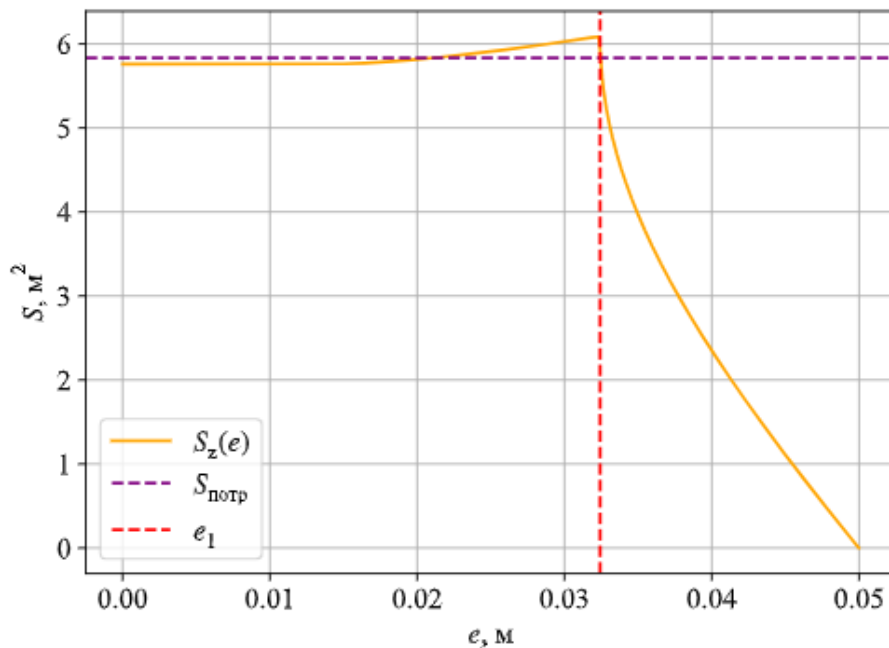


Рис. 2. Зависимость $S_z(e)$

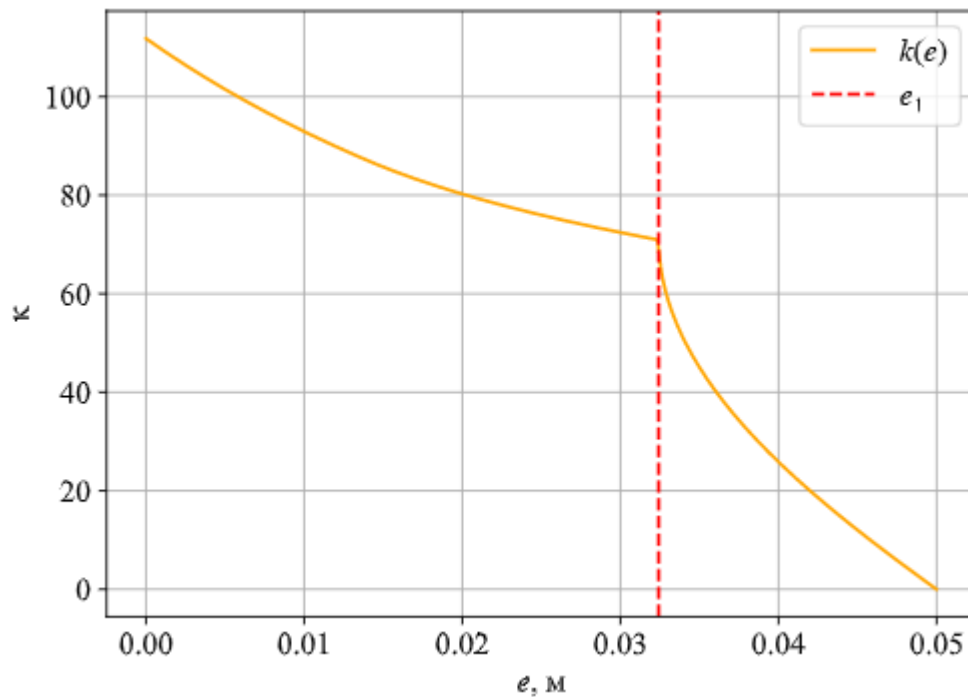


Рис. 3. Зависимость $\kappa(e)$

4. Пересчет площади критического сечения

На этапе выбора давления в камере сгорания были найдены опорные значения безразмерной скорости потока в выходном сечении сопла и коэффициент уширения, соответствующий расчетному соплу. Однако при этом было сделано допущение, что термодинамические параметры потока в выходном сечении сопла, в частности, показатель адиабаты, равны параметрам в камере. Однако это не так. В ходе проектирования соплового блока были получены переменные термодинамические параметры потока, на основе которых необходимо провести поиск коэффициента уширения сопла, обеспечивающего заданную нерасчетность сопла $n_c = p_a / p_n$, т.е. отношение давления в выходном сечении к давлению окружающей среды. Примем требуемую нерасчетность равной $n = 1$. Тогда требуемое давление в выходном сечении сопла равно $p_a = 72484$ Па (проектирование ведется для высоты полета $H = 3000$ м).

При решении получены следующие значения:

- коэффициент уширения сопла: $v_a = 17,611$;
- безразмерная скорость потока в выходном сечении сопла: $\lambda_a = 2,364$;
- температура газов на выходе из сопла: $T_a = 563,107$ К.

Для расчета осредненных тепловых потерь $\chi_{\text{тепл}}$ в камере необходимо задаться параметрами теплоотдачи и площадью поверхности охлаждения:

- постоянная коэффициента теплоотдачи теплоизолированной поверхности $\sigma_T = 300 \text{ Дж} \cdot \text{м} / (\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{с})$;
- относительная разность температур газа и стенки $\nu_T = 0.7$;
- площадь поверхности охлаждения $F_{\text{охл}} = 0,752 \text{ м}^2$.

Коэффициент, учитывающий наличие к-фазы:

$$\chi_T = \sqrt{\frac{1}{1-z} \left[1 + \frac{z}{1-z} \left(\frac{C_s}{C_p(p_0, T_0)} K_T + \frac{k(p_0, T_0) - 1}{k(p_0, T_0) + 1} K_V^2 \lambda_a^2 \right) \right]} = 1, \quad (31)$$

Коэффициент тепловых потерь:

$$\chi_{\text{менл}} = 1 - \frac{\sigma_T \nu_T F_{\text{охл}} p_0}{Q_{\text{жс}} R(p_0, T_0) G_T} - \frac{k(p_0, T_0)}{k(p_0, T_0) - 1} \frac{p_0}{\rho_T Q_{\text{жс}}} = 0,906, \quad (32)$$

где G_T - средний газоприход от горения топлива, который находится как:

$$G_T = \frac{\omega}{t_p} = 74,25 \text{ кг/с}. \quad (33)$$

Площадь критического сечения для общего случая при наличии к-фазы определяется по формуле:

$$F_{kp} = \sqrt{\frac{k(p_0, T_0) - 1}{k(p_0, T_0)}} \chi_{\text{менл}} Q_{\text{жс}} \frac{G_T}{\mu_c A(k(p_0, T_0)) p_0 \chi_T} \frac{1}{\chi_T} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad (34)$$

где $\mu_c = 0,95$ - коэффициент расхода.

Диаметр критики:

$$D_{kp} = \sqrt{\frac{4F_{kp}}{\pi}} = 0,0343 \text{ м} \quad (35)$$

5. Определение массы навески воспламенителя

Запуск двигательной установки (ДУ), или период воспламенения, является одним из наиболее важных периодов работы ДУ. Надежность и быстрота воспламенения заряда твердого топлива (ТТ) определяют надежность и быстродействие всего комплекса. Требования технического задания на проектирование ДУ по температурному диапазону функционирования $-50 \dots +50^\circ\text{C}$ накладывают дополнительные сложности при выборе типа и определении массы воспламенителя. Даже небольшая нехватка воспламенителя приводит к таким нежелательным последствиям, как неустойчивое воспламенение, частичное воспламенение или отсутствие воспламенения вообще. Избыток воспламенителя

обуславливает значительный заброс давления в камере, что снижает надежность ДУ и увеличивает ее массу.

Теоретический способ определения массы навески воспламенителя основан на различных допущениях при моделировании процесса воспламенения. Рассмотрим основные особенности теоретического определения массы навески воспламенителя [5].

Для марок воспламенителей, используемых на практике, можно считать, что скорость горения воспламенителя u_g не зависит от давления и составляет 0,05 м/с.

Закон изменения площади поверхности горения выглядит следующим образом:

$$S_g = S_{0g} e^{-m \frac{t}{t_g}}. \quad (36)$$

где S_{0g} - начальная площадь горения воспламенителя; m - показатель депрессивности горения воспламенителя; $t_g = \frac{e_g}{u_g}$ - время горения воспламенителя; e_g - толщина горящего свода.

Для определения момента вспышки воспользуемся зависимостью, характеризующей динамическое равновесие (модель процесса теплопередачи). При этом количество теплоты, поступающее от продуктов сгорания воспламенителя, аккумулируется в реакционном слое, что приводит к полному его выгоранию:

$$\alpha(T_g - T_s) = c_T \delta u(T_s - T_n), \quad (37)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от газов к топливу, T_g - температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки ТТ; T_s - температура вспышки ТТ, T_n - начальная температура ТТ, c_T - удельная теплоемкость ТТ.

Температуру T_g можно считать постоянной и определить по формуле:

$$T_g = \frac{k-1}{k} \frac{Q_B}{R}. \quad (38)$$

Давление вспышки:

$$p_{всп} = \left(\frac{3 \lambda}{2 u_1} \frac{R_g}{\sigma_T t_{всп}} \frac{(T_s - T_n)}{1 + \frac{T_s + T_n}{2 T_g}} \right)^{\frac{1}{1+\nu}}, \quad (39)$$

где λ - коэффициент теплопроводности ТТ.

Уравнение, описывающее изменение давления в камере за счет автономного горения воспламенителя, можно получить из общей системы уравнений внутренней баллистики РДТТ.

Полагая, что к моменту вспышки топлива объем камеры изменился несущественно, получаем:

$$\frac{dp_{\epsilon}}{dt} = b_1 e^{-\frac{m}{t_{\epsilon}}} - b_2 p, \quad (40)$$

где $b_1 = \frac{k-1}{W_0} Q_{\epsilon} S_{0\epsilon} u_{\epsilon} \delta_{\epsilon}$; $b_2 = \frac{k}{W_0} \sqrt{R_{\epsilon} T_{\epsilon}} A_1 F_{\kappa p} + \frac{k-1}{W_0} \frac{\sigma_T v_T F_{охл}}{R_{\epsilon}}$, $F_{охл} = \pi D_n l$ – площадь поверхности охлаждения КС, A_1 – расходный комплекс.

Решение уравнения:

$$p_{\epsilon} = \left(p_a + \frac{b_1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} \right) e^{-b_2 t} - \frac{b_1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} e^{-\frac{m}{t_{\epsilon}}}. \quad (41)$$

После преобразований имеем следующие уравнения для определения максимального давления и времени достижения этого давления:

$$p_{\epsilon \max} = \frac{b_1}{b_2} \left(\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} \right)^{\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} - m}; \quad (42)$$

$$t_{\epsilon \max} = \frac{1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} \ln \frac{m}{b_2 t_{\epsilon}}. \quad (43)$$

Для надежного воспламенения при температуре -50°C давление $p_{\text{вmax}}$ необходимо выбирать из условия:

$$p_{\epsilon \max} = 1,1 \dots 1,2 p_{\text{всп}-50}. \quad (44)$$

Подставляя в выражение для давления значение b_1 , получим соотношение для нахождения начальной площади поверхности горения воспламенителя:

$$S_{0\epsilon} = \frac{W_0 p_{\epsilon \max} b_2 \left(\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} \right)^{\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} - m}}{(k-1) Q_{\epsilon} u_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}. \quad (45)$$

Массу навески воспламенителя определим по формуле:

$$m_{\epsilon} = \delta_{\epsilon} e_{\epsilon} S_{0\epsilon} \frac{1 - e^{-m}}{m}. \quad (46)$$

В таблице 1 представлены характеристики воспламенителя.

Таблица 4. Характеристики воспламенителя

Газовая постоянная R_B , Дж/(кг·К)	314
Теплота сгорания Q_B , Дж/кг	$3050 \cdot 10^3$

Скорость горения u_B , м/с	0,05
Показатель адиабаты k	1,25
Плотность ρ_B , кг/м ³	1700
Показатель депрессивности m	2 – 4
Толщина горящего свода зерна воспламенителя e_B , м	$(3-5) \cdot 10^{-3}$

Начальный свободный объем задаем как:

$$W_0 = W_{KC} - W_{зар} + W_{ц}, \quad (47)$$

где W_{KC} - объем камеры сгорания, $W_{KC} = 1,1 \cdot \frac{\pi D_n^2}{4} l$, где 1,1 используется как поправка на

свободные объемы, и иными элементами; $W_{зар} = \frac{\omega}{\rho_T}$ - объем заряда.

Подставляя данные в формулу (39), получим давление вспышки равное: $p_{всп} = 1,12$ МПа.

Проварьируем параметры воспламенительного состава для нахождения оптимального варианта навески воспламенителя: показатель депрессивности и толщину горящего свода. В качестве воспламенителя воспользуемся порохом КЗДП (крупнозернистый дымный порох). Это достаточно недорогое и надежное решение, однако, обладает лишь ограниченным диапазоном применения (невысокие давления вспышки и температуры) и повышенной чувствительностью к условиям хранения (гигроскопичностью).

По результатам расчетов (л/р №2), выполненных для различных комбинаций параметров воспламенителя имеем следующие параметры снаряжения ДУ:

- начальный свободный объём: $W_0 = 0,000121$ м³;
- толщину горящего свода воспламенителя $e_g = 0,003$ м;
- показатель депрессивности воспламенителя $m = 4$.

Отсюда масса навески воспламенителя равна $m_g = 1,153$ г.

На рисунке 4. представлена кривая давления воспламенителя для выбранных параметров.

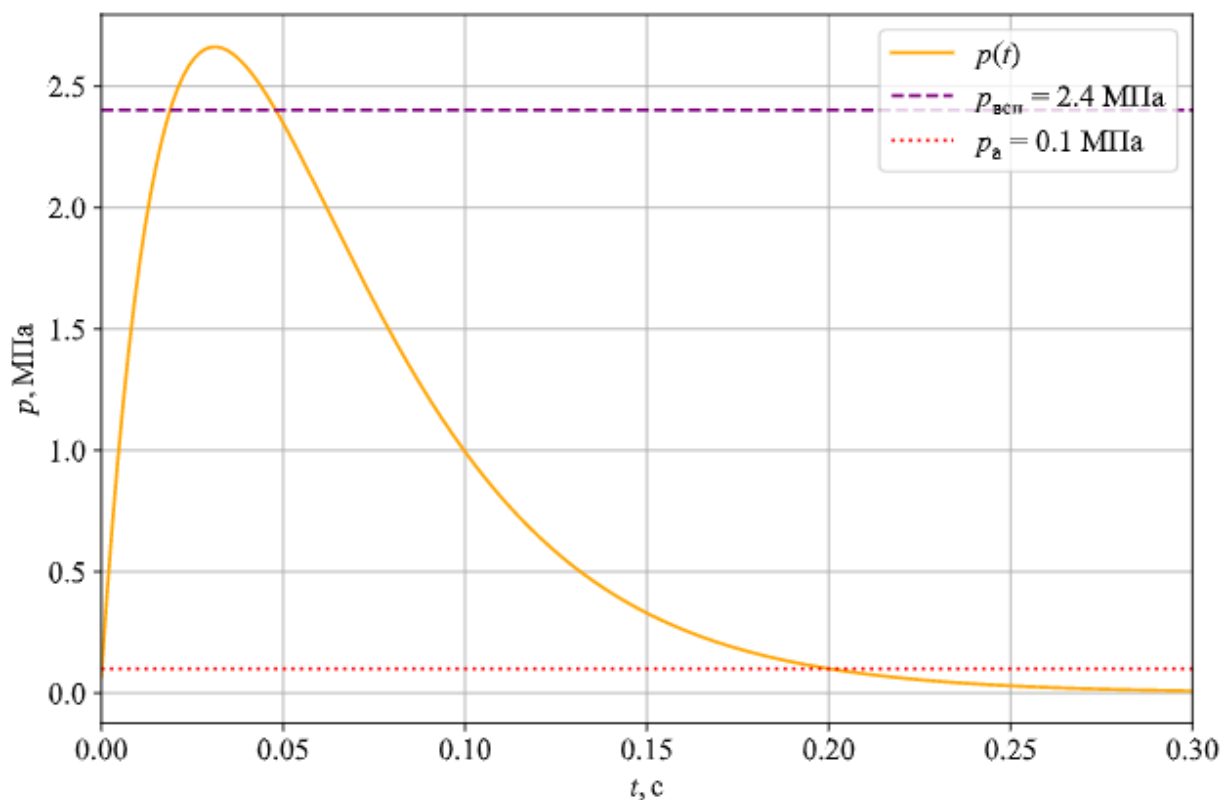


Рис. 4. Представлена кривая давления воспламенителя для выбранных параметров

6. Расчет ОЗВБ и подтверждение заданных в ТТЗ параметров

Для расчета ОЗВБ необходимо решить систему дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases}
 \frac{dp}{dt} = \left[(k-1) \frac{Q_{жс}}{\rho_T S_T u_T} \frac{d\omega_6}{dt} + (k-1) Q_{жс} - \chi_T^2 \cdot k \left(\mu A(k) \frac{F_{кр} p N_c}{\rho_T S_T u_T} \right)^2 - \right. \\
 \left. - (k-1) \frac{\sigma_T v_T F_{охл} p}{R \rho_T S_T u_T} - \frac{kp}{\rho_6 \rho_T S_T u_T} \frac{d\omega_6}{dt} - \frac{kp}{\rho_T} \right] \frac{\rho_T S_T u_T}{W}; \\
 \frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho_T} \frac{d\omega_T}{dt} + \frac{1}{\rho_6} \frac{d\omega_6}{dt} - \frac{1}{\rho_{\kappa-фаза}} \frac{z_{\kappa-фаза}}{1-z_{\kappa-фаза}} \frac{d\omega_{\kappa-фаза}}{dt}; \\
 \frac{d\omega_T}{dt} = S_T \rho_T \frac{de}{dt}; \\
 \frac{d\omega_6}{dt} = S_{T60} e^{-m \frac{t}{t_6}} u_6 \rho_6 \xi_6(t); \\
 \frac{de}{dt} = u_1 p^\nu F_3(T_n) F_3(\kappa) \xi_p(t) \xi_z(t).
 \end{cases} \quad (48)$$

Переключатели:

$$\xi_p(t) = \begin{cases} 1 & \text{если } p > p_{всп} \text{ и } z > 0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (49)$$

$$\xi_e(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_e, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (50)$$

$$\xi_e(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq e \leq e_0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (51)$$

$$F_3(\kappa) = \begin{cases} A + (\kappa - \kappa_{\text{нор}}), & \text{если } \kappa > \kappa_{\text{нор}} \\ 1 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (52)$$

Начальные условия:

- давление равно давлению окружающей среды 70120 Па;
- $t_0 = 0$;
- $e = 0$.

Система дифференциальных уравнений (48) интегрировалась с помощью метода Рунге-Кутты 4 порядка точности. По результатам решения имеем следующие индикаторные кривые давления в КС для трех начальных температур заряда.

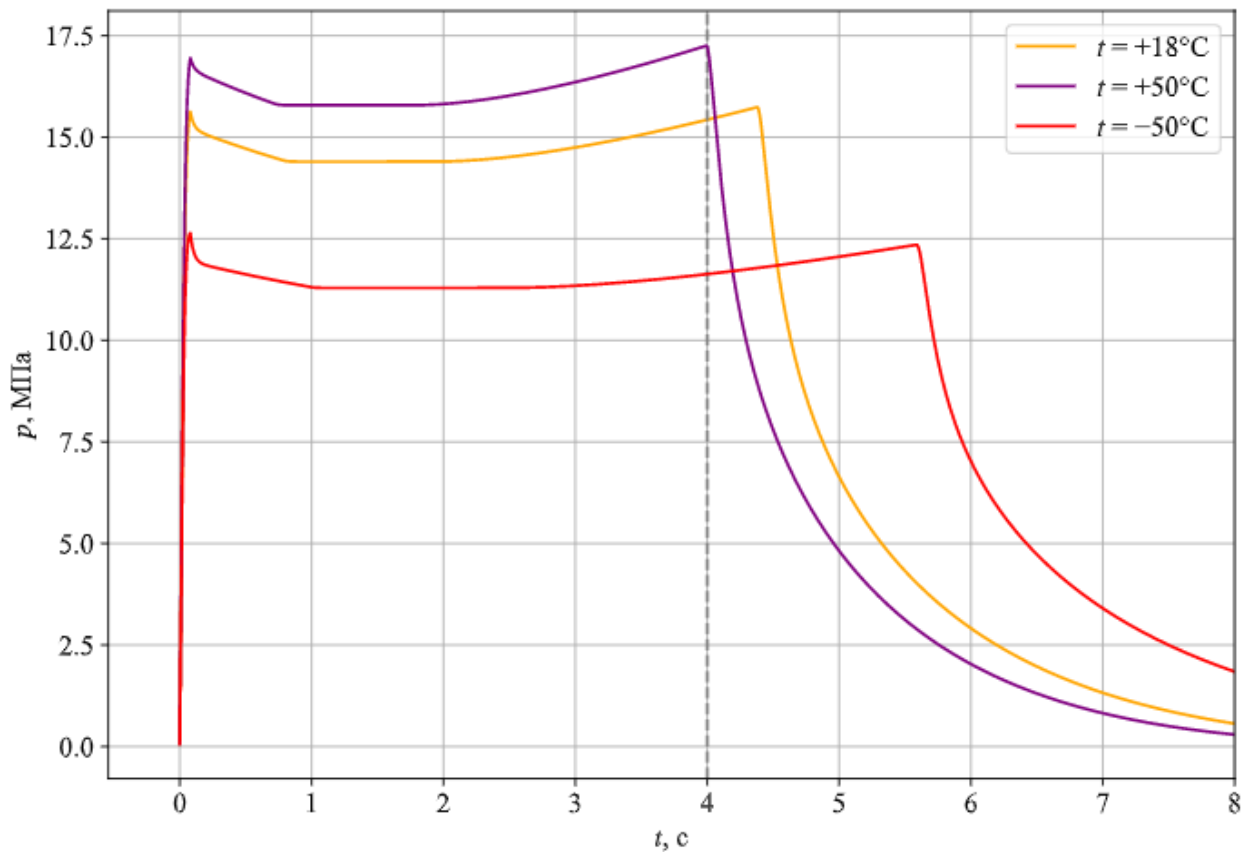


Рис. 5. Индикаторные кривые давления в КС для трех начальных температур заряда

Тягу рассчитаем по следующей формуле:

$$P = G_r V_a + (p_a - p_n) F_a, \quad (52)$$

где $G_F = \rho_T S_F u_F$,

По результатам расчетов имеем следующие кривые тяги (рис. 6), удельной тяги (рис. 7) и расхода (рис. 8) ДУ при трех начальных температурах заряда.

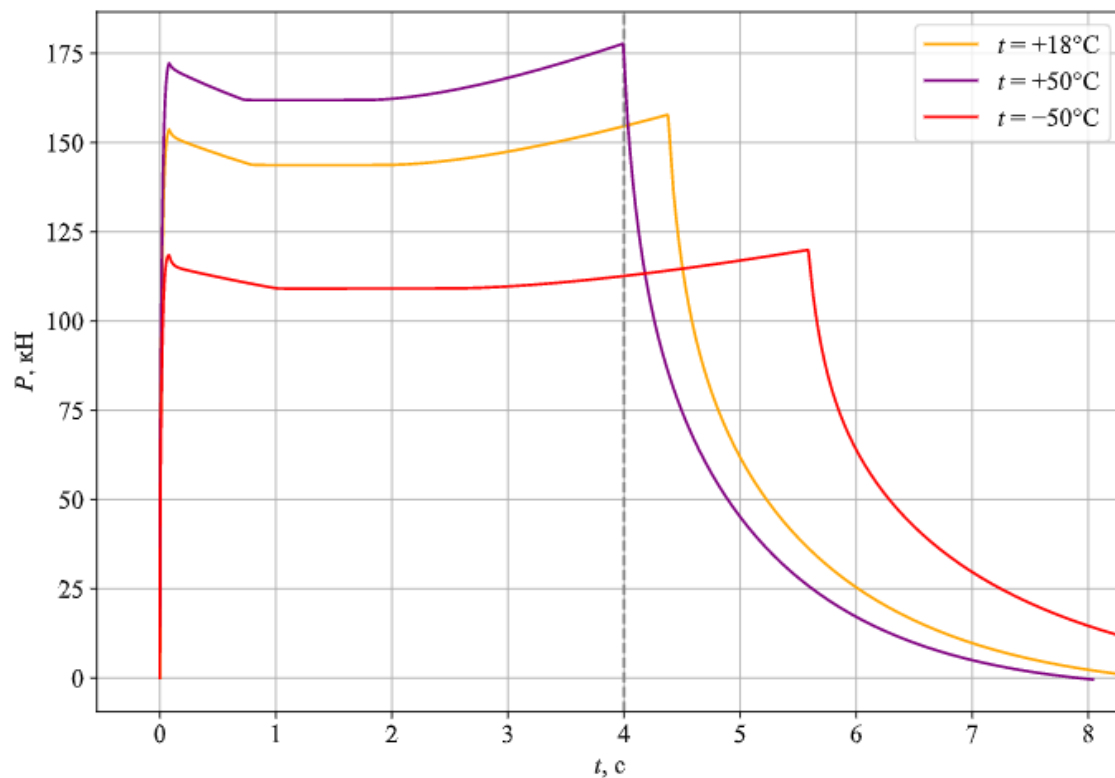


Рис. 6. Тяга двигателя при трех начальных температурах заряда

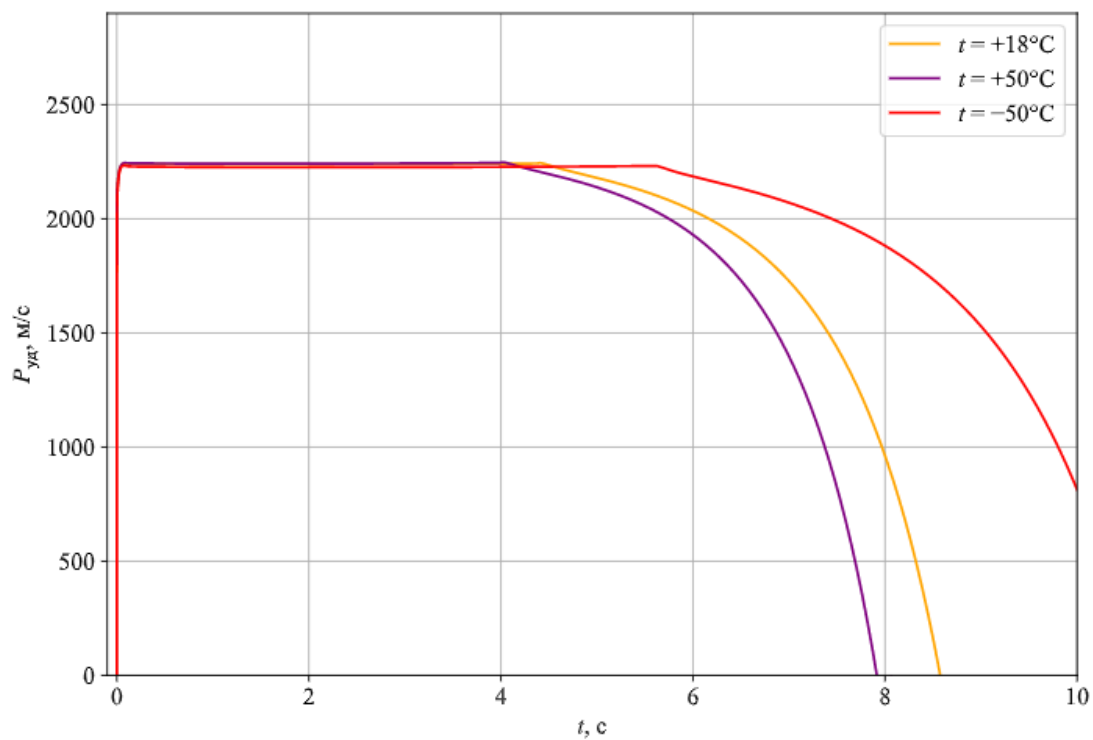


Рис. 7. Удельная тяга двигателя при трех начальных температурах заряда

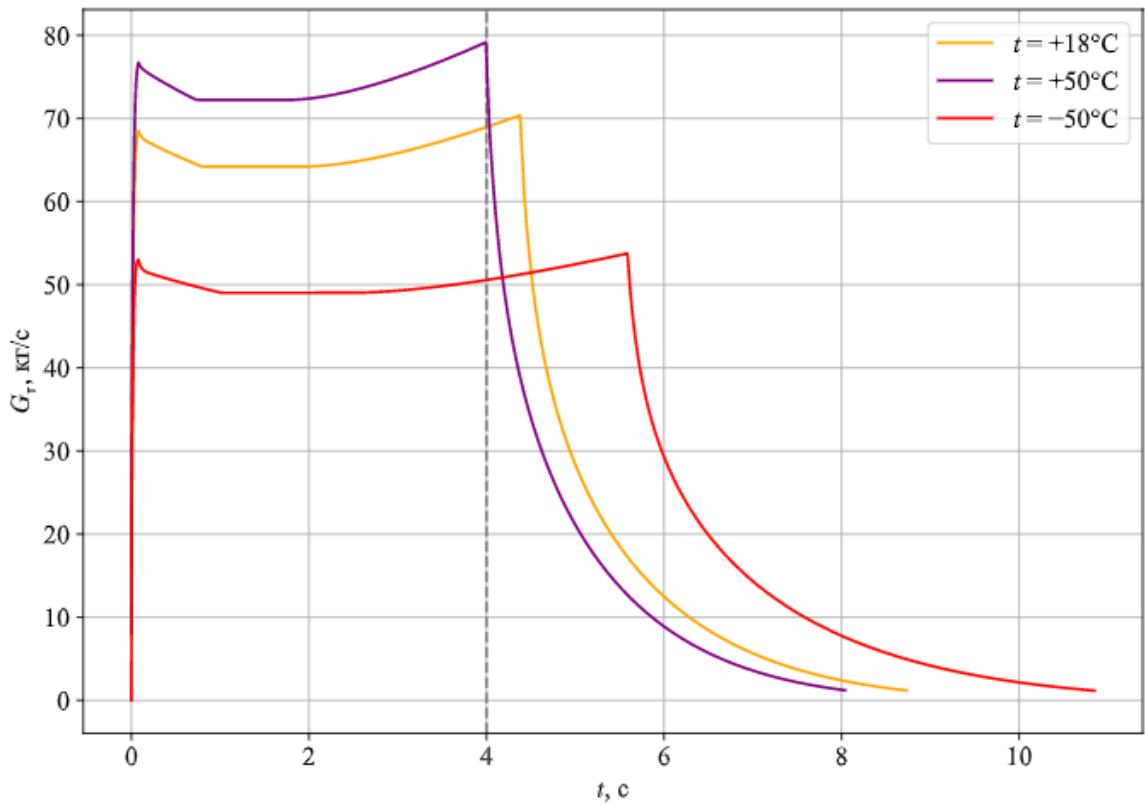


Рис. 8. Массовый расход при трех начальных температурах заряда

Суммарный импульс вычисляется как интеграл от тяги по времени:

$$I_{\Sigma} = \int_0^t P(t) dt. \quad (53)$$

Значения суммарного импульса для трех начальных температур заряда:

- при $+18^{\circ}\text{C}$ $I_{\Sigma+18} = 877038 \text{ Н}\cdot\text{с}$;
- при $+50^{\circ}\text{C}$ $I_{\Sigma+50} = 950134 \text{ Н}\cdot\text{с}$;
- при -50°C $I_{\Sigma-50} = 739834 \text{ Н}\cdot\text{с}$.

Во всех случаях суммарный импульс немного больше необходимого ($650000 \text{ Н}\cdot\text{с}$), что является признаком правильно спроектированной ДУ.

Удельный импульс вычисляется как деление суммарного импульса на массу топлива (масса топлива 288 кг):

$$I_{y\partial} = \frac{I_{\Sigma}}{\omega}. \quad (54)$$

Значения удельного импульса для трех начальных температур заряда:

- при $+18^{\circ}\text{C}$ $I_{y\partial+18} = 3043 \text{ м/с}$;
- при $+50^{\circ}\text{C}$ $I_{y\partial+50} = 3297 \text{ м/с}$;
- при -50°C $I_{y\partial-50} = 2567 \text{ м/с}$.

Средний расход определяется как:

$$G_{cp} = \frac{N_c \mu_c A(k) p F_{kp}}{\sqrt{\chi R_g T_0}} = 79,46 \text{ кг}$$

7. Теоретический контур ДУ

Контур ДУ выполняется исходя из данных, приведенных в массовом анализе. Имеем наружный диаметр ДУ 360 мм, толщину стенки – 1,5 мм, ТЗП на обечайке, переднем днище и заднем днище – 4 мм. Профиль сопла был рассчитан в л/р №3. Толщина стенок сопла – 3 мм, диаметр входной части сопла 343 мм, диаметр критики – 88.2 мм, диаметр выходного сечения – 336 мм, длина заряда – 2476.8 мм, угол полураствора заднего днища 50°. Общая длина ДУ – 2872 мм (удовлетворяет условию по максимальной длине ДУ – 3250 мм).

Заключение

В результате выполнения домашнего задания было выполнено следующее:

- в результате массового анализа найдена масса конструкции $m_{кду} = 9,389$ кг и потребный запас топлива $\omega = 288$ (масса снаряженной ДУ 297,569 кг не превосходит максимальную массу 375 кг) исходя из выбранного давления в КС (17,5 МПа), комбинации топлива (топливо №1 табл. 1) и материалов элементов конструкции ДУ (материал №2). Совокупность выбранных параметров обеспечивает суммарный импульс при начальной температуре заряда -50°C – 739834 Н·с (необходимо 650000 Н·с);
- произведено проектирование заряда, который обеспечивает потребную площадь поверхности горения $S_{нотр} = 5,833$ м² и закон горения, близкий к нейтральному, масса заряда совпадает с полученной из массового анализа, длина заряда $l_{gr} = 2,4768$ м;
- произведен пересчет площади критического сечения вследствие изменения коэффициентов учета к-фазы и тепловых потерь, а также вследствие изменения коэффициента уширения сопла и безразмерной скорости потока в выходном сечении (первоначальные значения $\lambda_a = 2,236$ и $v_a = 16,2$, уточненные значения $\lambda_a = 2,364$ и $v_a = 17,61$. Это вызвано изменением показателя адиабаты газов. Площадь критического сечения равна $F_{кр} = 5,04 \cdot 10^{-3}$ м², откуда диаметр критики равен $D_{кр} = 0,0801$ м;
- произведен расчет массы навески воспламенителя, который обеспечивает гарантированное воспламенение топлива для заданного интервала начальных температур заряда и последующее устойчивое горение топлива, при этом не вызывая серьезного всплеска давления во период совместного горения топлива и воспламенителя. Масса навески равна $m_g = 1,153$, давление вспышки топлива принято равным 2,4 МПа, температуру вспышки принята $T_s = 500$ К;
- произведено решение основной задачи внутренней баллистики РДТТ посредством интегрирования системы дифференциальных уравнений внутренней баллистики РДТТ. По результатам решения задачи были построены индикаторные кривые давления в камере РДТТ для трех начальных температур заряда, при этом при нормальных условиях ($+20^{\circ}\text{C}$) давление в КС соответствует номинальному (17,5 МПа) Повышение давления ближе к концу горения заряда обусловлено прогрессивным характером горения заряда;

- произведена проверка соответствия параметров ДУ (тяги и суммарного импульса) заданным в ТЗ значениям, суммарный импульс обеспечивается при любых начальных температурах заряда (при $+18^{\circ}\text{C}$ $I_{\Sigma+18} = 877038 \text{ Н}\cdot\text{с}$; при $+50^{\circ}\text{C}$ $I_{\Sigma+50} = 950134 \text{ Н}\cdot\text{с}$; при -50°C $I_{\Sigma-50} = 739834 \text{ Н}\cdot\text{с}$, необходимый суммарный импульс $650000 \text{ Н}\cdot\text{с}$);
- произведена проработка теоретического контура ДУ, отображающая его основные элементы и размеры этих элементов, общая длина ДУ не превосходит максимальную длину по ТЗ (2872 мм при 3250 мм максимальных).

Список литературы

1. Федоров А.А. Расчетное определение оптимального давления в камере РДТТ на основе критерия минимума массы: Методические указания по выполнению лабораторной работы – М.: Издво МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 28 с., ил.
2. Курс лекций по дисциплине «Проектирование энергетических установок РО» Федоров А.А. Раздел 4 «Выбор давления в камере РДТТ».
3. Серпинский О.С. Методика проектирования заряда с каналом звездообразного сечения (методические указания).
4. Профилирование сопла и расчет тепловых потоков по его тракту: Методические указания по выполнению лабораторной работы – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 52 с., ил.
5. Исследование и расчет РДТТ: учеб. пособие по курсу «Проектирование энергетических установок ракетного оружия», «Специальные двигатели ракетного оружия». — Ч. 1: Исследование и расчет автономного горения воспламенителя / И.О. Толкачева, М.А. Максимов, И.Е. Никитина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 40 с.

