



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:

Баллистика ракетного и ствольного оружия

НА ТЕМУ:

«Внутрибаллистическое проектирование РДТТ»

ВАРИАНТ № 15
СОСТАВ ТРТ № 12-1

Выполнил: студент группы СМ6-71 _____
(подпись, дата) _____ Гарпинич Д.Н.
(И.О. Фамилия)

Проверил _____
(подпись, дата) _____ Федотова К.В.
(И.О. Фамилия)

Москва, 2021 г.

Оглавление

Исходные данные	3
1. Термодинамический расчет	5
2. Определение диапазонов варьирования входных проектных параметров .	6
3. Обоснование проектных параметров РДТТ	11
3.1. Определение номинального давления в камере сгорания	11
3.2. Выбор формы топливного заряда и определение его геометрических характеристик	12
3.3. Определение массовых и габаритных характеристик РДТТ	15
4. Геометрические параметры ТРТ	21
5. Решение ПЗВБ РДТТ	23

Исходные данные

Таблица 1. Исходные данные

Основные исходные данные				
Наружный диаметр РДТТ D_n , мм				610
Полный импульс тяги РДТТ I_P , кН·с				2250
Продолжительность работы РДТТ в номинальном режиме $t_{ном}$, с				20
Примечание (образец / комплекс)				ОТРК АТАСМС (США)
Характеристики ТРТ				
Краткое обозначение	Содержание, %	Условная химическая формула	Δh_{f298}^0 , кДж / кг	ρ , кг/м ³
ПБКГ	14	$C_{7.075}H_{10.65}O_{0.223}N_{0.063}$	-890	920
ПХА	66	NH_4ClO_4	-2510	1950
Гидрид алюминия	20	AlH_3	-420	1500
Параметры закона горения ТРТ				
u_1 , мм/с·МПа			4,38	
ν			0,29	
u , мм/с ($p = 5$ МПа)			7,0	
D_t , 1/К			0,002	

Таблица 1. Продолжение

Характеристики воспламенительного состава	
Состав	ДРП
Содержание компонентов	74% KNO ₃ 13,6% C 10,4% S 2% H ₂ O
Δh_f^0 , кДж / кг	-3940
Зависимость скорости горения от давления (u в мм / с)	$u = 11,7 \left(\frac{p}{98066,5} \right)^{0,226}$
К-т температурной чувствительности скорости горения $D_{тв}$, 1/К	0,001
δ , кг/м ³	1750
Характеристики материала корпуса РДТТ (AISI 4340)	
Плотность ρ_k , кг/м ³	7800
Предел прочности $\sigma_{вр}$, МПа	1830
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	1830
Характеристики материалов теплозащитных покрытий (ТЗП)	
Плотность материала ТЗП камеры $\rho_{п}$, кг/м ³	1500
Плотность материала ТЗП сопла $\rho_{пс}$, кг/м ³	1750
Плотность материала защитно-крепящего слоя (ЗКС) $\rho_{зкс}$, кг/м ³	920
Плотность материала вкладыша критического сечения $\rho_{вкс}$, кг/м ³	2200

1. Термодинамический расчет

Для заданного состава СТРТ проводится расчёт в программе «*Terra*». Давление в камере 4 МПа, давление атмосферное 0,1 МПа, режим адиабатического расширения, расширение «замороженное».

Полученные данные для трех участков ДУ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результат термодинамического расчёта

Параметры термодинамического равновесия					
p , МПа	4	I , кДж / кг	-1865,2	T_p , К	2999,5
Теплофизические характеристики продуктов сгорания					
c_p , Дж / (кг·К)	2,2367	R_g , Дж / (кг·К)	550,84	z	0,3239
c_{pg} , Дж / (кг·К)	2,5429	λ_g , Дж / (кг·К)	0,48726	μ_g , Па·с	$0,8363 \cdot 10^{-4}$
Параметры потока в критическом сечении сопла					
β , м / с	1649,3	$I_{удп}$, м / с	2039,5	n	1,1604
Параметры потока в выходном сечении сопла (равновесное расширение)					
v_a , м / с	2550,2	$I_{удп}$, м / с	2812,2	n	1,1619
Параметры потока в выходном сечении сопла («замороженное» расширение)					
v_a , м / с	2532	$I_{удп}$, м / с	2786,4	n	1,1755

2. Определение диапазонов варьирования входных проектных параметров

Входными проектными параметрами являются относительная площадь выходного сечения сопла f_a и степень расширения сопла v_a :

$$; v_a = \frac{F_a}{F_{кр}}.$$

Чтобы определить рациональные диапазоны варьирования проектных параметров необходимо определить границы области допустимых баллистических решений (ОДБР). При решении данной задачи используются следующие ограничения:

- по уровню номинального давления ($p_{ном} = p_{min} \dots p_{max}$, где $p_{min} = 4$ МПа, а $p_{max} = 20$ МПа);
- по отсутствию перерасширения сопла ($p_a \geq p_h$, где $p_h = 0,1$ МПа);
- по удельному импульсу ($I_{уд} \geq I_{уд min}$);
- по поперечным габаритам сопла ($f_a \geq f_{a max}$, где $f_{a max} = 0,9$).

Определение границ ОДБР начинается с нахождения точек пересечения границы $p_a = p_h$ с границами $p_{ном} = p_{min}$ (точка 1) и $p_{ном} = p_{max}$ (точка 2). При заданном давлении ($p = p_{ном}$) приведённая скорость потока в выходном сечении сопла для заданных точек находится из газодинамической (ГД) функции (1)

$$\lambda_a(p) = \lambda_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{n-1}{n}}}, \quad (1)$$

где

$$\lambda_{max} = \sqrt{\frac{n+1}{n-1}}.$$

Показатель политропы n во всех расчётах равен показателю политропы в выходном сечении сопла для «замороженного» адиабатического расширения, если не указывается иное значение.

Относительная площадь выходного сечения сопла, необходимая для обеспечения заданного уровня тяги, определяется по формуле (2)

$$f_a(p, \lambda_a) = \frac{\eta_f}{\frac{P}{p_h}(\lambda_a^2 + 1)\varepsilon(\lambda_a)\zeta(\lambda_a) - 1}, \quad (2)$$

где:

- приведённая тяга (η_f) определяется по формуле

$$\eta_f = \frac{P}{p_h F_m},$$

где площадь миделя ЛА (F_m) определяется по формуле

$$F_m = \frac{\pi D_H^2}{4};$$

- ГД функция ε определяется по формуле

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

где показатель адиабаты равен показателю политропы ($k = n$);

- поправочный коэффициент, учитывающий потери тяги и удельного импульса, обусловленные наличием конденсированной фазы в продуктах сгорания (ζ) определяется по формуле

$$\zeta(\lambda_a) = (1 - z) + z \frac{2k}{k+1} \frac{\lambda_a^2}{\lambda_a^2 + 1}.$$

Удельный импульс двигателя, реализуемый в точках 1 и 2, определяется по формуле (3)

$$I_{уд}(p, \lambda_a) = \beta \left((\lambda_a + \lambda_a^{-1})\varepsilon(1)\zeta(\lambda_a) - \frac{p_h}{p} \frac{1}{q(\lambda_a)} \right). \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{R_{cm}\chi T_p}}{A_n},$$

где:

$$R_{\text{см}} = R_g (1 - z); A_n = \sqrt{n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}}.$$

Для постоянной расхода (A_n) используется показатель политропы (n), соответствующий критическому сечению сопла.

Значение, полученное при определении удельного импульса двигателя в точке 1, является минимальным на линии 1 – 2 ($I_{\text{уд}1}$). Приведённая скорость потока в точке 3, для которой $p_{\text{ном}} = p_{\text{max}}$ и $I_{\text{уд}} = I_{\text{уд}1}$, определяется итерационным путём из условия

$$I_{\text{уд}}(p_{\text{max}}, \lambda_{a3}) = I_{\text{уд}1},$$

где значение λ_{a3} определяется из диапазона $1 \dots \lambda_{a1}$.

Определив значения λ_{a3} определяется значение f_{a3} по формуле (2).

Также для точек 1, 2 и 3 определяются ГД функции v_a и p_a :

$$v_a(\lambda_a) = \frac{1}{q(\lambda_a)}; \quad (3)$$

$$p_a(p, \lambda_a) = p\pi(\lambda_a), \quad (4)$$

где ГД функции q и π определяются по формулам:

$$q(\lambda_a) = \frac{\lambda_a \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}}; \quad \pi(\lambda_a) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Результаты расчётов параметров в точках 1, 2, 3 по формулам (1 – 4) представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения параметров в трёх точках

Точка	λ_a	v_a	f_a	$p_{\text{ном, ном}}$ МПа	p_a / p_h	$I_{\text{уд}}$, м / с
1	2,29	6,23	0,40	4	1	2421
2	2,60	21,57	0,24	20	1	2788
3	2,03	3,07	0,04	20	13,22	2421

Границы ОДБР в координатах (v_a, f_a) определяются параметрическим способом. Для этого с некоторым шагом (0,001) задаются диапазоны значений λ_a , соответствующие линиям 1–2, 3–2 и 3–1. Для каждой линии определяются значения v_a по формуле (3) и значения f_a :

- для линии 1–2 ($p_a = p_h$)

$$f_a(\lambda_a) = \frac{\eta_f}{\frac{p_a}{p_h} \frac{\lambda_a^2 + 1}{\tau(\lambda_a)} \zeta(\lambda_a) - 1},$$

где

$$\tau(\lambda_a) = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2;$$

- для линии 3–2 ($p_{\text{ном}} = p_{\text{max}}$) расчёт выполняется по формуле (2);
- для линии 3–1 ($I_{\text{уд}} = I_{\text{уд1}}$)

$$f_a(\lambda_a) = \eta_f \left(\frac{\beta}{I_{\text{уд}}} (\lambda_a + \lambda_a^{-1}) \varepsilon(1) \zeta(\lambda_a) - 1 \right).$$

График границ ОДБР, построенных в координатах (v_a, f_a) , представлен на рис.1.

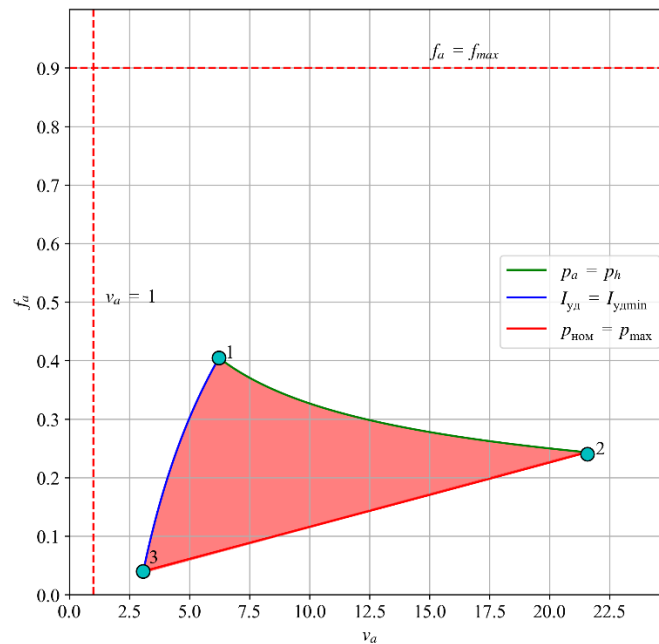


Рис. 1. Границы ОДБР

В качестве опорного значения рассматривается $f_a = f_{a2}$.

Минимальное значение λ_a , соответствующее f_a , равняется большему из корней уравнения

$$a\lambda_a^2 + b\lambda_a + c = 0,$$

где коэффициенты a , b и c равны:

$$a = 1 + z \frac{n-1}{n+1};$$

$$b = -\frac{I_{уд1}}{\beta\varepsilon(1)} \left(1 + \frac{f_a}{\eta_f} \right);$$

$$c = 1 - z.$$

Максимальное значение λ_a , соответствующее f_a , при $f_a = f_{a2}$ равняется λ_{a2} .

Полученные значения $\lambda_{a \min}$ и $\lambda_{a \max}$ представлены в табл. 4 (1 и 11 точки соответственно).

3. Обоснование проектных параметров РДТТ

С помощью заданных величин D_n , I_p , $t_{\text{ном}}$ и известных характеристиках ТРТ сочетание f_a и λ_a определяются все оставшиеся проектные параметры РДТТ.

Диапазон значений $\lambda_{a \min} \dots \lambda_{a \max}$ разбивается на 11 расчётных точек. Для каждой точки проводится ряд вычислений, позволяющих определить массовые и габаритные характеристики РДТТ. После сравнения полученных вариантов осуществляется выбор наилучшего на основе определённого критерия качества.

3.1. Определение номинального давления в камере сгорания

Удельный импульс двигателя в атмосфере (из условия заданного уровня тяги) определяется по формуле (5)

$$I_{\text{уд}}(I_{\text{удп}}) = I_{\text{удп}}(\lambda_a) \frac{\eta_f}{\eta_f + f_a}, \quad (5)$$

где удельный импульс двигателя в пустоте ($I_{\text{удп}}$) рассчитывается по формуле

$$I_{\text{удп}}(\lambda_a) = \beta \left((\lambda_a + \lambda_a^{-1}) \varepsilon(1) \zeta(\lambda_a) \right).$$

Номинальное давление в камере сгорания (КС) определяется по формуле (6):

$$p_{\text{ном}}(v_a, I_{\text{удп}}, I_{\text{уд}}) = p_h \frac{\beta v_a(\lambda_a)}{I_{\text{удп}}(\lambda_a) - I_{\text{уд}}(\lambda_a)}. \quad (6)$$

Также ещё выполняется расчёт давления в выходном сечении сопла (p_a) по формуле (4).

Результаты расчётов значений параметров по формулам (4 – 6) представлены в табл. 4.

Таблица 4. Определение номинального давления в камере сгорания

	λ_a	ν_a	f_a	$p_{\text{ном}}, \text{МПа}$	p_a / p_h	$I_{\text{уд}}, \text{м / с}$
1	2,18	4,466	0,24	4,824	1,892	2424,487
2	2,222	5,037	0,24	5,363	1,785	2459,929
3	2,264	5,72	0,24	6,003	1,684	2495,579
4	2,306	6,54	0,24	6,767	1,587	2531,425
5	2,348	7,535	0,24	7,686	1,494	2567,456
6	2,39	8,749	0,24	8,801	1,405	2603,662
7	2,432	10,245	0,24	10,165	1,321	2640,034
8	2,474	12,107	0,24	11,848	1,24	2676,565
9	2,516	14,447	0,24	13,947	1,163	2713,245
10	2,558	17,422	0,24	16,593	1,089	2750,068
11	2,6	21,25	0,24	19,971	1,018	2787,027

3.2. Выбор формы топливного заряда и определение его геометрических характеристик

Для выбора формы заряда предварительно строится зависимость приведённой толщины свода (e_d) от номинального давления в КС из условия обеспечения заданной продолжительности работы РДТТ (7)

$$e_d(u) = \frac{2}{D_{\text{КС}}} u(p) t_{\text{ном}}, \quad (7)$$

где:

- закон горения определяется по формуле (8)

$$u(p) = u_1 p^v; \quad (8)$$

- внутренний диаметр КС

$$D_{\text{КС}} = 0,96 D_{\text{н}}.$$

По среднему значению диапазона e_d определяется форма заряда. Из результатов, представленных в табл. 5, делается вывод о том, что заряд щелевой с цилиндрическим каналом ($e_d = 0,5 \dots 0,75$).

После выбора формы заряда задаются характерные значения его основных геометрических параметров.

Рекомендуемые значения параметров щелевого заряда:

- количество щелей ($n = 4$);
- относительная длина щели ($\bar{a} = 0,3$);
- относительная ширина щели ($\bar{c} = 0,3$);

Из полученных по формуле (7) значений e_d выбираются точки, для которых выполняется условие применимости для щелевого заряда

$$e_d(u) < 1 - \bar{c}$$

Коэффициент заполнения объёма цилиндрической части КС для заряда щелевого типа рассчитывается по формуле (9)

$$\varepsilon_{\omega}(\varepsilon_f, f_{\text{щ}}) = \varepsilon_f(\bar{d}) - \bar{a}f_{\text{щ}}(\bar{d}), \quad (9)$$

где:

- коэффициент заполнения поперечного сечения КС для заряда щелевого типа рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_f(\bar{d}) = 1 - \bar{d}(e_d)^2$$

где

$$\bar{d}(e_d) = 1 - e_d(u);$$

- относительная суммарная площадь поперечного сечения щелей ($f_{\text{щ}}$)

$$f_{\text{щ}}(\bar{d}) = \frac{n}{\pi} \left(\bar{c} \sqrt{1 - \bar{c}^2} - \bar{c} \sqrt{\bar{d}^2 - \bar{c}^2} + \arcsin(\bar{c}) - \bar{d}^2 \arcsin\left(\frac{\bar{c}}{\bar{d}}\right) \right).$$

Масса топлива (из условия обеспечения заданного полного импульса тяги при реализуемом удельном импульсе) определяется по формуле (10)

$$\omega(I_{\text{уд}}) = \frac{I_P}{I_{\text{уд}}(I_{\text{удп}})}. \quad (10)$$

Длина заряда из условия размещения необходимой массы топлива (11)

$$l_{\text{зар}}(\omega, \varepsilon_{\omega}) = \frac{\omega(I_{\text{уд}})}{\rho_{\text{Т}} \varepsilon_{\omega}(\varepsilon_f, f_{\text{ш}}) F_{\text{КС}}}, \quad (11)$$

где:

- плотность ТРТ определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_{\text{Т}}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\rho_i},$$

где q_i – массовая доля i -го компонента в составе ТРТ;

- площадь КС

$$F_{\text{КС}} = \frac{\pi D_{\text{КС}}^2}{4}.$$

Параметр Победоносцева (начальное значение) для заряда щелевого типа определяется по формуле (12)

$$\kappa(l_{\text{зар}}, e_d) = \frac{4l_{\text{зар}}(\omega, \varepsilon_{\omega})}{D_{\text{КС}}(1 - e_d(u))}. \quad (12)$$

Результаты расчётов значений пармаэтров по формулам (7 – 12) представлены в табл. 5.

Табл. 5. Результаты вычислений

	u , мм / с	e_d	ε_{ω}	ω , кг	$l_{\text{зар}}$, м	κ
1	6,913	0,472	0,703	928,032	3,056	39,549
2	7,129	0,487	0,718	914,66	2,95	39,274
3	7,366	0,503	0,734	901,594	2,846	39,117
4	7,626	0,521	0,751	888,828	2,743	39,106
5	7,913	0,54	0,768	876,354	2,642	39,279
6	8,23	0,562	0,787	864,168	2,544	39,687
7	8,581	0,586	0,806	852,262	2,448	40,406
8	8,971	0,613	0,827	840,63	2,355	41,548
9	9,405	0,642	0,848	829,265	2,266	43,291
10	9,891	0,676	0,869	818,161	2,181	45,925
11	10,437	0,713	0,89	807,312	2,1	49,974

По значениям из табл. 5 строятся графики зависимостей параметров e_d , ε_ω и κ от номинального давления в КС. Графики представлены на рис. 2.

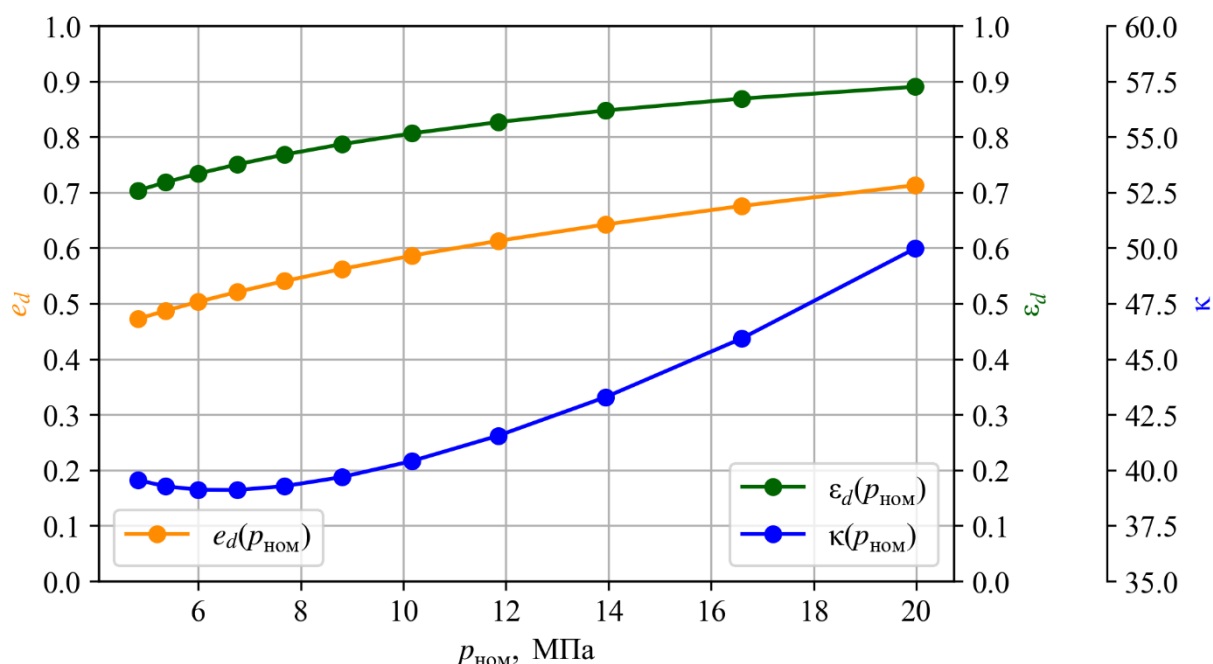


Рис. 2. Графики зависимостей $e_d(p_{\text{ном}})$, $\varepsilon_\omega(p_{\text{ном}})$, $\kappa(p_{\text{ном}})$

3.3. Определение массовых и габаритных характеристик РДТТ

По условию ДЗ топливный заряд скреплён со стенками камеры, сопловой блок имеет одно центральное сопло.

ДУ разбивается на следующие элементы:

- цилиндрическая обечайка с защитно-крепящим слоем (ЗКС);
- эллиптическое переднее днище с ТЗП;
- сопловое днище (эллиптическое с центральным отверстием) с ТЗП;
- коническая дозвуковая часть сопла с ТЗП;
- цилиндрический сопловой стакан и эрозионностойкий вкладыш критического сечения;
- коническая сверхзвуковая часть сопла с ТЗП.

Исходные данные для определения массы конструкции включают в себя геометрические размеры, необходимые для вычисления объёмов элементов,

представленных выше, а также значения плотностей конструкционных и теплозащитных материалов.

Толщина цилиндрической оболочки камеры (13)

$$\delta_{об} = \frac{D_n}{2} \frac{p_p}{\sigma_{вр}}, \quad (13)$$

где p_p – расчётное давление в КС, определяемое на основе давления при максимальной температуре эксплуатации ($T_0 = 323$ К) с учётом поправок

$$p_p = p_{+50} \frac{\sigma_{вр}}{\sigma_{0,2}} k_1 k_2 \eta,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий всплеск давления при совместном горении воспламенителя и основного заряда ($k_1 = 1,1$); k_2 – коэффициент, учитывающий повышение давления, обусловленное разбросом характеристик топлива ($k_2 = 1,2$); η – коэффициент запаса прочности ($\eta = 1,25$).

Давление в КС при $T_0 = 323$ К.

$$p_{+50} = p_{ном} \left(\varphi_t(T_0) \varphi_k(\kappa) \right)^{\frac{1}{1-\nu}},$$

где $\varphi_t(T_0)$, $\varphi_k(\kappa)$ – поправки, учитывающие зависимость скорости горения топлива от начальной температуры заряда T_0 и параметра Победоносцева (при превышении порогового значения ($\kappa_{пор} = 100$))

$$\varphi_t(T_0) = e^{D_t(T_0 - T_{ref})},$$

где $T_{ref} = 293$ К;

$$\varphi_k(\kappa) = \begin{cases} 1 + 0,003(\kappa - \kappa_{пор}), & \text{при } \kappa \geq \kappa_{пор} \\ 1, & \text{при } \kappa < \kappa_{пор} \end{cases},$$

где $\kappa_{пор} = 100$.

Толщина переднего днища КС

$$\delta_{дн1} = \frac{D_n}{2} \frac{p_p}{\sigma_{вр}} \left(\frac{D_n^2}{24b^2} + \frac{1}{3} \right),$$

где меньшая полуось эллиптической образующей (b)

$$b = \frac{D_{\text{н}}}{4}.$$

Толщины остальных элементов ДУ:

- сопловое днище КС $\delta_{\text{дн2}} = \delta_{\text{дн1}}$;
- дозвуковая часть сопла $\delta_{\text{с1}} = 2\delta_{\text{об}}$;
- сверхзвуковая часть сопла $\delta_{\text{с2}} = \delta_{\text{об}}$;
- сопловой стакан $\delta_{\text{ст}} = 3\delta_{\text{об}}$;
- ЗКС в цилиндрической части КС $\delta_{\text{зкс}} = 1 \text{ мм}$;
- ТЗП переднего и соплового днищ КС $\delta_{\text{п1}} = \delta_{\text{п2}} = 6 \text{ мм}$;
- ТЗП дозвуковой части сопла $\delta_{\text{пс1}} = 6 \text{ мм}$;
- ТЗП сверхзвуковой части сопла $\delta_{\text{пс2}} = 3 \text{ мм}$;
- вкладыш критического сечения $\delta_{\text{вкс}} = 15 \text{ мм}$.

Диаметр входного сечения сопла, совпадающий с диаметром центрального отверстия соплового днища, равен

$$D_{\text{вх}} = \frac{D_{\text{н}}}{2}.$$

Диаметры выходного и критического сечений сопла:

$$D_a = \sqrt{\frac{4}{\pi} f_a F_m};$$

$$D_{\text{кр}} = \frac{D_a}{\sqrt{v_a}}.$$

Длина цилиндрической обечайки КС

$$l_{\text{об}} = l_{\text{зар}}.$$

Длины дозвукового и сверхзвукового участков сопла:

$$l_{\text{с1}} = \frac{D_{\text{вх}} - D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \theta_{\text{с1}}};$$

$$l_{\text{с2}} = \frac{D_a - D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \theta_{\text{с2}}},$$

где $\theta_{\text{с1}} = 30^\circ$, $\theta_{\text{с2}} = 15^\circ$.

Длина соплового стакана

$$l_{\text{ст}} = \frac{D_{\text{кр}}}{2}.$$

Длина двигателя (14)

$$l_{\text{дв}} = b + l_{\text{дв}} + b \sqrt{1 - \frac{D_{\text{вх}}^2}{D_{\text{н}}^2}} + l_{\text{с1}} + l_{\text{ст}} + l_{\text{с2}} \dots \quad (14)$$

Элементы ДУ разбиваются на простые формы, объёмы которых вычисляются по формулам:

1. Цилиндрическая оболочка $V_{\text{цил}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2\delta)^2) l$;
2. Коническая оболочка $V_{\text{кон}} = \frac{\pi l \delta}{\cos \theta} \left(\frac{D_{\text{вн1}} + D_{\text{вн2}}}{2} + \frac{\delta}{\cos \theta} \right)$;
3. Эллиптическое днище $V_{\text{элл1}} = \frac{2\pi \delta}{3} \left(\frac{D^2}{4} + Db - (D + b)\delta + \delta^2 \right)$;
4. Эллиптическое днище с центральным отверстием

$$V_{\text{элл2}} = \frac{\pi D^2 b}{6} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{\pi}{6} (D - 2\delta)^2 (b - \delta) \left(1 - \frac{d^2}{(D - 2\delta)^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Плотности материала корпуса, ТЗП, ЗКС и вкладыша критического сечения представлены в табл. 1.

Масса «сухой» ДУ (15)

$$m_{\text{дв0}} = \sum_{i=1}^N \rho_i V_i. \quad (15)$$

Масса снаряженной ДУ (16)

$$m_{\text{дв}} = m_{\text{дв0}} + \omega. \quad (16)$$

Коэффициент конструктивно-массового совершенства (17)

$$\alpha_{\text{дв}} = \frac{m_{\text{дв0}}}{\omega}. \quad (17)$$

Выбор одного лучшего решения для дальнейшей проработки выполняется по критерию качества (18)

$$C_{\text{дв}} = \sqrt{\frac{m_{\text{дв}}}{m_{\text{min}}} \frac{l_{\text{дв}}}{l_{\text{min}}}}, \quad (18)$$

где m_{min} , l_{min} – наименьшие среди рассмотренных вариантов значения массы и длины ДУ (используются для нормирования критерия).

Лучшее решение соответствует минимуму коэффициента качества $C_{\text{дв}}$.

Результаты расчёта формул (13 – 18) представлены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты вычислений

	$\delta_{\text{об}}$, мм	$m_{\text{дв0}}$, кг	$m_{\text{дв}}$, кг	$\alpha_{\text{дв}}$	$l_{\text{дв}}$, мм	$C_{\text{дв}}$
1	1,444	95,206	1023,237	0,103	3846,651	1,131
2	1,605	101,417	1016,077	0,111	3759,129	1,115
3	1,796	108,744	1010,338	0,121	3673,011	1,099
4	2,025	117,429	1006,256	0,132	3588,457	1,084
5	2,3	127,782	1004,137	0,146	3505,65	1,07
6	2,634	140,208	1004,375	0,162	3424,806	1,058
7	3,042	155,234	1007,495	0,182	3346,187	1,047
8	3,545	173,565	1014,195	0,206	3270,115	1,039
9	4,174	196,155	1025,421	0,237	3196,998	1,033
10	4,966	224,313	1042,474	0,274	3127,359	1,03
11	5,976	259,871	1067,183	0,322	3061,89	1,031

По значениям из табл. 6 строятся графики зависимостей параметров $m_{\text{дв}}$ и $l_{\text{дв}}$ от номинального давления в КС. Графики представлены на рис. 3. Также строится график зависимости $m_{\text{дв}}$ от $l_{\text{дв}}$. График зависимости представлен на рис. 4.

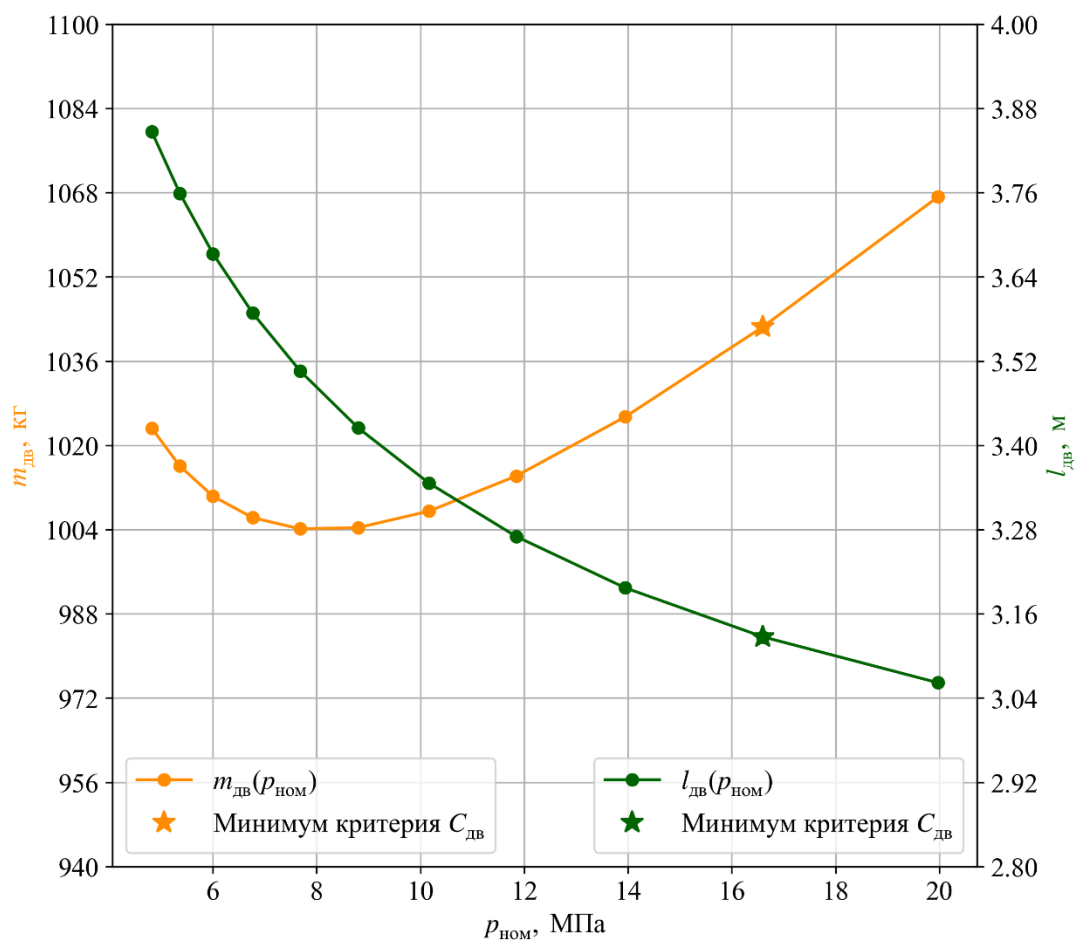


Рис. 3. Графики зависимостей $m_{\text{дв}}(p_{\text{ном}})$, $l_{\text{дв}}(p_{\text{ном}})$

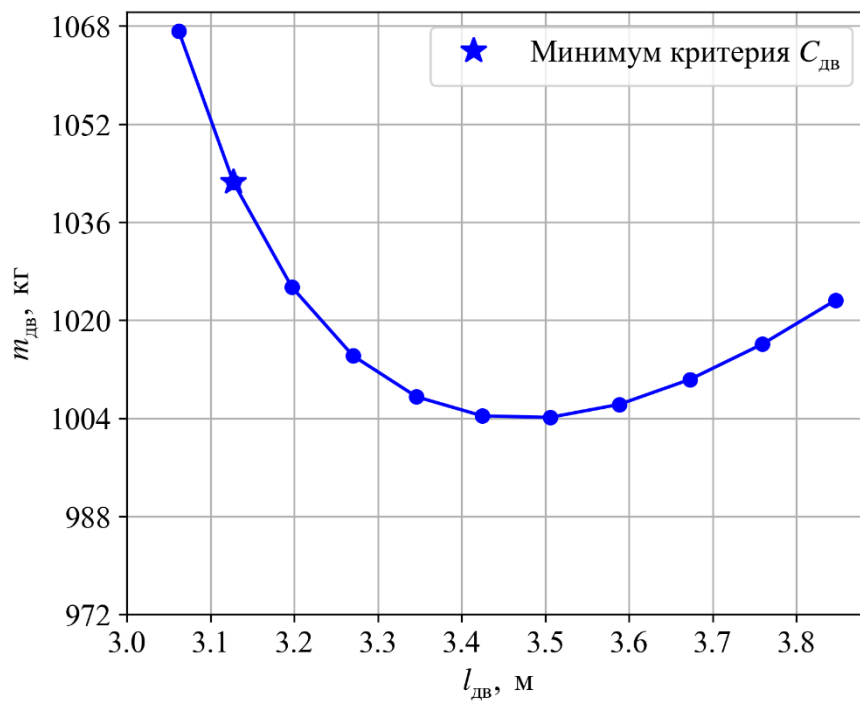


Рис. 4. График зависимости $m_{\text{дв}}(l_{\text{дв}})$

4. Геометрические параметры ТРТ

Для устранения прогрессивности с торцов заряда выполняются щели или пропилы. В зависимости от количества и глубины щелей может быть получен любой характер изменения площади поверхности горения (нейтральный, прогрессивный, дигрессивный). На рис. 5 представлен канально-щелевой заряд.

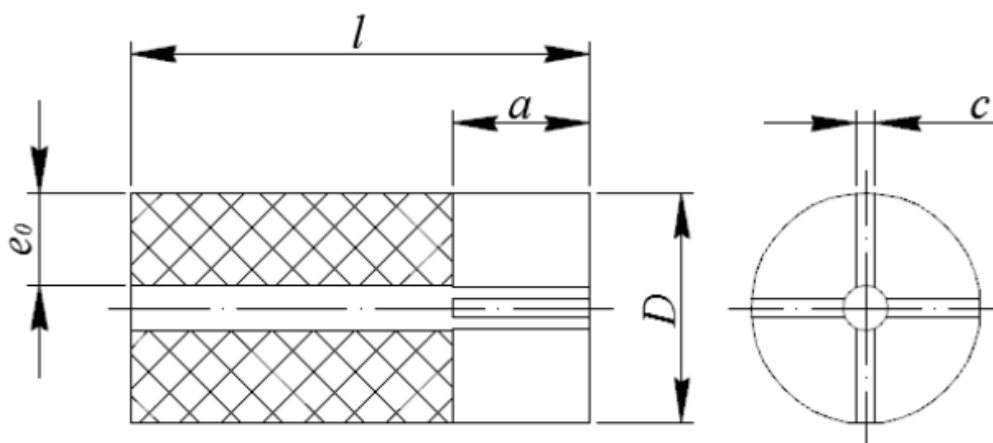


Рис. 5. Канально-щелевой заряд

Определяющие геометрические размеры:

1. минимальная толщина свода e_0

$$e_0 = \frac{(D - d)}{2};$$

2. количество щелей $n = 4$;
3. глубина щелей в безразмерной форме $\bar{a} = 0,3$;
4. ширина щелей в безразмерной форме $\bar{c} = 0,05$.

Характерные участки поверхности горения:

- A. Поверхность канала (основной участок) (19)

$$S_A(e) = \pi(d + 2e)(l - a - e). \quad (19)$$

- B. Поверхность канала в области щелей (20)

$$S_B(e) = \begin{cases} n(\beta - \varphi_1(e))(d + 2e)a, & \text{при } e \leq e_1 \\ 0, & \text{при } e > e_1 \end{cases}. \quad (20)$$

- C. Боковые поверхности щелей (21)

$$S_C(e) = \begin{cases} 2nab_1(e), & \text{при } 0 \leq e \leq e_1 \\ 2nab_2(e), & \text{при } e_1 \leq e \leq e_2 \\ 0, & \text{при } e > e_2 \end{cases} \quad (21)$$

D. Торцы заряда (включая торцевые поверхности щелей) (22)

$$S_D(e) = \frac{\pi}{4} (D^2 - (d + 2e)^2). \quad (22)$$

Суммарная площадь поверхности горения находится как сумма поверхностей горения характерных участков (23)

$$S(e) = S_A(e) + S_B(e) + S_C(e) + S_D(e). \quad (23)$$

Результаты расчёта формул (19 – 23) представлены на рис. 6.

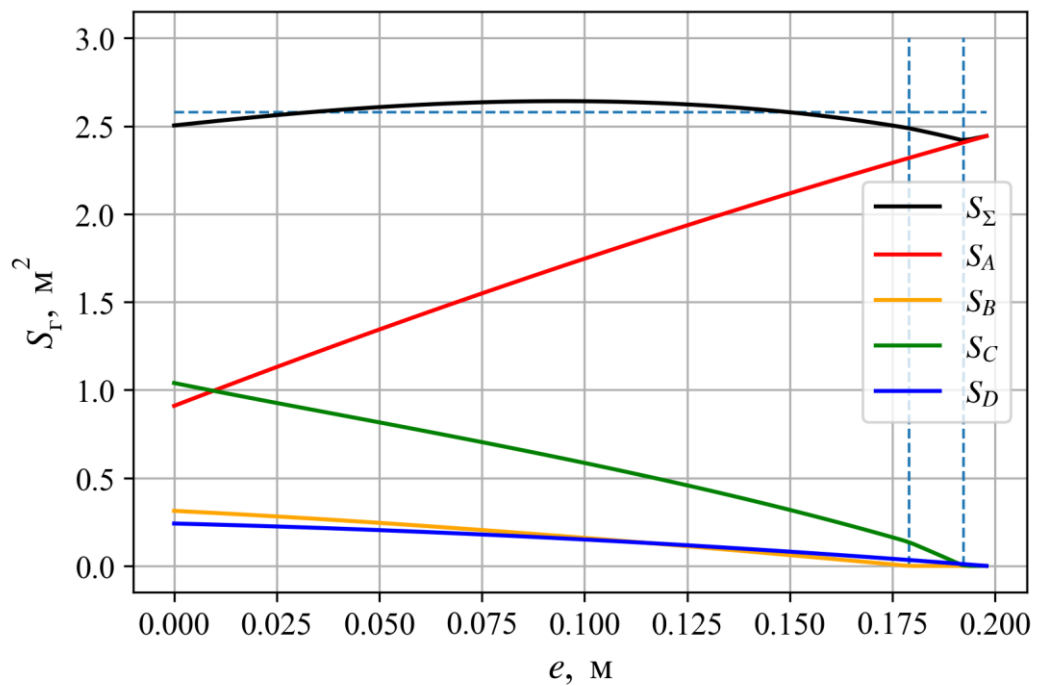


Рис. 6. График зависимости площади поверхности горения канально-щелевого заряда от толщины сгоревшего свода

5. Решение ПЗВБ РДТТ

Форма зерна – двояковыпуклая таблетка (рис. 7).

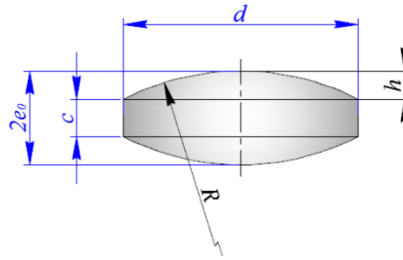


Рис. 7. Зерно воспламенительного состава

Геометрические параметры зерна:

- толщина свода $e_0 = 0,5 \dots 2,5$ мм;
- высота цилиндрического элемента $c = 0,4 \dots 0,8e_0$ (принять $c = 0,8e_0$);
- диаметр таблетки $d = 5 \dots 10e_0$ (принять $d = 5e_0$).

Проводится интегрирование системы уравнений внутренней баллистики РДТТ.

Математическая модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{W} \left(X + \frac{k}{k-1} Y \right) \\ \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho W R} (X + Y) \\ \frac{dW}{dt} = \frac{G_B}{\rho_B} + \frac{G_T}{\rho_T} \\ \frac{dc_p}{dt} = \frac{1}{\rho W} \left(G_B (c_{pB} - c_p) + G_T (c_{p1} - c_p) \right) \\ \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho W} \left(G_B (R_B - R) + G_T (R_1 - R) \right) \\ \frac{de_B}{dt} = u_B(p, T_0) \Phi_0 \\ \frac{de}{dt} = u(p, T_0) \Phi_\kappa(\kappa(e)) \Phi_1 \\ \frac{d\eta_T}{dt} = \frac{2q_{\text{зар}}^2}{c_T \lambda_T \rho_T} \Phi_q \end{array} \right. .$$

Данную систему уравнений также необходимо дополнить:

$$X = G_B c_{pB} (T_{pB} - T) + G_T c_{p1} (T_{p1} - T) - q_{\text{зап}} S_{\Gamma 0} \Phi_q - q_w S_w;$$

$$Y = G_B R_B T + G_T R_1 T - \frac{p}{\rho} G - p \left(\frac{G_B}{\rho_B} + \frac{G_T}{\rho_T} \right).$$

Индекс «в» соответствует параметрам воспламенительного состава и его продуктов сгорания, индекс «т» - параметрам ТРТ, индекс «1» - параметрам продуктам сгорания ТРТ.

Вспомогательные множители:

$$\Phi_q = \Phi(T_s - T_0 - \sqrt{\eta_T});$$

$$\Phi_0 = \Phi(e_{B0} - e_B); \Phi_1 = \Phi(e_{\text{max}} - e)(1 - \Phi_q),$$

где T_s – температура вспышки основного заряда.

Система дифференциальных уравнений дополняется следующими алгебраическими выражениями:

- уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho R T;$$

- выражение для показателя адиабаты продуктов сгорания

$$k = \frac{c_p}{c_p - R};$$

- скорость горения основного заряда

$$u = u_1 \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^v \exp(D_t (T_0 - T_{\text{ref}})),$$

где p_{ref} соответствует заданному закону горения ТРТ, $T_{\text{ref}} = 293,15$ К;

- скорость горения воспламенительного состава

$$u_B = u_{1B} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}_B}} \right)^{v_B} \exp(D_{tB} (T_0 - T_{\text{ref}}));$$

- секундный массоприход при сгорании основного заряда

$$G_T = S_{\Gamma}(e) u(p, T_0) \rho_T \Phi_{\kappa}(\kappa(e)) \Phi_1,$$

где

$$\varphi_{\kappa}(\kappa) = \begin{cases} 1 + 0,003(\kappa - \kappa_{\text{пор}}), & \text{при } \kappa \geq \kappa_{\text{пор}} \\ 1, & \text{при } \kappa < \kappa_{\text{пор}} \end{cases},$$

где $\kappa_{\text{пор}} = 100$.

- секундный массоприход при сгорании воспламенительного состава

$$G_{\text{в}} = S_{\text{гв}}(e_{\text{в}})u_{\text{в}}(p, T_0)\rho_{\text{в}}\Phi_0;$$

- секундный массовый расход продуктов сгорания через сопло

$$G = \begin{cases} \frac{pF_{\text{кр}}}{\sqrt{RT}} \left(\frac{p_h}{p}\right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left(1 - \left(\frac{p_h}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)} & \text{при } p < \frac{p_h}{\pi(1)}; \\ \frac{A_n(n)pF_{\text{кр}}}{\sqrt{RT}} & \text{при } p \geq \frac{p_h}{\pi(1)} \end{cases};$$

- число Рейнольдса для случая течения продуктов сгорания воспламенительного состава по каналу заряда

$$\text{Re} = \frac{G_{\text{в}}}{F_{\text{кан}} \mu_{\text{гв}}},$$

где площадь поперечного сечения канала заряда

$$F_{\text{кан}} = \frac{S_{\text{г0}}}{\kappa_0};$$

- число Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4},$$

где число Прандтля определяется по характеристикам продуктов сгорания воспламенительного состава;

- плотность теплового потока

$$q_{\text{зар}} = \text{Nu} \frac{\lambda_{\text{гв}}}{d} (T - T_0 - \sqrt{\eta_T}).$$

Масса воспламенительного состава рассчитывается при $T_0 = 223,15$ К, т.к. эта температура наиболее неблагоприятна для воспламенения

$$\omega_B = (0,5 \dots 0,75) \frac{p_{\text{ном}} W_0}{R_B T_{PB}},$$

где начальный объём КС равен

$$W_0 = \frac{\pi}{12} D_{\text{КС}}^3 + \frac{\pi}{4} D_{\text{КС}}^2 l_{\text{зар}} - \frac{\omega}{\rho_T}.$$

Суммарная площадь поверхности горения воспламенителя

$$S_{\text{ГВ}}(e_B) = \frac{\omega_B}{\omega_{B1}} S_{B1}(e_B),$$

где масса единичного зерна воспламенителя

$$\omega_{B1} = \rho_B V_{B1},$$

Для расчётов принимаются следующие условия.

Значения удельной теплоёмкости и коэффициента теплопроводности топлива:

$$c_T = 1250 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); \lambda_T = 0,3 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Температура вспышки основного заряда для смесового ТРТ

$$T_s = 750 \text{ К}.$$

Начальные условия ($t = 0$ с):

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_h \\ T = T_0 \\ W = W_0 \\ c_p = c_{p0} \\ R = R_0 \\ e_B = e = \eta_T = 0 \end{array} \right. .$$

В качестве начального газа в КС рассматривается воздух:

$$c_{p0} = 1004,5 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); R_0 = 287 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К}); p_h = 0,1 \text{ МПа}.$$

Интегрирование проводится в 2 этапа:

- первый этап. Шаг интегрирования $dt = 5 \cdot 10^{-5}$ с. Система уравнений интегрируется до момента $t = 0,25$ с. Начальные условия записаны выше.

- второй этап. Шаг интегрирования $dt = 5 \cdot 10^{-3}$ с. Система уравнений интегрируется до момента пока давление не упадёт до критического, при котором $p_{\pi(1)} = p_h$. Начальными условиями являются параметры в конце первого этапа.

Полученные индикаторные диаграммы для первого и второго этапа представлены на рис. 8, 9. Параметры воспламенителя представлены в табл. 7.

Параметры горения РДТТ в различных характерных точках, соответствующих различным значениям T_0 , представлены в табл. 8 – 10.

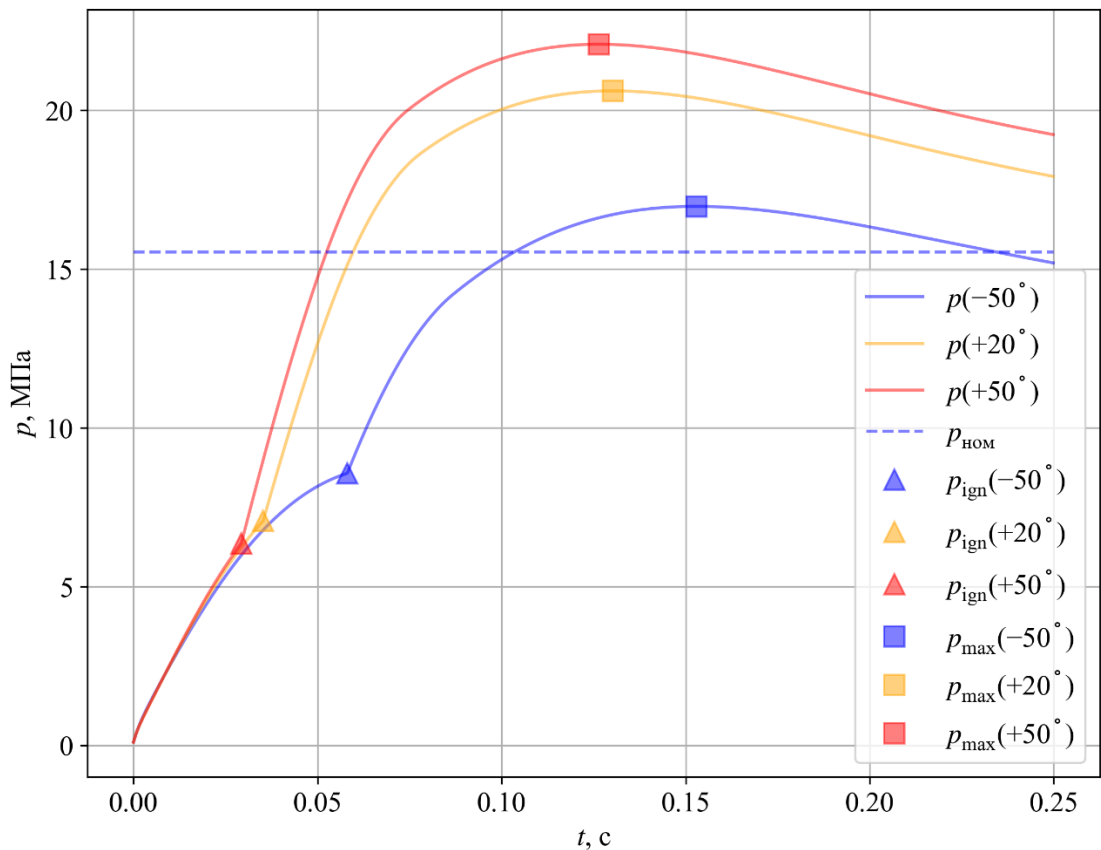


Рис. 8. Зависимость давления и температуры горения зарядов первые 250 мс

Таблица 7. Параметры воспламенителя

N_{\min}	$e_{\text{вс0 min, M}}$	$p_{\text{max}} / p_{\text{ном}} (-50)$	$\omega_{\text{вс}} / \omega_{\text{вс0}}$	$t, \text{ с}$	$\omega_{\text{вс0, КГ}}$
8800	0,00245	1,092	0,846	0,0581	6,28

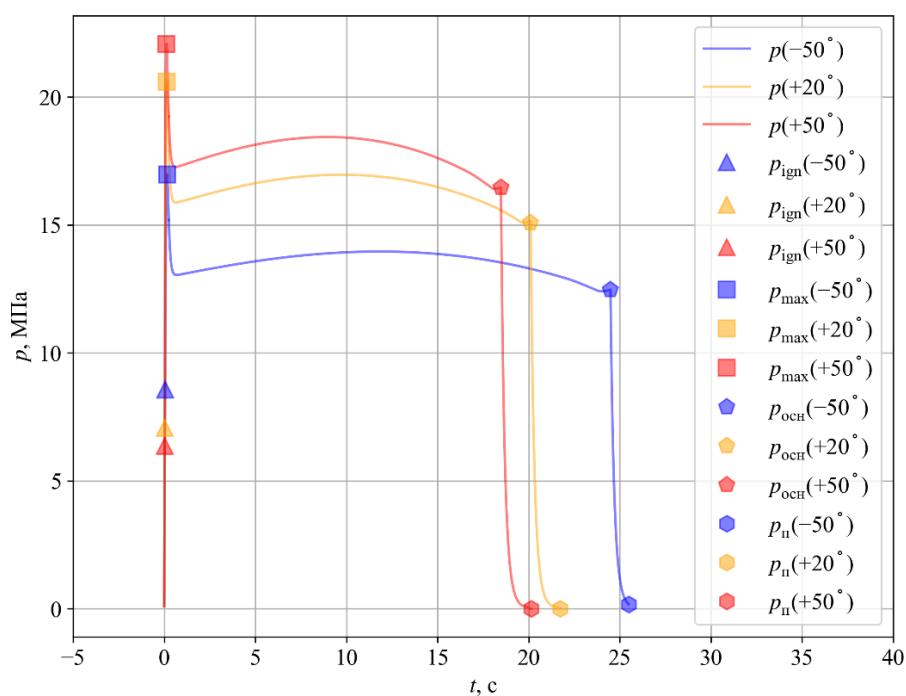


Рис. 9. Зависимость давления и температуры горения зарядов за все время

Таблица 8. Решение при $T_0 = 223,15 \text{ K}$

	$t, \text{ с}$	$p, \text{ МПа}$	$T, \text{ K}$
«ign»	0,058	8,565	2056,954
«max»	0,153	16,969	2805,006
«осн»	24,485	12,467	3000,488
«п»	25,49	0,175	1605,729

Таблица 9. Решение при $T_0 = 273,15 \text{ K}$

	$t, \text{ с}$	$p, \text{ МПа}$	$T, \text{ K}$
«ign»	0,035	7,061	2085,526
«max»	0,13	20,605	2820,31
«осн»	20,105	15,087	2998,345
«п»	21,73	0	484,621

Таблица 10. Решение при $T_0 = 323,15 \text{ K}$

	$t, \text{ с}$	$p, \text{ МПа}$	$T, \text{ K}$
«ign»	0,029	6,355	2091,821
«max»	0,126	22,074	2838,084
«осн»	18,475	16,467	2999,963
«п»	20,13	0	470,585