



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.

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 :

$$f_a = \frac{F_a}{F_m}; \quad v_a = \frac{F_a}{F_{кр}}.$$

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)

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

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

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 ($p_{\text{ном}} = p_{\text{мах}}$) 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.

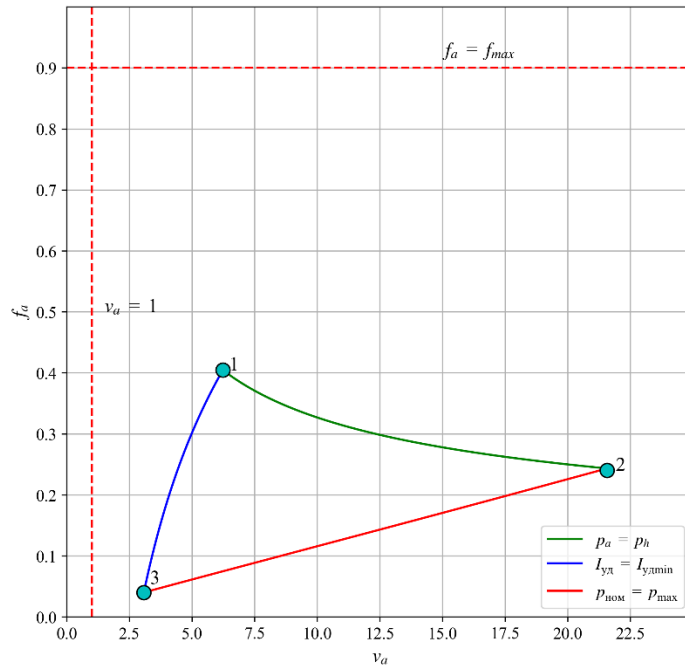


Рис. 1. Границы ОДБР

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)

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

- 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)

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

где:

- плотность ТРТ определяется по формуле

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

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.

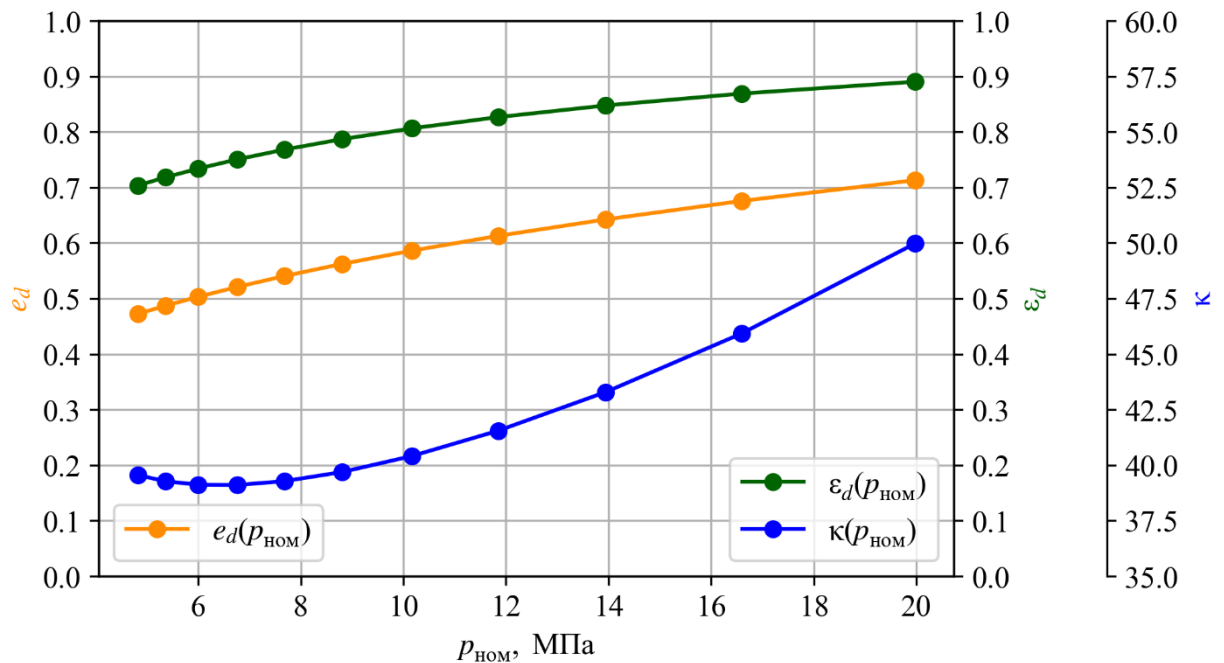


Рис. 2. Графики зависимостей $e_d(p_{\text{ном}})$, $\varepsilon_\omega(p_{\text{ном}})$, $\kappa(p_{\text{ном}})$

3.3. Определение проектных параметров ДУ

Определение давления при +50

Расчёт ТРТ выполнялся в 11 точках, для выбора лучшего решения необходимо задаться критерием качества

$$c_{\text{дв}} = \sqrt{\frac{m_{\text{дв}}}{m_{\text{дв min}}} \frac{l_{\text{дв}}}{l_{\text{дв min}}}}. \quad (13)$$

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).

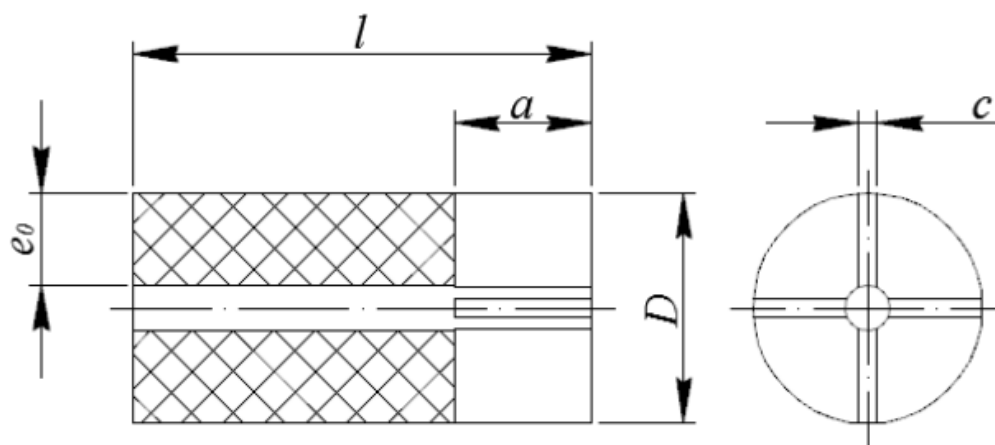


Рис. 3. Канально-щелевой заряд

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);
- B. поверхность канала в области щелей;
- C. боковые поверхности щелей;
- D. торцы заряда (включая торцевые поверхности щелей).

Суммарная площадь поверхности горения находится как сумма поверхностей горения характерных участков

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

Исходные данные для расчёта:

1. Параметры ДУ:

- внутренний диаметр КС
- масса топлива
- плотность топлива

2. Геометрические параметры заряда:

- толщина свода
- количество щелей
- глубина щелей
- ширина щелей

Табл. 6. Результаты вычислений

	$\delta_{об}$, мм	$D_{кр}$, мм	$m_{дв0}$, кг	$m_{дв}$, кг	$\alpha_{дв}$	$l_{дв}$, мм	$c_{дв}$
1	1,444	141,414	95,206	1023,237	0,103	3775,944	1,127
2	1,605	133,15	101,417	1016,077	0,111	3692,554	1,111
3	1,796	124,954	108,744	1010,338	0,121	3610,534	1,095
4	2,025	116,852	117,429	1006,256	0,132	3530,031	1,081
5	2,3	108,87	127,782	1004,137	0,146	3451,215	1,067
6	2,634	101,032	140,208	1004,375	0,162	3374,29	1,056
7	3,042	93,362	155,234	1007,495	0,182	3299,506	1,045
8	3,545	85,884	173,565	1014,195	0,206	3227,173	1,037
9	4,174	78,621	196,155	1025,421	0,237	3157,687	1,032
10	4,966	71,595	224,313	1042,474	0,274	3091,561	1,029
11	5,976	64,826	259,871	1067,183	0,322	3029,477	1,031

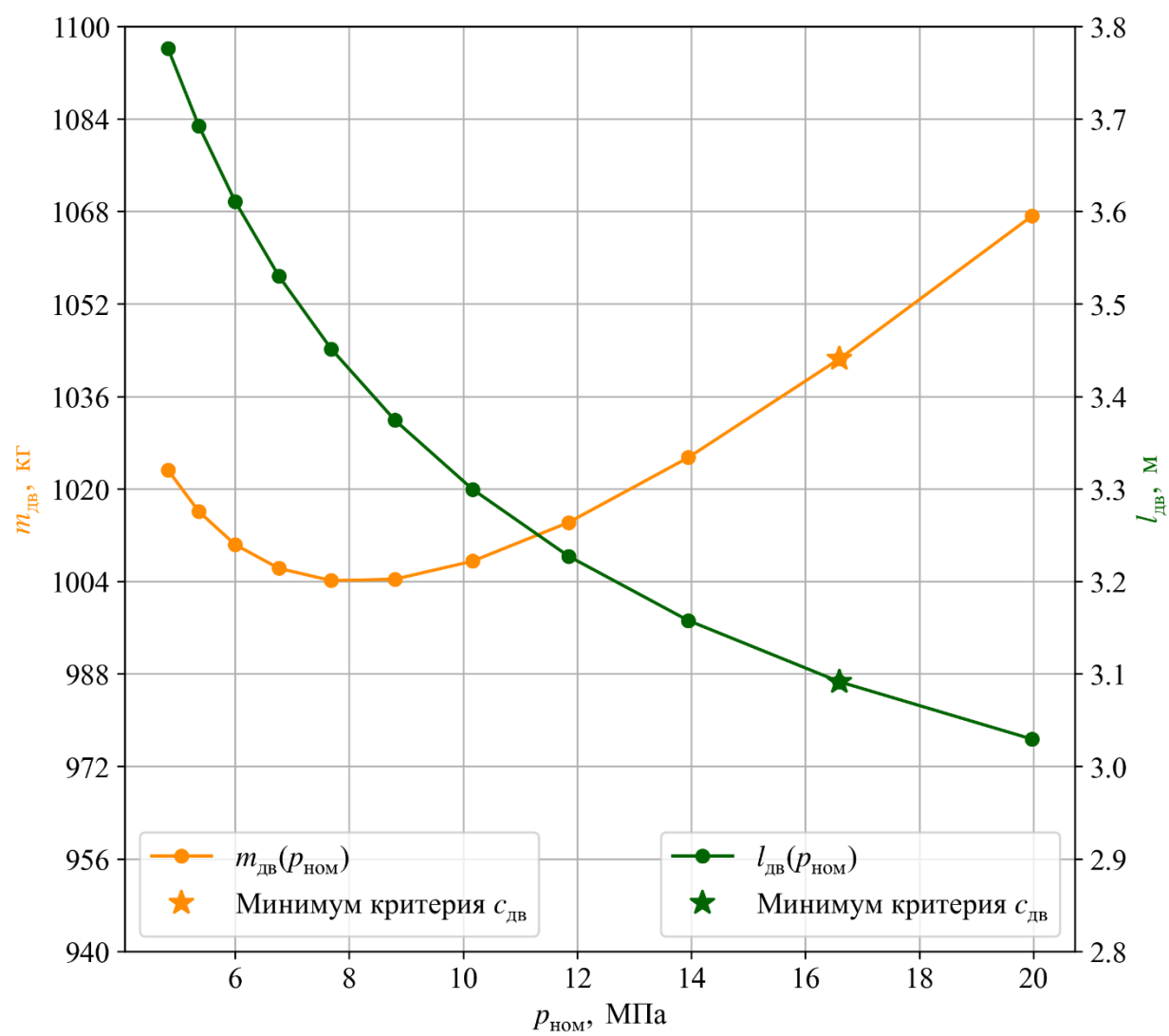


Рис. 3. Графики зависимостей $m_{\text{дв}}(p_{\text{ном}})$, $l_{\text{дв}}(p_{\text{ном}})$

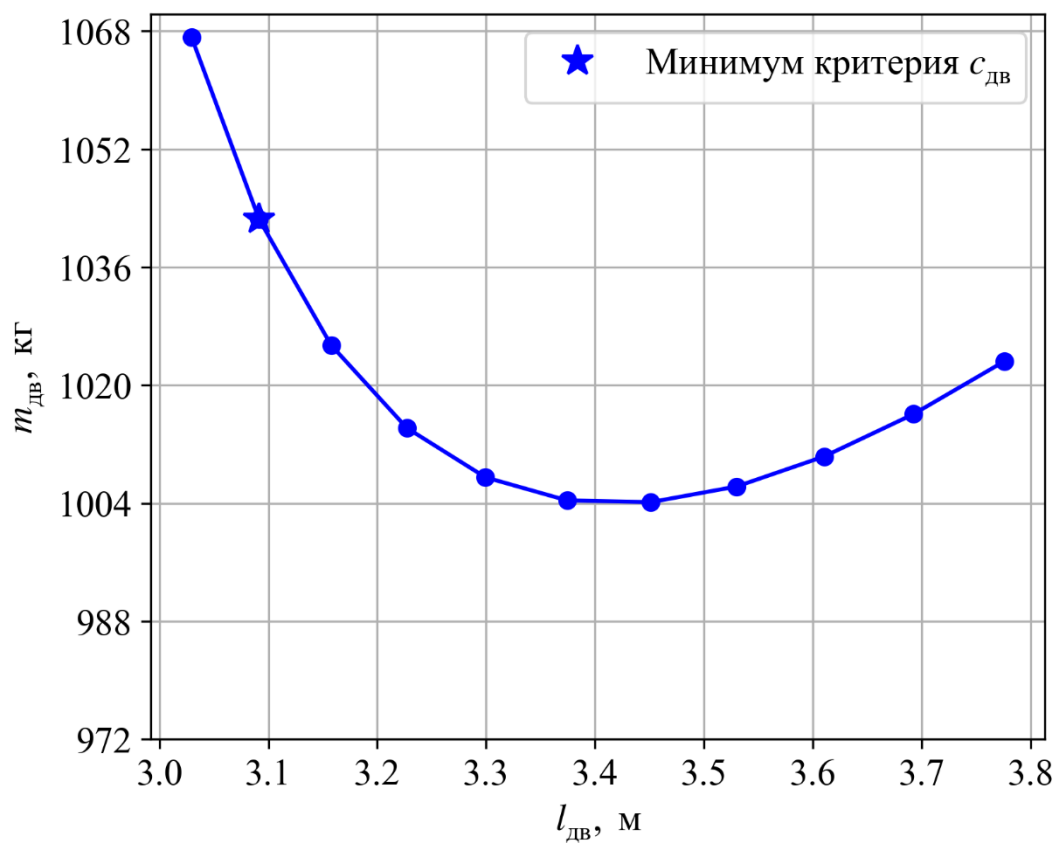


Рис. 4. График зависимости $m_{dv}(l_{dv})$

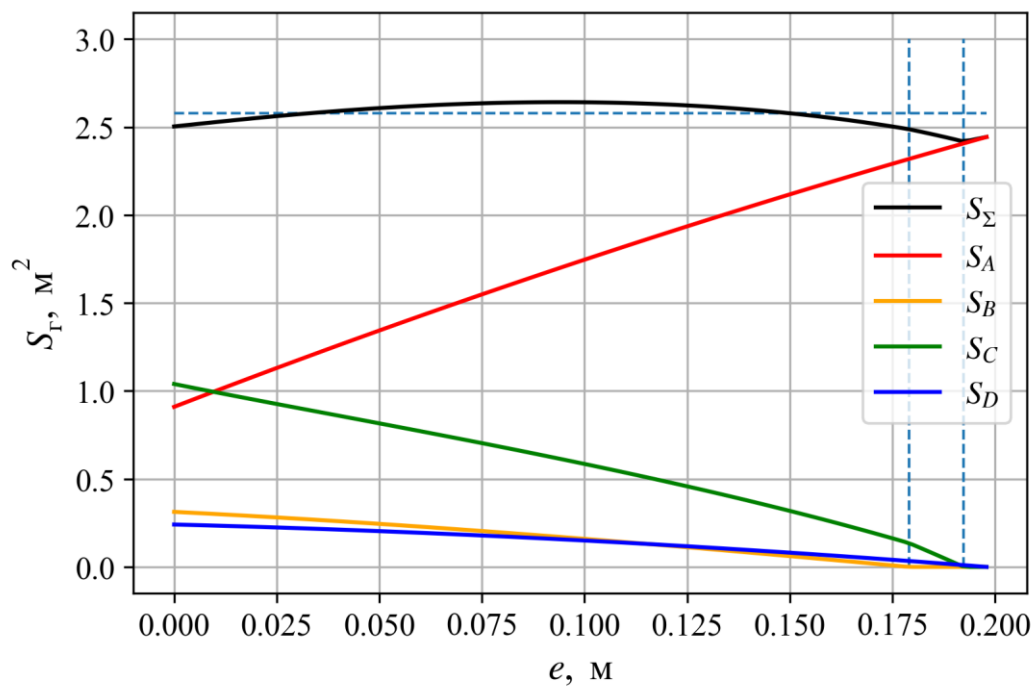


Рис. 5. График зависимости площади поверхности горения канально-щелевого заряда от толщины сгоревшего свода

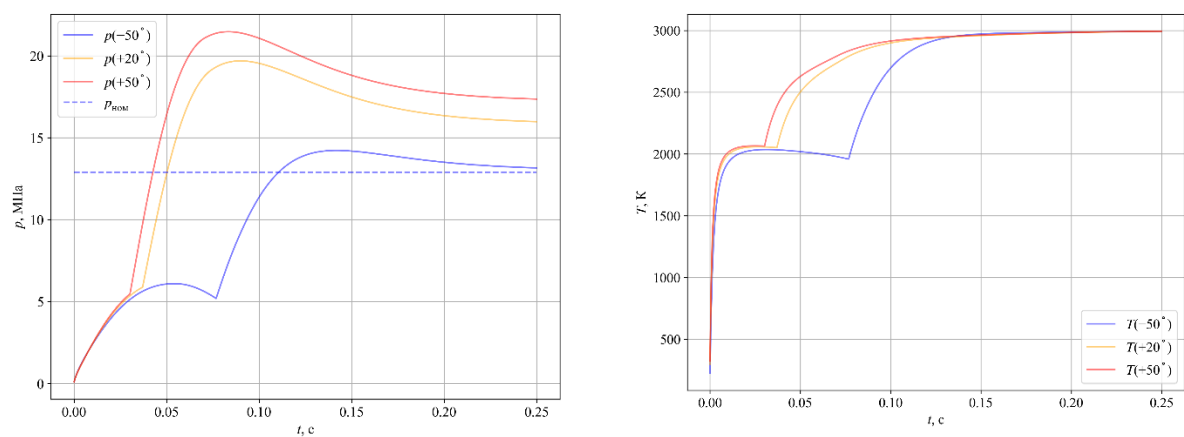


Рис. 6. Зависимость давления и температуры горения зарядов первые 250 мс

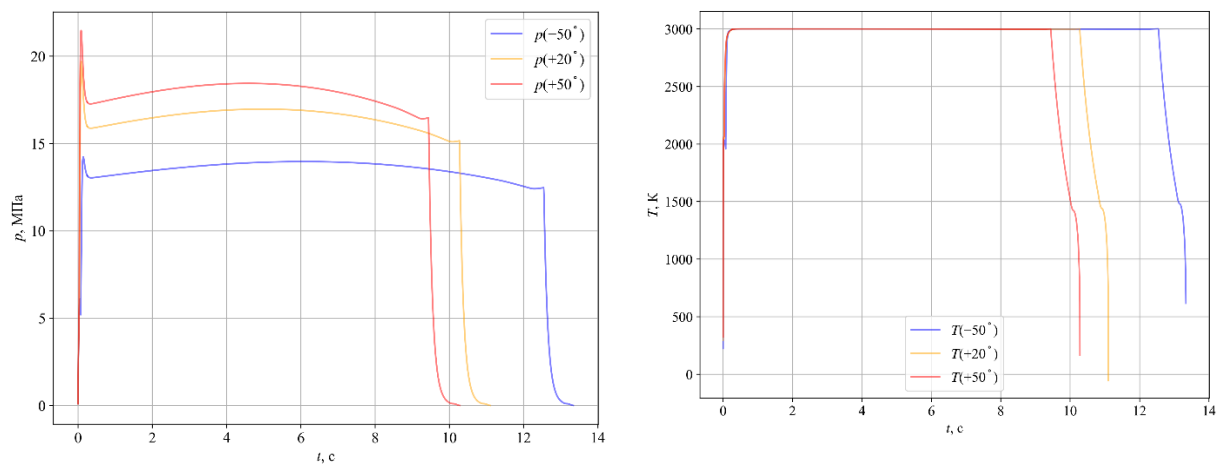


Рис. 7. Зависимость давления и температуры горения зарядов за все время

Таблица 7. Результаты вычислений

N_{\min}	$e_{\text{вс } 0 \text{ min, М}}$	$p_{\max} / p_{\text{ном}} (-50)$	$\omega_{\text{вс}} / \omega_{\text{вс } 0}$	$t, \text{ с}$	$\omega_{\text{вс } 0}, \text{ КГ}$
10520	0,00227	1,10	0,048	0,075	6