



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) _____

Отчет по лабораторной работе

ПО ДИСЦИПЛИНЕ:

Баллистика ракетного и ствольного оружия

НА ТЕМУ:

Определение массы навески воспламенителя

Студенты группы

СМ6-71

Большаков А. Н.

Галоян Д. В.

Гарпинич Д. Н.

Гудков И. А.

Зеленский А. О.

Проверил

(подпись, дата)

О. С. Серпинский

(И.О. Фамилия)

Москва, 2021 г.

Цель работы – для индивидуальных исходных данных определить необходимую массу навески воспламенительного состава, обеспечивающую воспламенение основного топливного заряда при начальной температуре заряда -50°C . Подобрать толщину свода зерна воспламенителя из условия минимизации массы навески. Построить кривые давления горения воспламенителя и ТРТ для начальных температур заряда -50°C , $+20^{\circ}\text{C}$ и $+50^{\circ}\text{C}$.

Общие исходные данные:

- номинальное давление в КС: $p_0 = 10 \text{ МПа}$;
- атмосферное давление в КС: $p_a = 0,1 \text{ МПа}$;
- пороговое значение Победоносцева: $\kappa_{ref} = 100$;
- удельная теплоемкость топлива: $c_{p \text{ нач}} = 1004,5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;
- газовая постоянная продуктов сгорания: $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;
- начальная температура основного заряда СТРТ: $T_s = 750 \text{ К}$;
- опорное значение температуры: $T_{ref} = 293,15 \text{ К}$;

Исходные данные щелевого заряда:

- Марка: ANB-3066;
- внутренний диаметр КС: $D = 240 \text{ мм}$;
- масса топлива: $\omega = 100 \text{ кг}$;
- плотность топлива основного заряда: $\rho_{\tau} = 1770 \text{ кг/м}^2$;
- толщина свода: $e_0 = 90 \text{ мм}$;
- количество щелей: $n = 4$;
- глубина щелей: $a = 450 \text{ мм}$;
- ширина щелей: $c = 10 \text{ мм}$;
- зависимость скорости горения при 20° : $u = 2,9 \left(\frac{p}{98066,5} \right)^{0,3}$;
- коэффициент температурной чувствительности скорости горения:

$$\frac{\partial \ln u}{\partial T_3} = 0,002 \frac{1}{^{\circ}\text{C}};$$

Исходные данные для воспламенителя:

- Марка: ДРП;
- плотность топлива основного заряда: $\rho_{\tau} = 1750 \text{ кг/м}^2$;
- зависимость скорости горения: $u = 11,7 \left(\frac{p}{98066,5} \right)^{0,226}$;
- коэффициент температурной чувствительности скорости горения:

$$\frac{\partial \ln u}{\partial T_3} = 0,001 \frac{1}{^{\circ}\text{C}}.$$

Последовательность выполнения работы

1. Для заданного состава воспламенителя проводится термодинамический расчет в программе Тетра при эталонных условиях (давление в КС $p = 4$ МПа, равновесное расширение продуктов сгорания до $p_e = 0,1$ МПа), по итогам которого определяются следующие характеристики ПС воспламенительного состава:

1) В камере сгорания:

- равновесная температура T_p ;
- газовая постоянная R_g ;
- массовая доля конденсированной фазы ξ ;
- коэффициент теплопроводности λ_g ;
- коэффициент динамической вязкости μ_g .

2) В критическом сечении сопла:

- Удельная теплоёмкость.

По равновесному составу ПС в критическом сечении сопла определяется теплотворная способность воспламенительного состава Q_{ign} , на основе которой рассчитываются средние значения удельной теплоемкости и показателя адиабаты c_p, k .

2. Составляется зависимость площади поверхности горения единичного зерна воспламенительного состава от толщины сгоревшего свода. Форма зерна – двояковыпуклая таблетка (рис. 1).

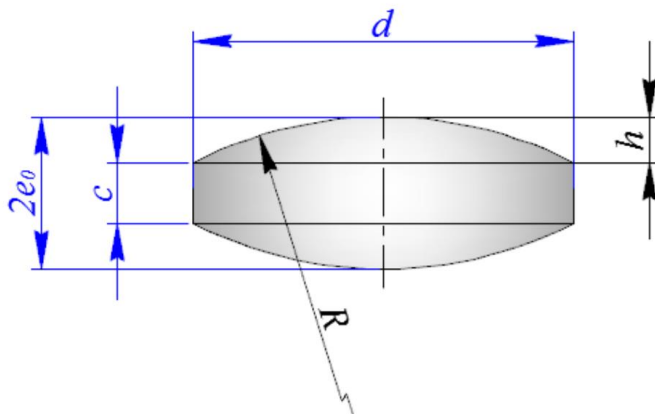


Рис. 1. Зерно воспламенительного состава

Геометрические параметры зерна:

- Толщина свода: $z_0 = 0,5...2,5$ мм;
- Высота цилиндрического элемента: $c = 0,4...0,8z_0$ (принять $c = 0,8z_0$);
- Диаметр таблетки: $d = 5...10z_0$ (принять $d = 5z_0$).

3. Проводится интегрирование системы уравнений внутренней баллистики РДТТ.

Математическая модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} = \frac{k-1}{W} \left(X + \frac{k}{k-1} Y \right); \\ \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho W R} (X + Y); \\ \frac{dW}{dt} = \frac{G_B}{\rho_B} - \frac{G_T}{\rho_T}; \\ \frac{dc_p}{dt} = \frac{1}{\rho \omega} (G_B(c_{p0} - c_p) + G_T(c_{p0} - c_p)); \\ \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho \omega} (G_B(R_0 - R) + G_T(R_1 - R)); \\ \frac{de_B}{dt} = \frac{1}{\rho \omega} (G_B(R_0 - R)) \Phi_0; \\ \frac{de}{dt} = u \varphi_\kappa \Phi_1; \\ \frac{d\eta_T}{dt} = \frac{2\alpha^2}{c_t \lambda_t \rho_t}. \end{array} \right.$$

Данную систему уравнений также необходимо дополнить:

$$X = G_B c_{p0} (T_{p0} - T) + G_T c_{p1} (T_{p1} - T) - \frac{dQ_t}{dt} \Phi_{q1};$$

$$Y = G_B R_0 T + G_T c_{p1} T - \frac{p}{\rho} G - \rho \left(\frac{G_B}{\rho_B} + \frac{G_T}{\rho_T} \right).$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} p &= 10^5 \text{ Па}; \\ W &= W_0; \\ T &= T_0; \\ c_p &= 1004,5 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}; \\ R &= 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}; \\ e_B &= 0; e = 0; \eta_T = 0. \end{aligned}$$

4. 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 $p \cdot \pi(1, h) = p_h$. Начальными условиями являются параметры в конце первого этапа.

Необходимые алгебраические соотношения для решения системы:

$$\varphi_{\kappa} = \left(1, 1 + 0,003(\kappa - \kappa_{\text{потр}})\right);$$

$$\Phi_{q1} = \begin{cases} 1, \eta_T < \eta_{TS} \\ 0, \eta_T \geq \eta_{TS} \end{cases};$$

$$\Phi_1 = \phi(e_0 - e)(1 - \Phi_{q1});$$

$$\Phi_0 = \phi(e_{0B} - e_B);$$

$$G = \begin{cases} \frac{pF_{\text{кп}}}{\sqrt{R_g T_g}} \left(\frac{p_{\text{н}}}{p}\right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left(1 - \left(\frac{p_h}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right)} \\ \sqrt{n \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n+1}{n-1}}} \frac{pF_{\text{кп}}}{\sqrt{R_g T_g}} \end{cases};$$

$$q = \alpha(T_g - T_w);$$

$$\frac{dQ_t}{dt} = \alpha(T_g - T_{gr0} - \sqrt{\eta_T});$$

$$T_g = \frac{pW}{m_g R_g};$$

$$\frac{dQ_T}{dt} = \alpha(T_g - T_0 - \sqrt{\eta_T});$$

$$\alpha = \frac{Nu\lambda_g}{d}; Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}; Re = \frac{\rho_g v_g d}{\mu_g}.$$

Итоговые графики

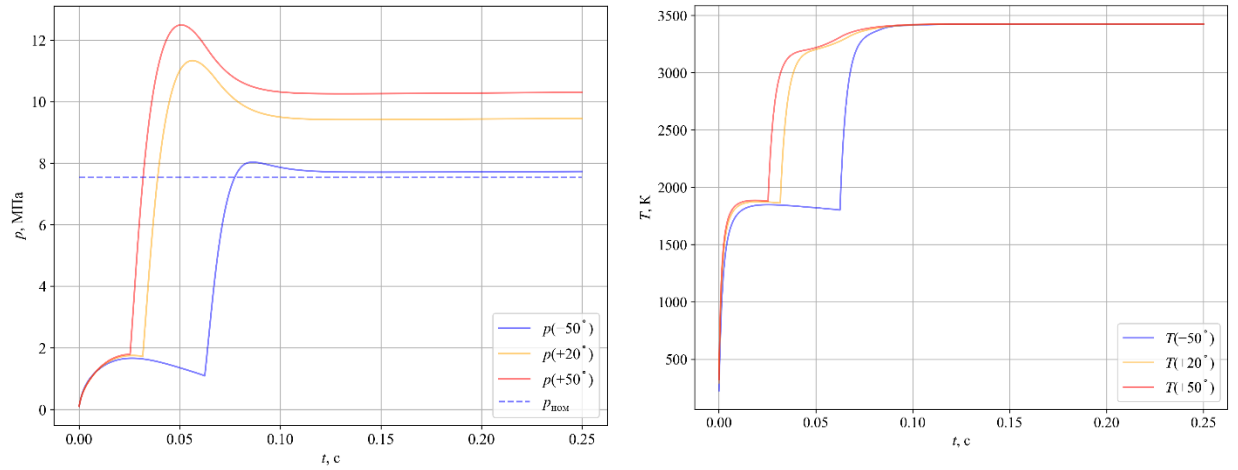


Рис. 2. Зависимость давления и температуры горения зарядов первые 250 мс

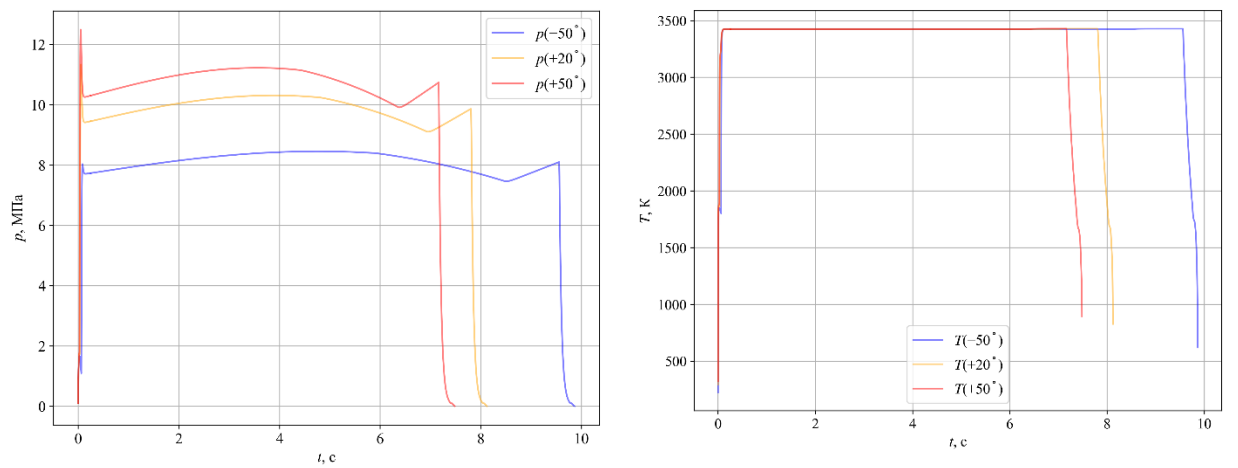


Рис. 3. Зависимость давления и температуры горения зарядов за все время

Таблица 1. Результаты вычислений

N_{\min}	$e_{\text{вс } 0 \text{ min}}, \text{ М}$	$p_{\text{max}} / p_{\text{ном}} (-50)$	$p_{\text{max}} / p_{\text{ном}} (+50)$	$\omega_{\text{вс}} / \omega_{\text{вс } 0}$	$t, \text{ с}$
960	0,00182	1,065	1,282	0,888	0,062

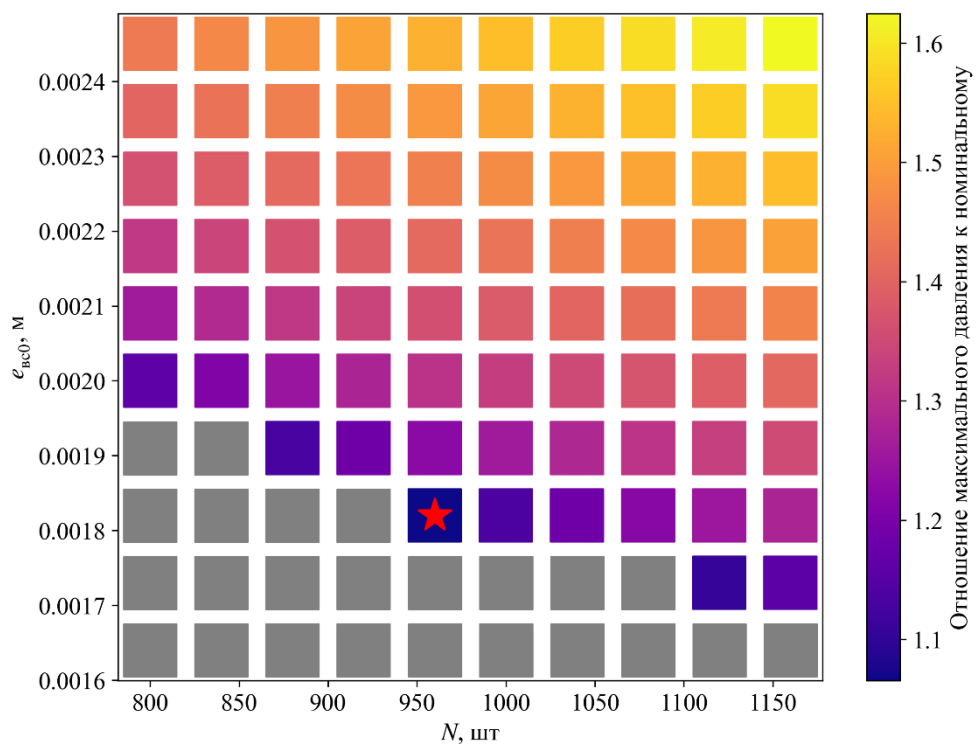


Рис. 4. Отношение максимального давления к номинальному при -50

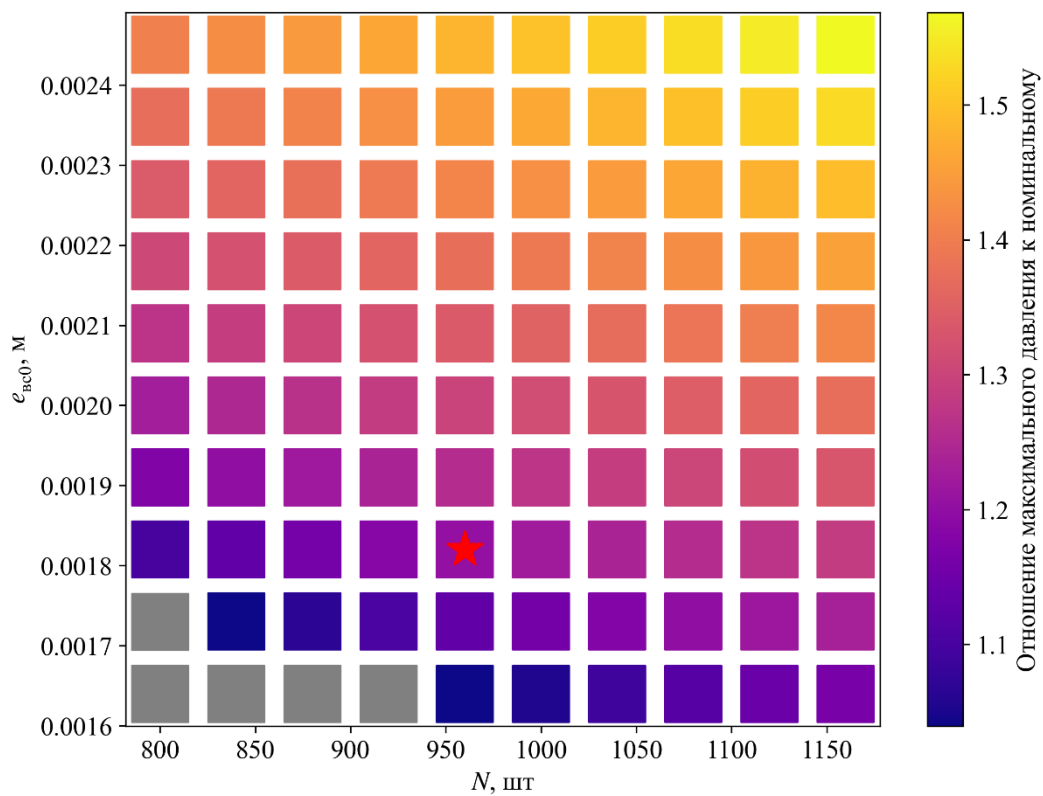


Рис. 5. Отношение максимального давления к номинальному при +50

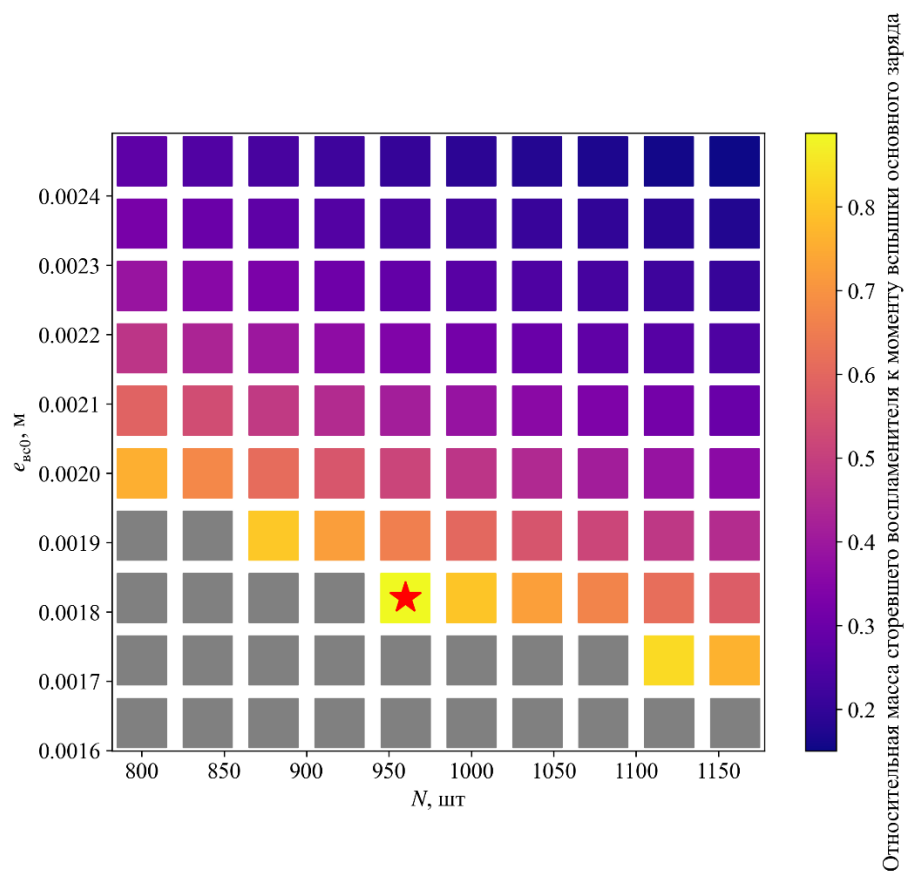


Рис. 6. Относительная масса сгоревшего воспламенителя до момента вспышки

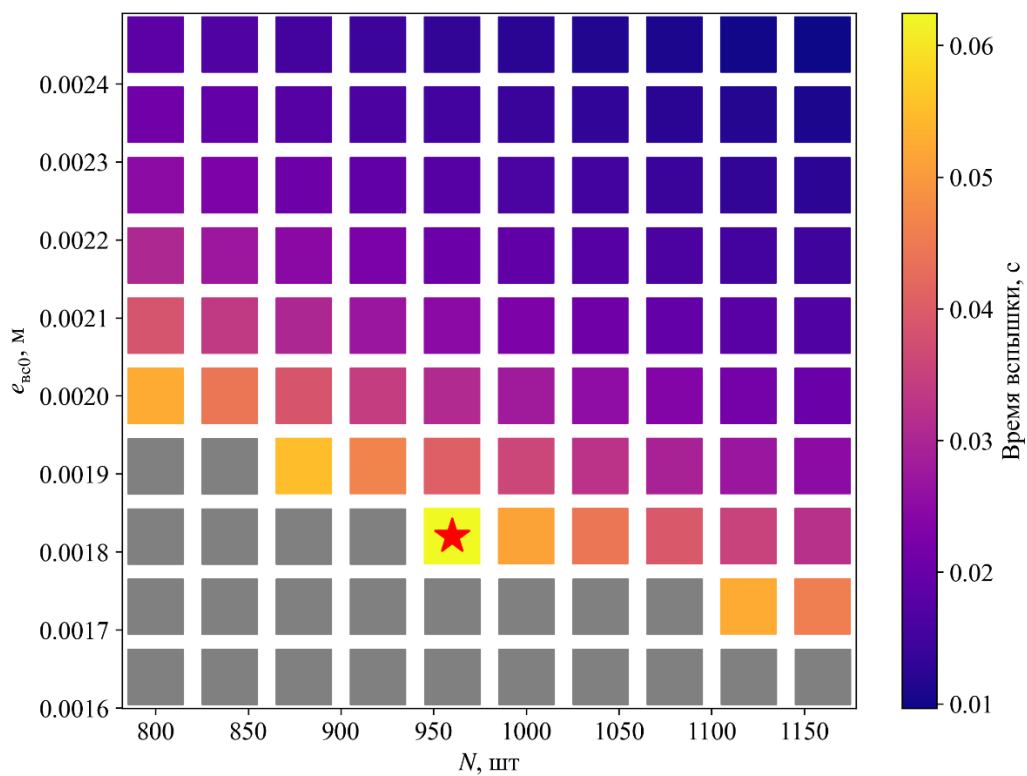


Рис. 7. Время воспламенения

Список литературы

1. Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твёрдого топлива. М.: Машиностроение, 1988.
2. Соркин Р. Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. М.: Наука, 1983.
3. Бахман Н. Н., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.