



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 ракетного оружия

НА ТЕМУ:

Проектирование ИДК

Выполнил: студент группы _____ СМ6-92 _____ А.А. Лазарев
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

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

Москва, 2022 г.

Оглавление

Техническое задание.....	3
1. Формирование недостающих исходных данных	4
1.1 Конструктивная схема, определение габаритов ИДК.....	4
1.2 Определение времени работы ИДК	5
1.3 Действительное значение коэффициента тяги	6
1.4 Величина тяги на квазистационарном участке.....	7
2 Выбор топлива и проектирование заряда	7
2.1 Выбор топлива и расчет давлений	7
2.2 Определение геометрических параметров сопла	8
2.3 Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла.....	9
2.4 Проектирование заряда	10
3 Определение массы навески воспламенителя.....	15
4 Решение основной задачи внутренней баллистики	19

Техническое задание

Спроектировать блок из $n = 18$ ИДК (3 ряда по 6 ИДК) для поперечной коррекции вращающегося ЛА калибром $D_{\text{сн}} = 195$ мм. Количество импульсов $N_{\text{кор}} = 6$ (по 3 ДУ), $N_{\text{кор}} = 12 + 6$ (6 по 2 ДУ + 6 по 1 ДУ) или $N_{\text{кор}} = 18$ (по 1 ДУ). Суммарный импульс коррекции не менее $J_{\Sigma} = 140$ Н·с при телесном угле коррекции $2\varphi = 120^\circ$. Частота вращения ЛА $v_{\text{min}} \dots v_{\text{max}} = 8 \dots 10$ об/с, скорость полета в момент коррекции $V_{\text{min}} \dots V_{\text{max}} = 370 \dots 410$ м/с (дозвуковая скорость полета). Время выхода двигателя на режим не более $t_{\text{в}} = 4$ мс. Максимальная масса одного ИДК не более $m_{\text{ду max}} = 0,35$ кг. Диапазон рабочих температур $T_{\text{min}} \dots T_{\text{max}} = -50 \dots +50^\circ\text{C}$.

1. Формирование недостающих исходных данных

1.1 Конструктивная схема, определение габаритов ИДК

Конструктивная схема расположения ИДК в корпусе ЛА дана по условию (рис. 1.1). ИДК расположены радиально (3 ряда по 6 ИДК), сопла расположены под углом в $\gamma = 25^\circ$ к оси Y ЛА.

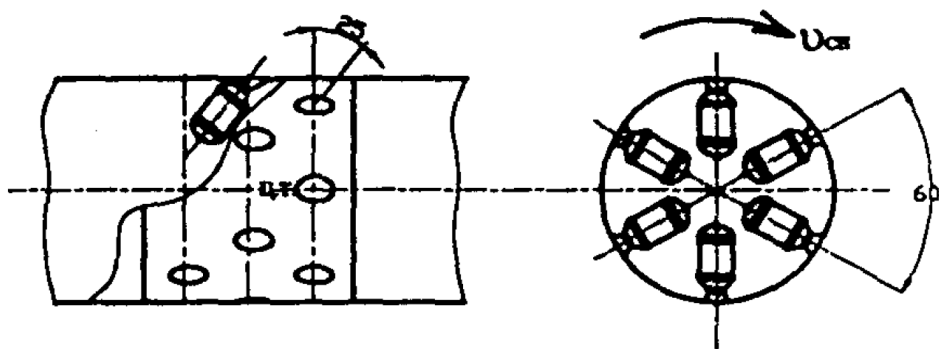


Рис. 1.1. Конструктивная схема ИДК

Примем внешний диаметр корпуса ИДК $D_{\text{ду}} = 45$ мм, минимальный зазор между ИДК $2h = 4$ мм. Тогда максимальная длина цилиндрической части корпуса и соплового блока

$$L_{\text{max}} = \frac{D_{\text{сн}} - (\sqrt{3} + \text{tg}\gamma) \cdot D_{\text{ду}} - 4h}{2 \cos \gamma} = \frac{195 - (\sqrt{3} + \text{tg}25^\circ) \cdot 45 - 8}{2 \cos 25^\circ} = 47 \text{ мм.}$$

Путем нескольких итераций установлено, что для размещения заряда в корпус необходимо использовать сферическое заднее днище. Чтобы сохранить зазор между ИДК, графически было определено, что максимальную длину L_{max} необходимо уменьшить на 4 мм. Тогда $L_{\text{max}} = 43$ мм.

Предварительная прорисовка расположения ИДК представлена на рис. 1.2.

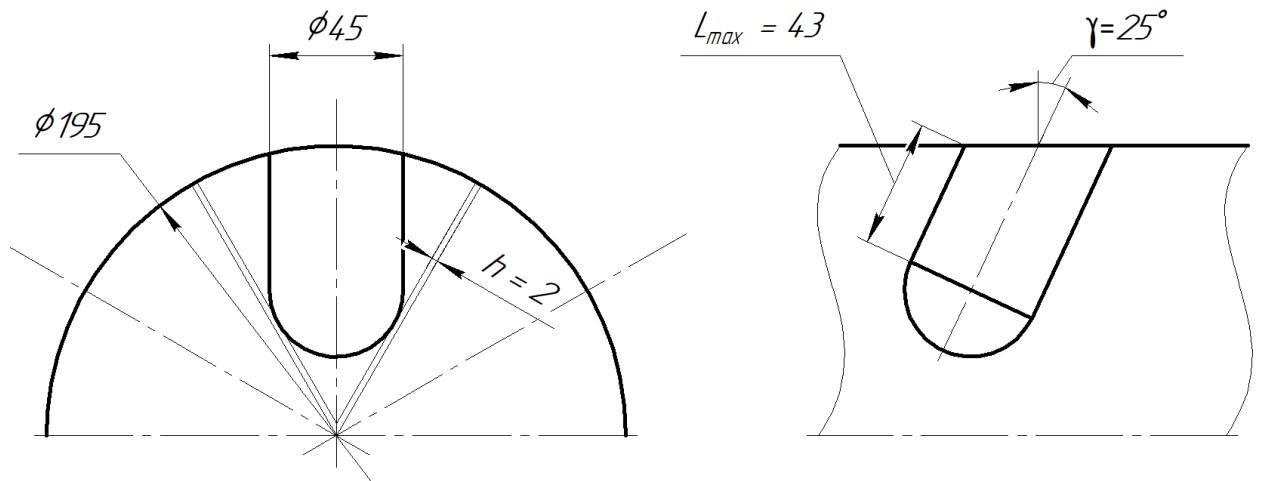


Рис. 1.2. Предварительная прорисовка

Предварительно назначим максимальное давление в камере $p_{\text{I max}} = 80 \text{ МПа}$. Тогда толщина стенки

$$\delta_{\text{ст}} = \eta \frac{p_{\text{I max}} D_{\text{ду}}}{2\sigma_{\text{д}}} = 1,3 \frac{80 \cdot 45}{2 \cdot 1000} = 2,3 \text{ мм},$$

где $\eta = 1,3$ – коэффициент безопасности; $\sigma_{\text{д}} = 1000 \text{ МПа}$ – предел прочности материала стенки (30ХГСА).

Внутренний диаметр КС

$$D_{\text{км}} = D_{\text{ду}} - 2\delta_{\text{ст}} = 40,4 \text{ мм}.$$

1.2 Определение времени работы ИДК

Время коррекции (работы ИДК) для вращающегося ЛА определяется по формуле:

$$t_{\text{д min}} = \frac{1}{v_{\text{max}}} \frac{2\varphi}{2\pi} = 0,033 \text{ с},$$

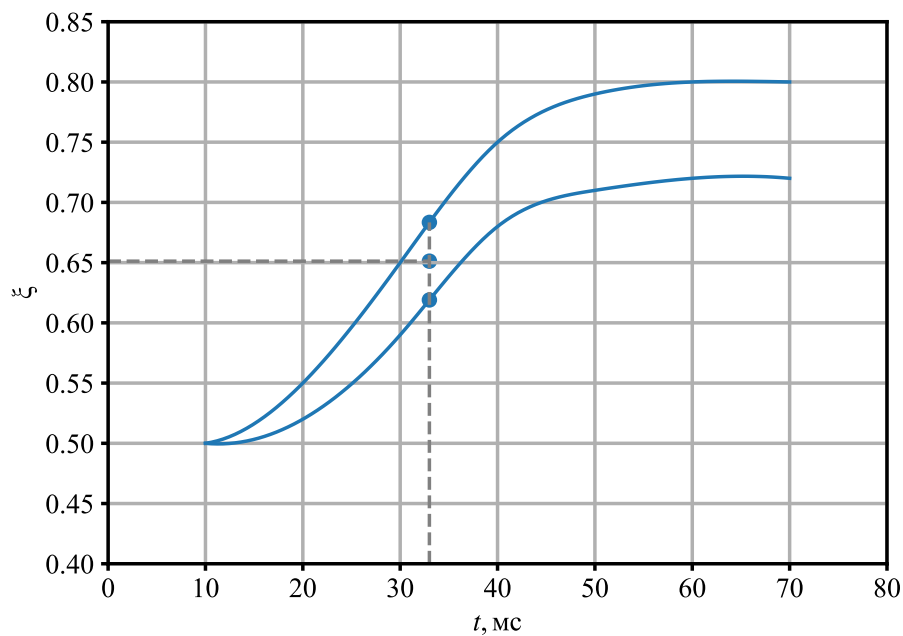
$$t_{\text{д max}} = \frac{1}{v_{\text{min}}} \frac{2\varphi}{2\pi} = 0,042 \text{ с}.$$

Принимаем для дальнейших расчетов $t_{\text{д}} = 0,033 \text{ с}$.

Время горения заряда (в первом приближении)

$$t_r = \frac{t_d}{4} (5\xi(t_d) - 1) - \frac{3}{8} t_b,$$

где $t_b \approx 0,004$ с – время выхода на режим, $\xi(t_d)$ – коэффициент заполнения индикаторной кривой давления ИДК, который выбирается в соответствии с рис. 2.



По рис. 2 принимаем $\xi(t_d) = 0,65$. Отсюда время горения заряда

$$t_r = \frac{0,033}{4} (5 \cdot 0,65 - 1) - \frac{3}{8} \cdot 0,004 = 0,018 \text{ с.}$$

Время последствия тяги

$$t_{\Pi} = t_d - t_r - t_b = 0,011 \text{ с.}$$

1.3 Действительное значение коэффициента тяги

Назначаем коэффициент расширения сопла $\zeta = 1,4$. Тогда теоретический коэффициент тяги согласно таблице 1.1 $K_T(\zeta) = 1,46$.

Таблица 1.1. Значения ζ и соответствующий им K_T

ζ	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
K_T	1,46	1,51	1,56	1,6	1,62	1,64	1,67

Дополнительные потери на тепло и скорость учитываются введением коэффициентов $\varphi_1 = 0,95$ и $\varphi_2 = 0,95$ соответственно.

Действительное значение коэффициента тяги

$$K_d = K_t(\zeta)\varphi_1\varphi_2 = 1,318.$$

1.4 Величина тяги на квазистационарном участке

Необходимая тяга на квазистационарном участке

$$P = \frac{J_\Sigma}{K_1 K_2 \xi(t_d) t_d},$$

где $K_1 = 0,92$ (телесный угол $2\varphi = 120^\circ = 2\pi/3$), $K_2 = 1,08$ (скорость ЛА $V_{\min} \dots V_{\max} = 370 \dots 410$ м/с или $M = 1,09 \dots 1,21$). Подставляя значения, получаем

$$P = \frac{140}{0,92 \cdot 1,08 \cdot 0,65 \cdot 0,033} = 6556 \text{ Н.}$$

Так как коррекция поперечная, а вектор тяги наклонен под углом $\gamma = 25^\circ$, ИДК должен развивать тягу больше потребной

$$P = \frac{P}{\cos \gamma} = \frac{6556}{\cos 25^\circ} = 7234 \text{ Н.}$$

2 Выбор топлива и проектирование заряда

2.1 Выбор топлива и расчет давлений

Из приведенного в условии домашнего задания банка топлив все решения с топливами П-1, П-3 и Б-1, Б-2 не подходили из-за низкого коэффициента заполнения камеры сгорания и большой длины заряда. Решений с топливом П-2 не было найдено из-за неустойчивого процесса горения. Поэтому приведенные ниже расчеты справедливы для топлива Б-3, так как для него было найдено решение. Параметры топлива приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики топлива Б-3

Показатель	Значение
Плотность ρ_t , кг/м ³	1640
Сила пороха f , МДж/кг	1,04
Газовая постоянная R , Дж/(кг·К)	338
Температура торможения T_0 , К	3080
Показатель адиабаты k	1,25
Единичный импульс $I_{уд}$, м/с	2300
Термохимическая константа B_T , К	370
Скорость горения $F_1(p)$, м/с (p в МПа)	$0,00085 \cdot (9,81p)^{0,69}$ ($16 < p < 150$)

Из уравнения Бори по значению максимального давления определим минимальное p_{Imin} и номинальные p_{IV} давления в камере:

$$\begin{cases} \frac{F_1(p_{IV})}{p_{IV}} = \frac{F_1(p_{I\max}) \cdot F_3(T_{\max})}{p_{I\max}}; \\ \frac{F_1(p_{Imin})}{p_{Imin}} = \frac{F_1(p_{I\max}) \cdot F_3(T_{\max})}{p_{I\max} \cdot F_3(T_{min})}, \end{cases}$$

где $F_1(p)$ – зависимость скорости горения от давления, где F_3 – температурная зависимость скорости горения топлива

$$F_3(T_n) = \frac{B_T}{B_T - (T_n - 291,15)}.$$

Из системы уравнений получаем $p_{IV} = 59,7$ МПа и $p_{Imin} = 34,7$ МПа.

2.2 Определение геометрических параметров сопла

Площадь критического сечения сопла

$$F_{\text{кр}} = \frac{P}{K_d p_{\text{imin}}} = 1,562 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Отсюда определим диаметр критического сечения сопла:

$$D_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{кр}}}{\pi}} = 14,1 \text{ мм.}$$

Для ИДК в большинстве случаев сопло коническое с прямолинейными образующими. Примем угол входной части $\varphi_{\text{вх}} = 70^\circ$ и угол наклона образующей сопла к его оси $\varphi_c = 20^\circ$.

Длины участков сопла:

$$L_1 = \frac{D_{\text{км}} - D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{\text{вх}}} = 5 \text{ мм};$$

$$L_2 = 2 \dots D_{\text{кр}} \text{ (мм)} = 2 \text{ мм};$$

$$L_3 = \frac{D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_c} = 8 \text{ мм.}$$

Итого, длина соплового блока

$$L_c = L_1 + L_2 + L_3 = 15 \text{ мм.}$$

Тогда допустимая длина заряда

$$L_{3\text{max}} = L_{\text{max}} - L_c = 28 \text{ мм.}$$

2.3 Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла

Безразмерная скорость потока определяется из газодинамической функции $q(\lambda)$ при заданном коэффициенте расширения сопла $\zeta = 2$

$$q(\lambda) = \frac{S}{S^*} = \frac{1}{\lambda} \frac{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}} = \frac{1}{\zeta^2}.$$

Численно решая уравнение, находим значение безразмерной скорости потока в выходном сечении $\lambda_a = 1,772$.

Критическая скорость звука

$$c^* = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} = 1076 \text{ м/с.}$$

Скорость звука в выходном сечении

$$V_a = \lambda_a \cdot c^* = 1906 \text{ м/с.}$$

Давление в выходном сечении сопла

$$p_a = \pi(\lambda_a) \cdot p_{IN} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \cdot p_{IN} = 6,994 \text{ МПа.}$$

Температура в выходном сечении сопла

$$T_a = \tau(\lambda_a) \cdot T_0 = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right) \cdot T_0 = 2005 \text{ К.}$$

Плотность потока в выходном сечении сопла

$$\rho_a = \frac{p_a}{RT_a} = 10,32 \text{ кг/м}^3.$$

2.4 Проектирование заряда

Проектирование заряда сводится к выбору топлива и формы заряда, определению параметров заряжания двигателя, а также расчету всех его геометрических размеров, параметров и характеристик. Форма заряда должна обеспечивать максимальное заполнение корпуса двигателя при условии допустимых скоростей газового потока, омывающего заряд. Считается, что коэффициент заполнения поперечного сечения КС $\varepsilon_s > 0,5$.

Для импульсных ракетных двигателей чаще всего используют вкладные трубчатые заряды.

Заряд ИДК является трубчатым многошашечным. Наибольшая плотность укладки шашек определяется формулой

$$n = 1 + 3[(m-1) + (m-3) + (m-5) + (m-7) + \dots],$$

где m – модуль, целое число шашек, укладываемые по диаметру камеры.

Постоянная расхода

$$A(k) = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = 0,658.$$

Расход газов через сопло

$$G_p = \frac{\mu_c A(k) F_{кр} p_{lmin}}{\sqrt{RT_0}} = 2,919 \text{ кг/с},$$

где $\mu_c = 0,95$ – коэффициент расхода сопла.

Запас топлива

$$\omega_T = G_p t_T = 0,042 \text{ кг}.$$

Для выполнения коррекции траектории ИДК должен сработать за время не более t_d . Следовательно, для выполнения этого условия проектирование заряда необходимо вести для минимальной температуры окружающей среды

$$e_0 = 2F_1(p_{lmin})F_3(T_{min})t_T = 1,4 \text{ мм}.$$

Потребная площадь горения

$$S_T = \frac{\omega_T}{\rho_T u_T t_T} = 0,0331 \text{ м}^2.$$

Так как не существует аналитического решения по определению значения параметров n , L_3 , D_n , D_b , то будем последовательно задавать количество пороховых элементов и рассчитывать необходимые геометрические размеры. Критерием оценки оптимальности того или иного варианта является максимум коэффициента заполнения поперечного сечения (минимум массы конструкции) при заданных ограничениях:

- значения параметров Победоносцева для внешней и внутренней поверхностей не должны превышать $\kappa_{пред} = 180$;
- значение критерия Шварца не должно превышать 0,75.

- длина заряда не должна превышать предельно допустимого значения

$$L_{3\max} = 30 \text{ мм}.$$

Наружный диаметр заряда находится по формуле:

$$D_{\text{н}} = \frac{D_{\text{км}} - dz}{m},$$

где $dz = 1 \text{ мм}$ – зазор между стенкой и зарядом, вводится для уменьшения значения параметра Победоносцева по наружной стенке или учета зазора для теплового расширения заряда.

Внутренний диаметр заряда определяется как

$$D_{\text{в}} = D_{\text{н}} - 2e_0.$$

Длина заряда определяется из потребной площади горения

$$L_{\text{зар}} = \frac{S_{\text{г}}}{\pi \cdot n (D_{\text{н}} + D_{\text{в}})}.$$

Значения параметров Победоносцева для внешней и внутренней поверхности:

$$\kappa_{\text{вн}} = \frac{4L_{\text{зар}}}{D_{\text{в}}};$$

$$\kappa_{\text{нар}} = \frac{4n \cdot D_{\text{н}} L_{\text{зар}}}{D_{\text{км}}^2 - nD_{\text{н}}^2}.$$

Коэффициент заполнения поперечного сечения

$$\varepsilon_s = \frac{D_{\text{н}}^2 - D_{\text{в}}^2}{D_{\text{км}}^2} n > 0,5.$$

Критерий Шварца

$$\text{Sh} = \frac{4F_{\text{кр}}}{\pi D_{\text{км}}^2 (1 - \varepsilon_s)} < 0,75.$$

Результаты вычислений приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Результаты вычислений параметров заряжания

m	3	5	7	9	11
n	7	19	37	61	91

$D_{\text{н}}$, мм	13,1	7,9	5,6	4,4	3,6
$D_{\text{в}}$, мм	10,3	5,1	2,8	1,6	0,8
$L_{\text{зар}}$, мм	87,0	58,0	45,0	39,0	36,0
$\kappa_{\text{вн}}$	33,51	45,47	64,26	99,23	183,2
$\kappa_{\text{нар}}$	74,94	76,45	82,29	90,28	100,47
ε_s	0,282	0,422	0,537	0,623	0,681
Sh	0,172	0,214	0,267	0,328	0,387

По результатам расчетов ни одно решение по ограничению по длине заряда не подходит. Выберем вариант с $m = 9$ и подберем длины трубок так, чтобы их суммарная площадь горения была равна потребной. Также для размещения воспламенителя 7 трубок будет убрано.

Примем для первого ряда с $n_1 = 12$ длину заряда $L_{\text{зар1}} = 40$ мм, для второго с $n_2 = 18$ – $L_{\text{зар2}} = 36$ мм и для последнего с $n_3 = 24$ – $L_{\text{зар3}} = 26$ мм.

Площади горения каждого ряда:

$$S_{\text{г1}} = \pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})n_1L_{\text{зар1}} = 0,0090 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{г2}} = \pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})n_2L_{\text{зар2}} = 0,0123 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{г3}} = \pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})n_3L_{\text{зар3}} = 0,0118 \text{ м}^2;$$

Суммарная площадь горения совпала с потребной

$$S_{\text{г}} = \sum_{i=1}^4 S_{\text{гi}} = 0,0331 \text{ м}^2.$$

Размещение заряда в КС приведен на рис. 2.1.

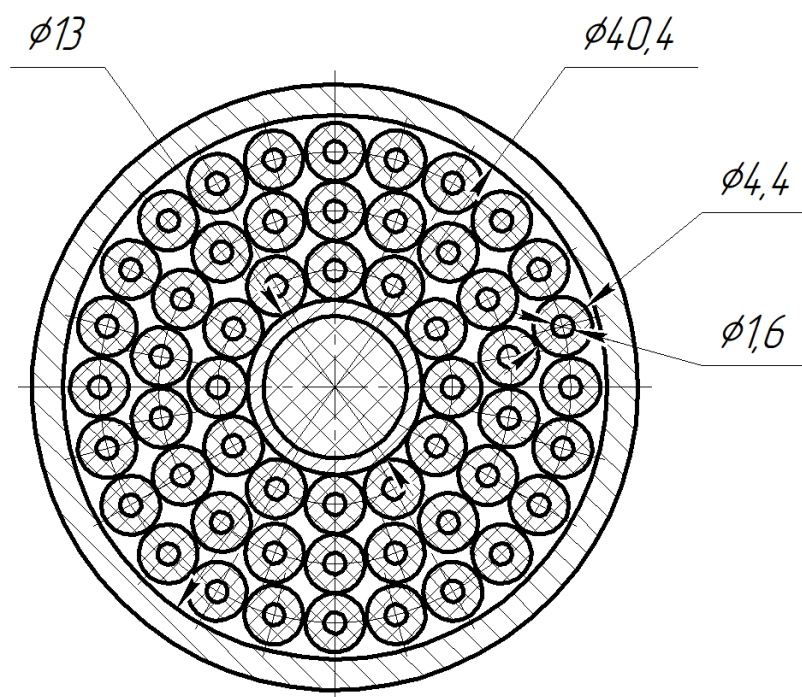


Рис. 2.1. Размещение заряда в КС

Закон горения многошашечного вкладного заряда в нашем случае выглядит следующим образом

$$S(e) = \sum_{i=1}^3 \pi n_i (D_{\text{в}} + e)(L_{\text{зар}i} - e) + \sum_{i=1}^3 \pi n_i (D_{\text{н}} - e)(L_{\text{зар}i} - e) + \\ + \frac{\pi \sum_{i=1}^3 n_i}{2} \left((D_{\text{н}} - e)^2 - (D_{\text{в}} + e)^2 \right).$$

Закон горения заряда приведен на рис. 2.2.

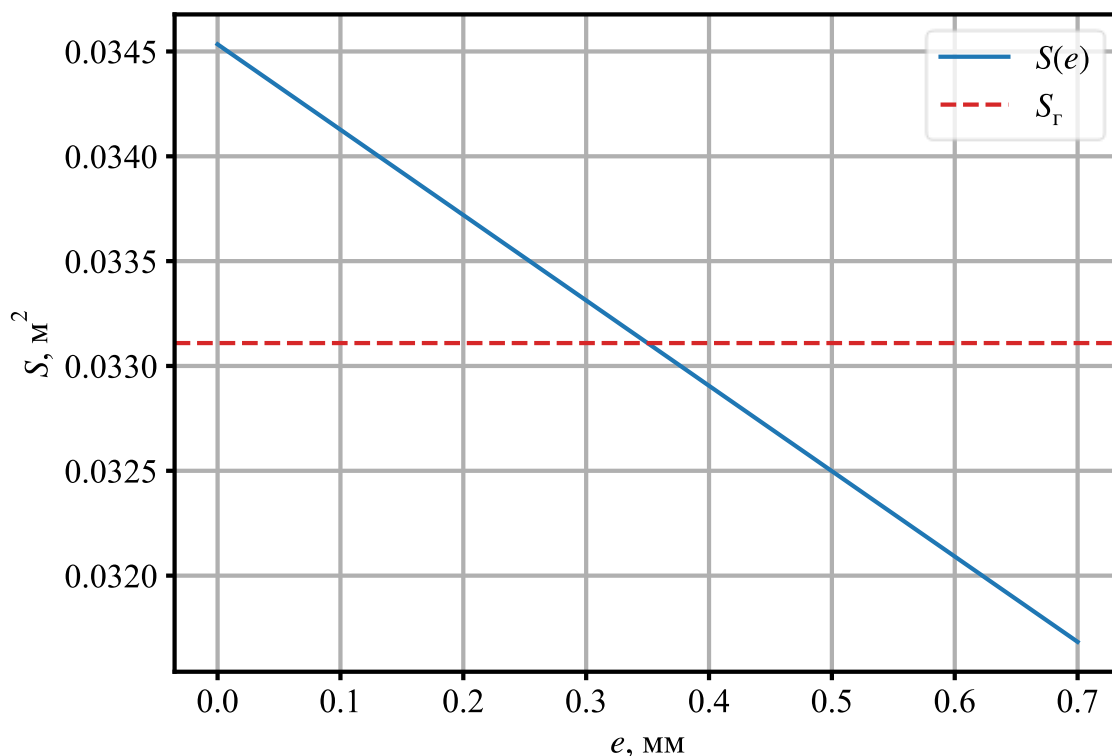


Рис. 2.2. Закон горения заряда

3 Определение массы навески воспламенителя

Рациональной массой воспламенителя является такая масса ω_b , при которой обеспечивается гарантированное воспламенение топлива во всем диапазоне начальных температур T_n заряда. Если воспламенителя недостаточно – существует опасность отсутствия воспламенения заряда.

При выборе воспламенителя рассматривается наиболее неблагоприятная ситуация при минимальной начальной температуре. При такой начальной температуре наблюдается затянутый процесс горения, выражающийся в недостаточном газоприходе.

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

Принимается, что площадь горения поверхности воспламенения изменяется во времени t по следующему закону

$$S_B = S_{0B} \exp\left(-m \frac{t}{t_B}\right),$$

где S_{0B} – начальная площадь горения воспламенителя, m – показатель дегрессивности горения воспламенителя, $t_B = e_B / u_B$ – время горения воспламенителя, e_B – толщина горящего свода.

Давление вспышки

$$p_{всп} = \frac{c_T \rho_T}{\sigma_T} u(p_{\min}, T_H) R_B T_B \frac{T_s - T_H}{T_B - T_s}, \quad (3.1)$$

где $c_T = 1250$ Дж/(кг · К) – удельная теплоемкость топлива, u – скорость горения топлива, $p_{\min} = 1$ МПа – минимальное давление устойчивого горения топлива, R_B – газовая постоянная воспламенителя, $T_s = 550$ К – температура вспышки топлива, T_H – начальная температура топлива, T_B – температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки топлива

$$T_B = \frac{k-1}{k} \frac{Q_B}{R_B}. \quad (3.2)$$

Уравнение, описывающее изменение давления в камере за счет автономного горения воспламенителя

$$p_B = \left(p_H + \frac{b_1}{\frac{m}{t_B} - b_2} \right) e^{-b_2 t} - \frac{b_1}{\frac{m}{t_B} - b_2} e^{-\frac{m}{t_B} t},$$

где коэффициенты b_1 и b_2 :

$$b_1 = \frac{k-1}{W_0} Q_B S_{0B} u_B \rho_B;$$

$$b_2 = \frac{k}{W_0} \sqrt{R_B T_B} A(k) F_{кр} + \frac{k-1}{W_0} \frac{\sigma_T v_T F_{охл}}{R_B},$$

где Q_B – калорийность воспламенителя, S_{0B} – начальная площадь горения воспламенителя, W_0 – начальный свободный объем камеры сгорания двигателя

$$W_0 = \frac{\pi}{4} D_{\text{км}}^2 L_{\text{зар1}} + \frac{\pi}{8} D_{\text{км}}^3 - \frac{\omega}{\rho_{\text{т}}} = 3,517 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Площадь охлаждаемой поверхности

$$F_{\text{охл}} = 1,2\pi D_{\text{км}} L_{\text{зар1}} + \pi(D_{\text{в}} + D_{\text{н}}) \sum_{i=1}^3 n_i L_{\text{зар}i} + \frac{\pi \sum_{i=1}^3 n_i}{2} (D_{\text{в}}^2 + D_{\text{н}}^2) = 0,0524 \text{ м}^2.$$

Максимальное давление воспламенителя

$$p_{\text{вmax}} = \frac{b_1}{b_2} \left(\frac{m}{b_2 t_{\text{в}}} \right)^{\frac{m}{b_2 t_{\text{в}} - m}}.$$

Начальная площадь поверхности горения воспламенителя

$$S_{0\text{в}} = \frac{p_{\text{вmax}} b_2 \left(\frac{m}{b_2 t_{\text{в}}} \right)^{\frac{m}{b_2 t_{\text{в}} - m}}}{(k-1) Q_{\text{в}} u_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} W_0. \quad (3.3)$$

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

$$p_{\text{вmax}} = (1,1 \dots 1,2) p_{\text{всп}-50},$$

где $p_{\text{всп}-50}$ – давление вспышки основного заряда при температуре окружающей среды $t_{\text{н}} = -50^\circ\text{C}$.

Масса навески воспламенителя определяется по следующей формуле

$$\omega_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} e_{\text{в}} S_{0\text{в}} \frac{1 - e^{-m}}{m}. \quad (3.4)$$

Параметры воспламенителя приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры воспламенителя

Показатель	Значение
Теплота сгорания Q_B , кДж/кг	3050
Скорость горения u_B , м/с	0,05
Показатель адиабаты k	1,25
Плотность ρ_B , кг/м ³	1700
Показатель дегрессивности m	3
Толщина горящего свода зерна воспламенителя e_B , мм	2

Температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки основного заряда определяется по формуле (3.2)

$$T_B = \frac{1,25 - 1}{1,25} \frac{3050000}{314} = 1943 \text{ К.}$$

Давление вспышки основного заряда при температуре -50°C по формуле (3.1)

$$p_{\text{всп-50}} = \frac{1250 \cdot 1640}{300} \cdot 0,0034 \cdot 314 \cdot 1943 \frac{550 - 223,15}{1943 - 550} = 3,395 \text{ МПа,}$$

а максимальное давление воспламенителя

$$p_{\text{вmax}} = 1,1 \cdot 3,395 = 3,735 \text{ МПа.}$$

Кривая автономного горения воспламенителя представлена на рис. 3.1.

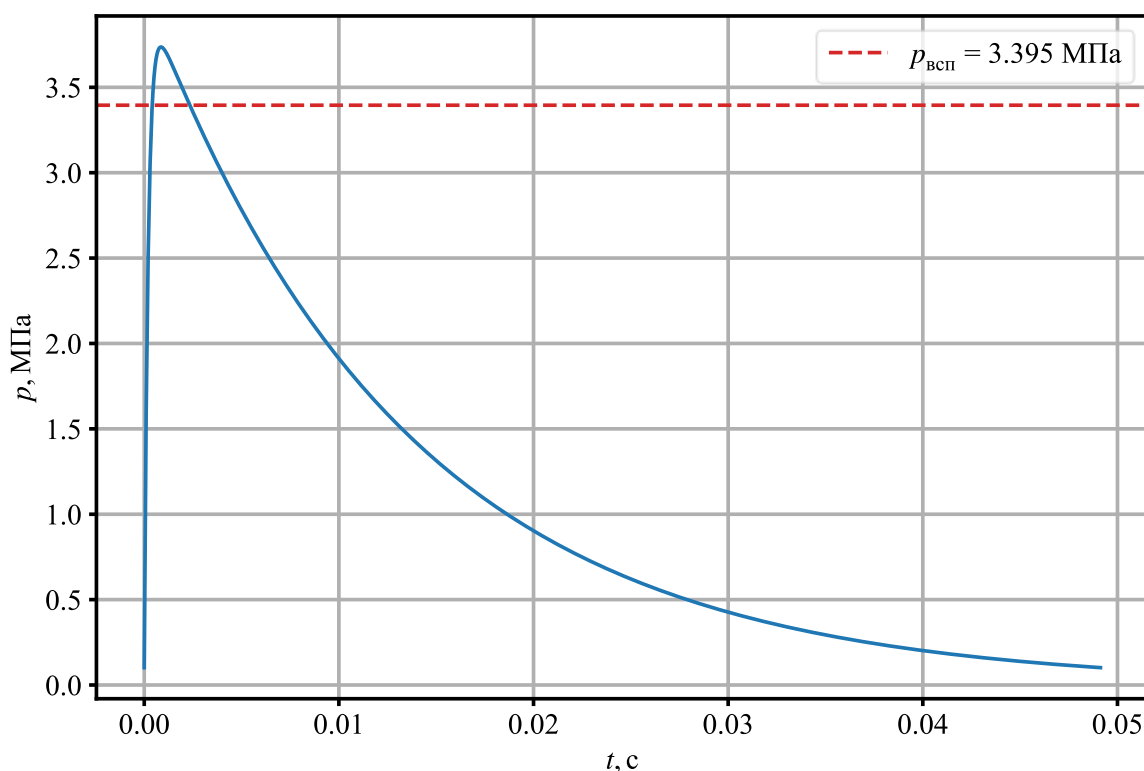


Рис. 3.1. Кривая автономного горения воспламенителя

Начальная площадь поверхности горения воспламенителя согласно формуле (3.3) $S_{0в} = 0,0069 \text{ м}^2$, масса навески воспламенителя по (3.4) составляет $\omega_{в} = 0,007 \text{ кг}$.

Длина навески воспламенителя

$$L_{в} = \frac{4\omega_{в}}{\rho_{в} \pi D_{кв}^2} = 43,0 \text{ мм},$$

где $D_{кв} = 13 - 2 \cdot 1,2 = 10,6 \text{ мм}$ – внутренний диаметр ФВУ, 1,2 мм – толщина стенки перфорированной трубки.

4 Решение основной задачи внутренней баллистики

Система дифференциальных уравнений внутренней баллистики имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \left[(k-1) \frac{Q_B}{\rho_T S_\Gamma u_\Gamma} G_B + (k-1) Q_{\text{ж}} - k \left(\mu_c A(k) \frac{F_{\text{кр}} p}{\rho_T S_\Gamma u_\Gamma} \right)^2 - \right. \\ \left. - (k-1) \frac{\sigma_T v_T F_{\text{охл}} p}{R \rho_T S_\Gamma u_\Gamma} - \frac{kp}{\rho_B \rho_T S_\Gamma u_\Gamma} G_B - \frac{kp}{\rho_T} \right] \frac{\rho_T S_\Gamma u_\Gamma}{W}; \\ \frac{dW}{dt} = \frac{G_T}{\rho_T} + \frac{G_B}{\rho_B}; \\ \frac{de}{dt} = u_\Gamma \Phi_p \Phi_e. \end{cases}$$

Скорость горения основного заряда

$$u_\Gamma = u_1 p^\nu F_3(T_0),$$

Газоприходы основного заряда и воспламенителя определяются по формулам:

$$G_T = \rho_T S_\Gamma u_\Gamma \Phi_p \Phi_e;$$

$$G_B = \rho_B S_{0B} \exp\left(-m \frac{t}{t_B}\right) u_B \Phi_B.$$

Параметры Φ_p , Φ_e и Φ_B являются функциями Хэвисайда и отвечают за следующее. Функция Φ_p отвечает за момент вспышки основного заряда

$$\Phi_p = \begin{cases} 1, & \text{если } p \geq p_{\text{всп}} \text{ или } e > 0; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Функция Φ_e отвечает за горение основного заряда

$$\Phi_e = \begin{cases} 1, & e \leq e_3; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

И, наконец, функция Φ_B отвечает за горение воспламенителя

$$\Phi_B = \begin{cases} 1, & t \leq t_B; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Интегрирование системы ДУ проводится при следующих начальных условиях:

$$\begin{cases} p = p_n; \\ W = W_0; \\ e = 0. \end{cases}$$

Система уравнений интегрируется с шагом $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с.

Индикаторные кривые давлений при трех температурах $t_0 = -50^\circ\text{C}$, $t_0 = +18^\circ\text{C}$ и $t_0 = +50^\circ\text{C}$ приведены на рис. 5.1 и 5.2.

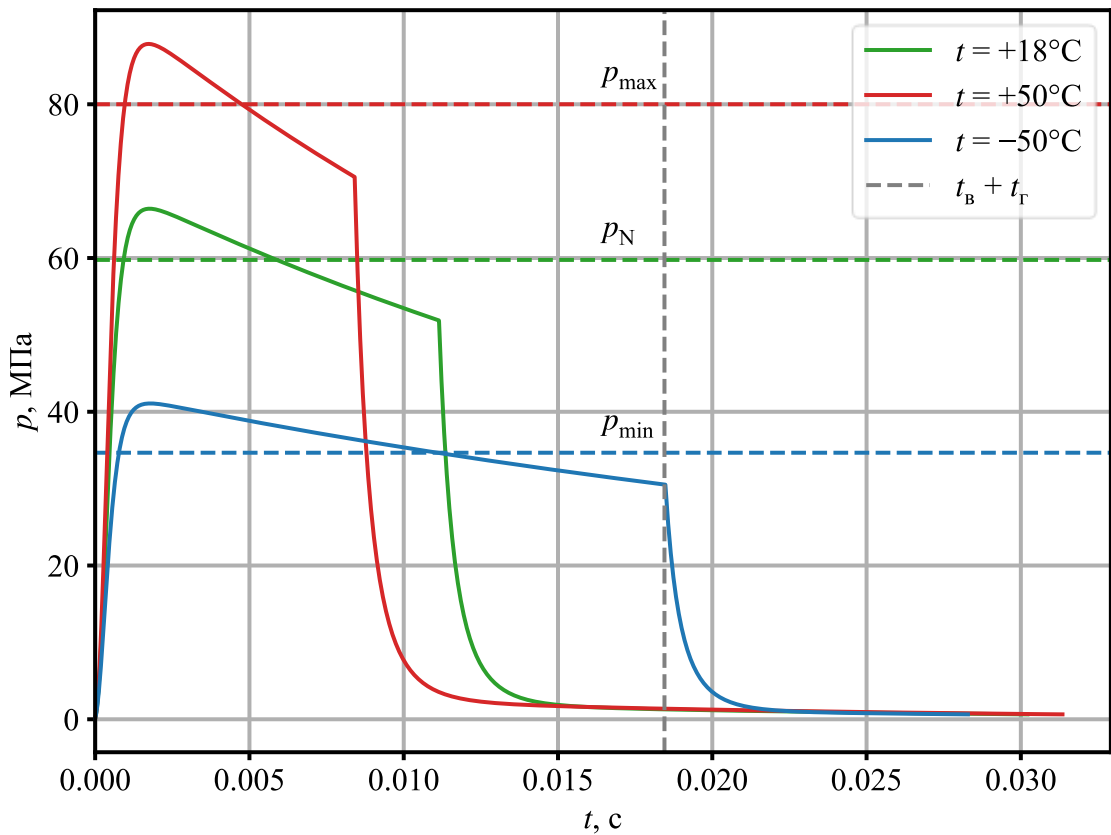


Рис. 4.1. Индикаторные кривые давлений при трех температурах

Тяга определяется по следующей формуле

$$P = G_{\text{т}} V_a + (p_a - p_n) F_a,$$

где F_a – площадь выходного сечения

$$F_a = \frac{\pi \zeta D_{\text{кр}}^2}{4} = 2,187 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Тяга двигателя при трех начальных температурах приведена на рис. 4.2.

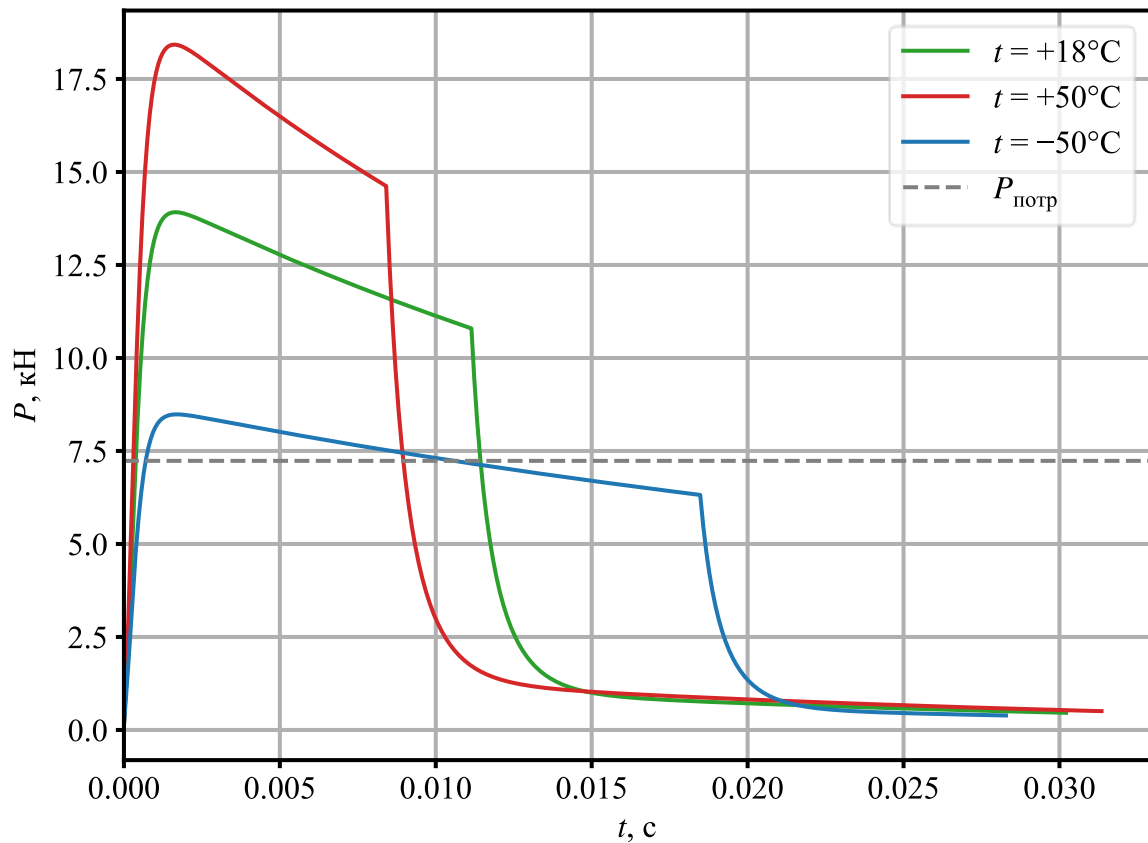


Рис. 4.2. Тяга двигателя при трех начальных температурах

Суммарный импульс ИДК определяется как

$$J_{\Sigma} = \int_0^{t_p} P(t) dt.$$

Результаты расчета суммарных импульсов для трех температур приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты расчета суммарных импульсов

$t, ^\circ\text{C}$	-50	+18	+50
$J_{\Sigma}, \text{Н} \cdot \text{с}$	143,30	155,07	162,31

Из рис. 4.1 и таблицы 4.1 видно, что двигательная установка обеспечивает создание удельного импульса более 140 Н · с.