



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 (сверхзвуковая 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.

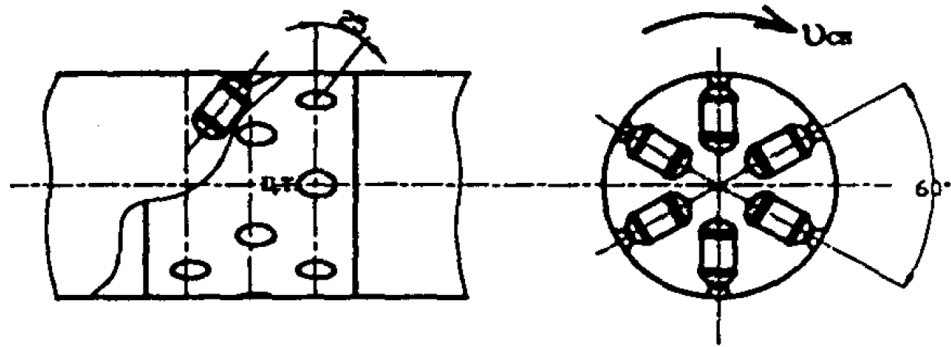


Рис. 1.1. Конструктивная схема ИДК

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  $L_{\text{max}}$  необходимо уменьшить на 4 мм. Тогда  $L_{\text{max}} = 43$  мм.

Предварительная прорисовка расположения ИДК представлена на рис. 1.2.

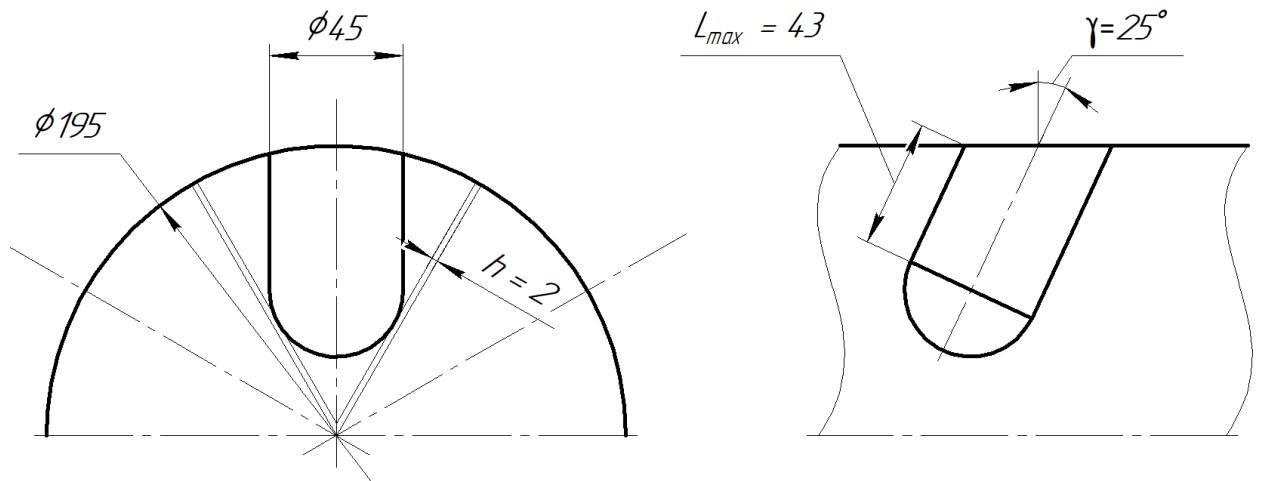


Рис. 1.2. Предварительная прорисовка

Предварительно назначим максимальное давление в камере  $p_{\text{I max}} = 80$  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;  $\sigma_{\text{д}} = 1000$  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:

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

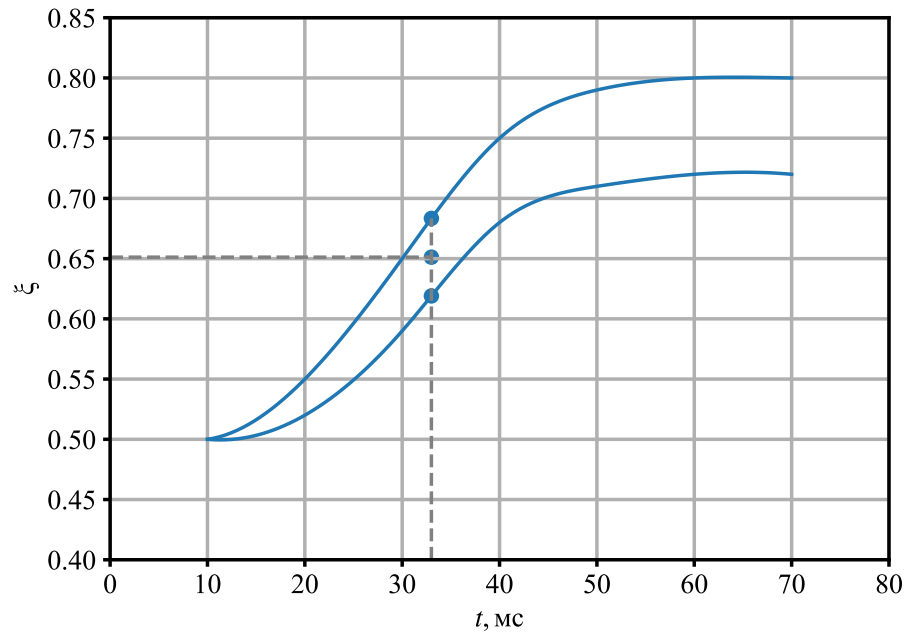
$$t_{\text{д max}} = \frac{1}{v_{\text{min}}} \frac{2\varphi}{2\pi} = 0,042 \text{ с}.$$

Принимаем для дальнейших расчетов  $t_{\text{д}} = 0,033$  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  $\zeta$  и соответствующий им  $K_T$

$\zeta$	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 $\rho_t$ , кг/м <sup>3</sup>	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  $\varepsilon_s > 0,5$ .

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  $n$ ,  $L_3$ ,  $D_H$ ,  $D_B$ , 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  $L_{3max} = 30 \text{ мм}$ .

Наружный диаметр заряда находится по формуле:

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

где  $dz = 1$  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 заряжения

$m$	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
$\varepsilon_s$	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  $L_{\text{зар}1}=40$  мм, для второго с  $n_2=18$  –  $L_{\text{зар}2}=36$  мм и для последнего с  $n_3=24$  –  $L_{\text{зар}3}=26$  мм.

Площади горения каждого ряда:

$$S_{\text{г}1} = \pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})n_1L_{\text{зар}1} = 0,0090 \text{ м}^2;$$

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

$$S_{\text{г}3} = \pi(D_{\text{н}} + D_{\text{в}})n_3L_{\text{зар}3} = 0,0118 \text{ м}^2;$$

Суммарная площадь горения совпала с потребной

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

Размещение заряда в КС приведен на рис. 2.1.

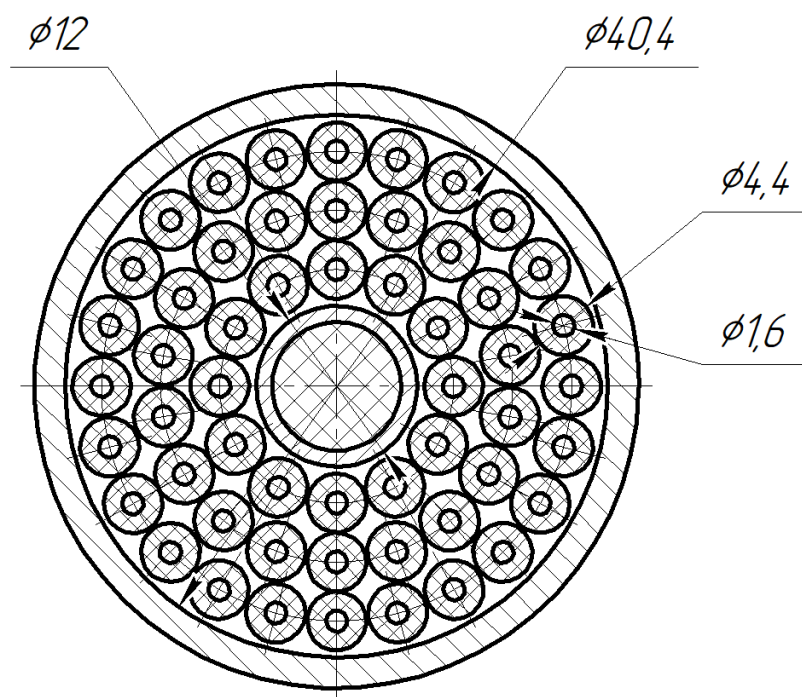


Рис. 2.1. Размещение заряда в КС

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.

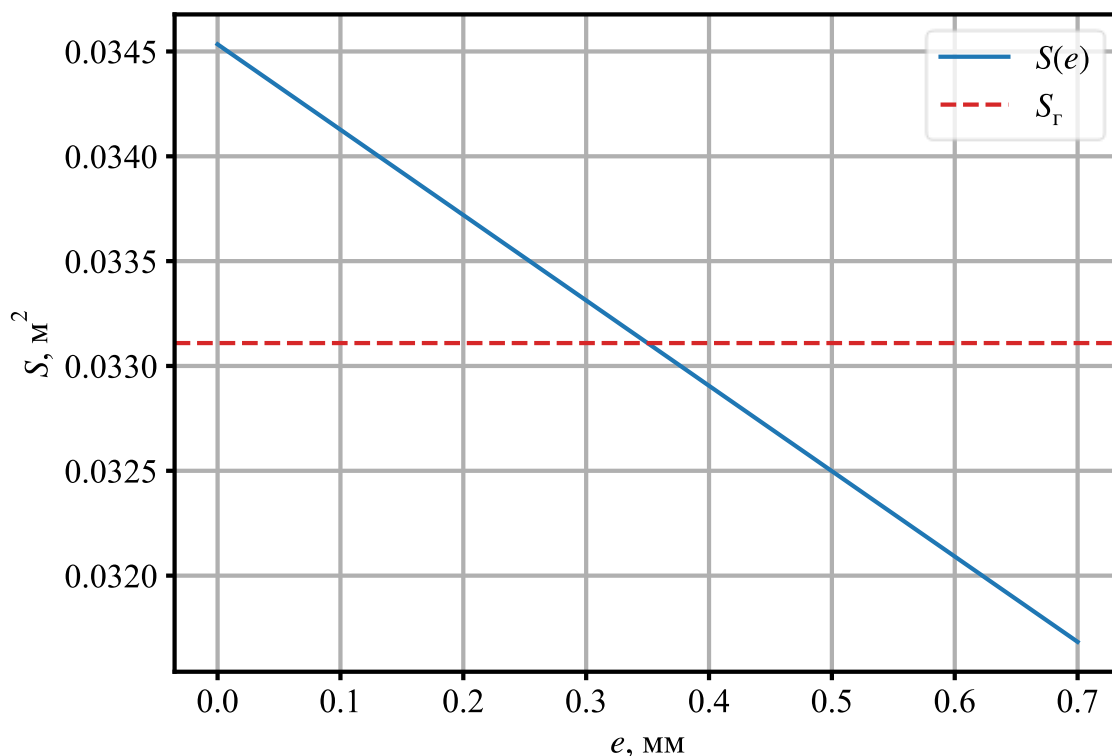


Рис. 2.2. Закон горения заряда

### 3 Определение массы навески воспламенителя

Рациональной массой воспламенителя является такая масса  $\omega_b$ , 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  $-50^\circ\text{C}$  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 $\rho_b$ , кг/м <sup>3</sup>	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  $-50^\circ\text{C}$  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.

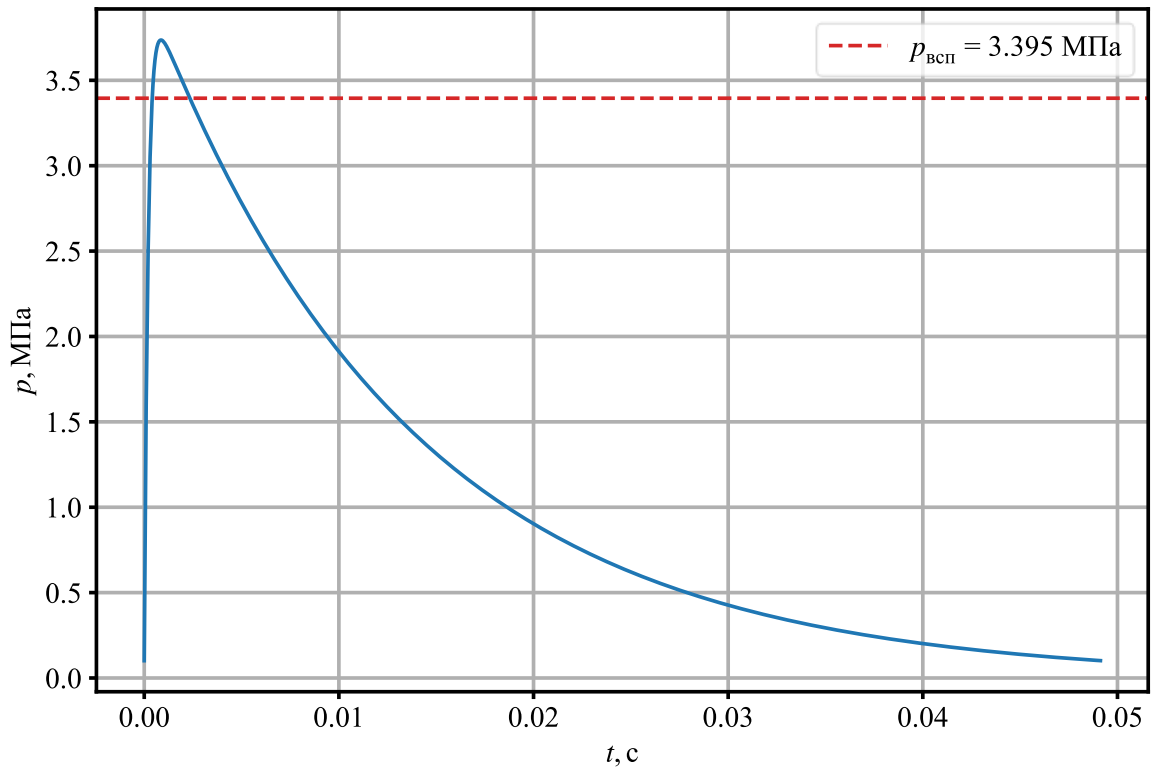


Рис. 3.1. Кривая автономного горения воспламенителя

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

$$L_{в} = \frac{4\omega_{в}}{\rho_{в} \pi D_{\text{КМВ}}^2} = 46,0 \text{ мм},$$

где  $D_{\text{КМВ}} = 12 - 2 \cdot 1,2 = 9,6 \text{ мм}$  – 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  $\Phi_p$ ,  $\Phi_e$  и  $\Phi_B$  являются функциями Хэвисайда и отвечают за следующее. Функция  $\Phi_p$  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  $\Phi_e$  отвечает за горение основного заряда

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

И, наконец, функция  $\Phi_B$  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.

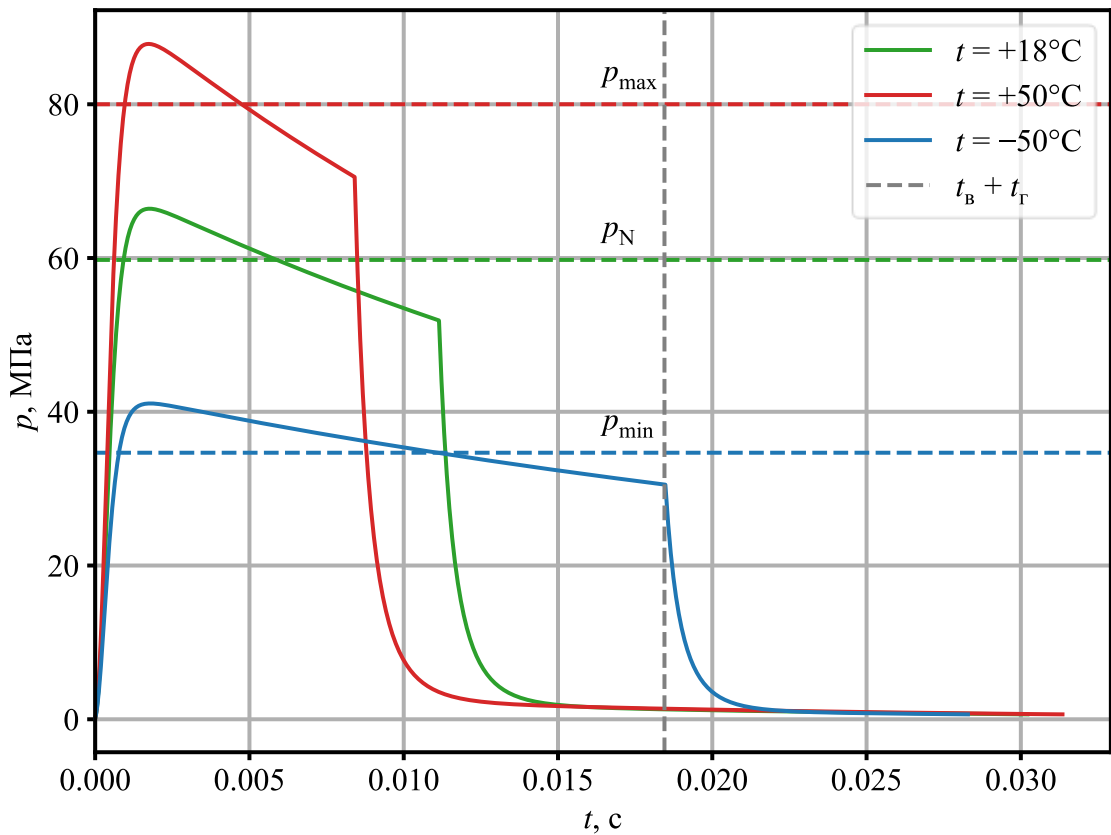


Рис. 4.1. Индикаторные кривые давлений при трех температурах

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.

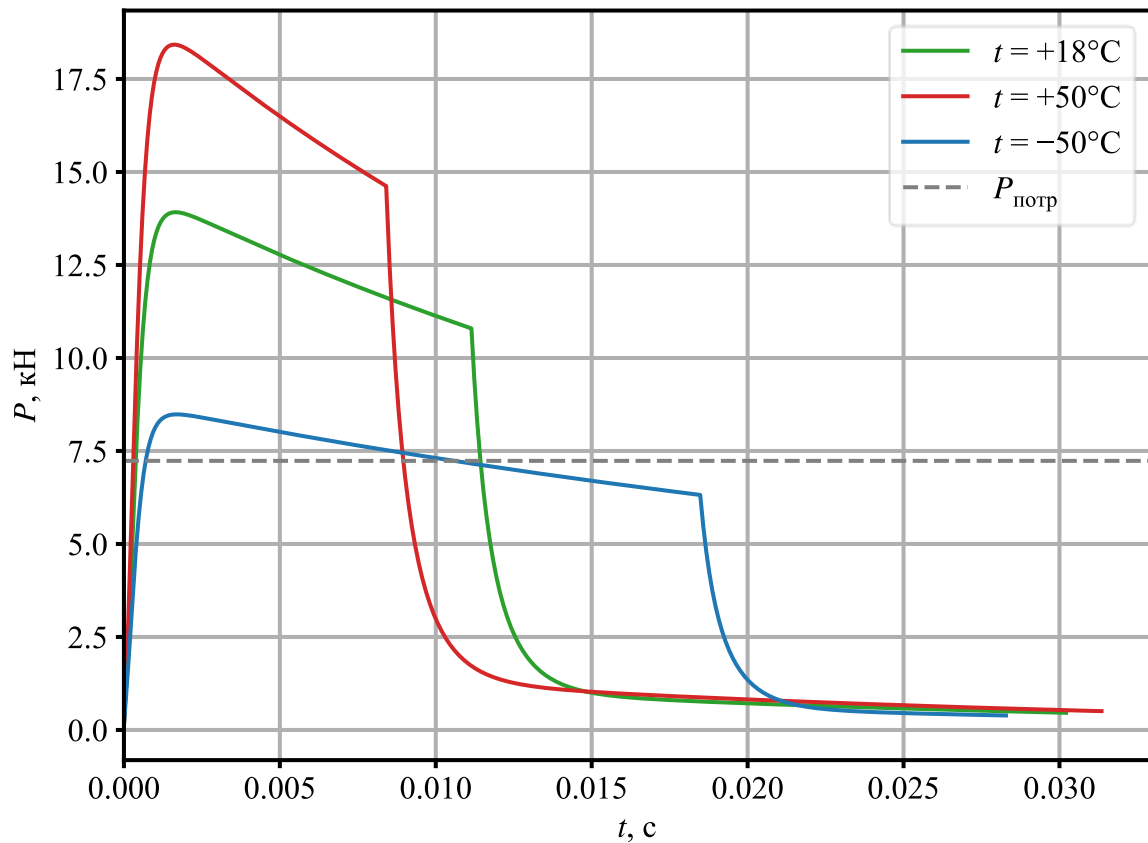


Рис. 4.2. Тяга двигателя при трех начальных температурах

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.

## 5 Конструктивная проработка

Модель ИДК представлена на рис. 5.1, чертеж – на рис. 5.2.

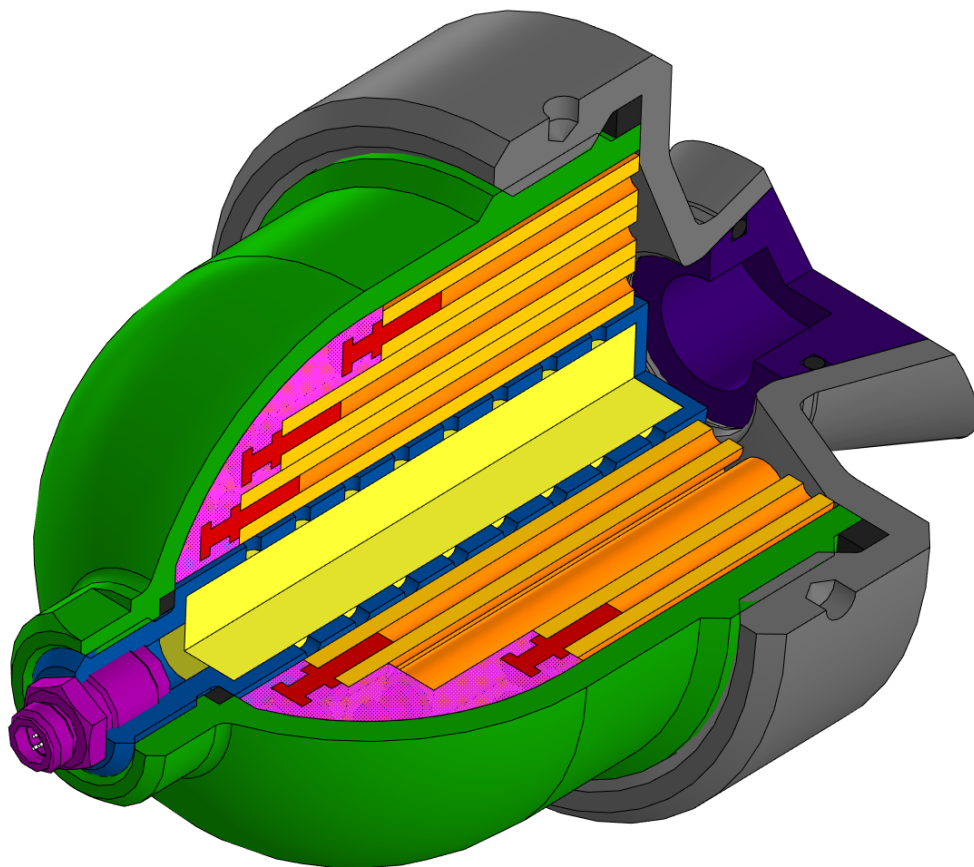


Рис. 5.1. Модель ИДК

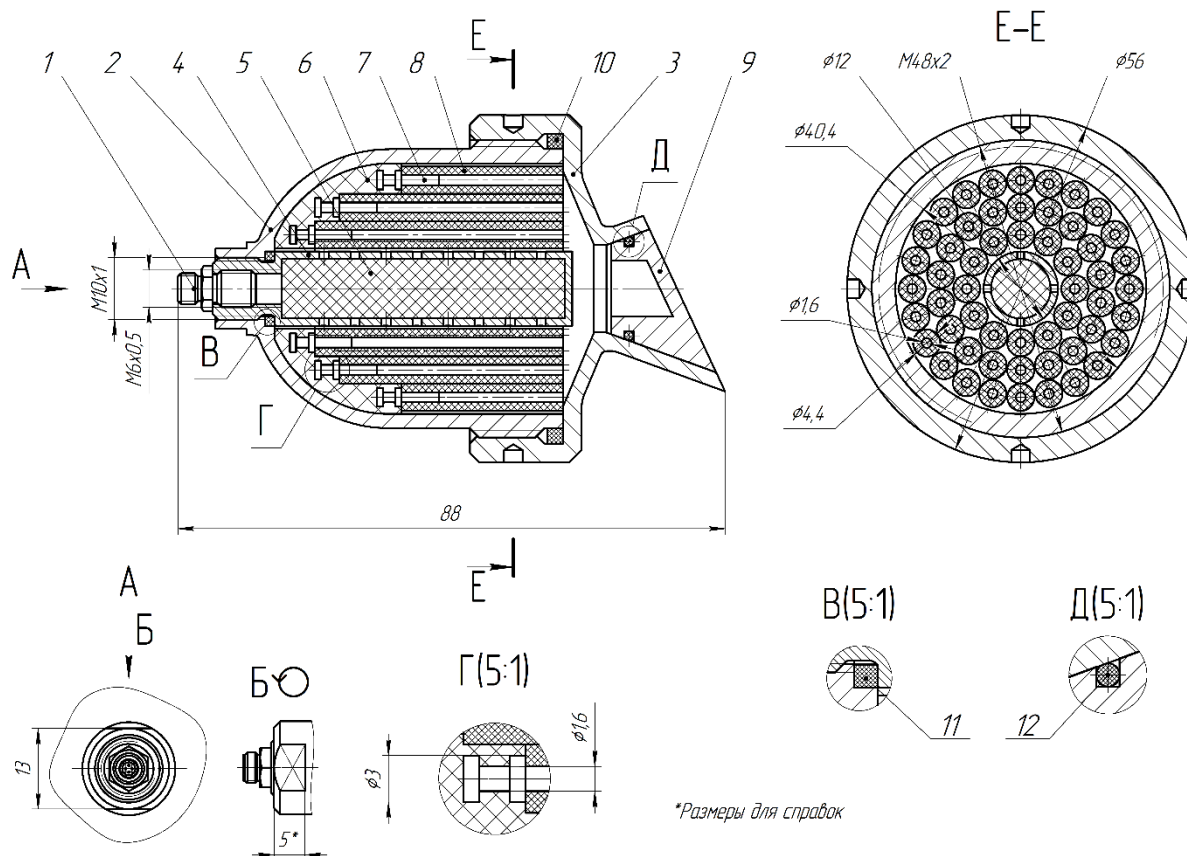


Рис. 5.2. Чертеж ИДК

Корпус 2 выполнен из стали 30ХГСА. Корпус соединен с сопловым блоком 3 резьбовым соединением. В месте соединения толщина деталей увеличена. В месте выхода резьбы для герметизации соединения предусмотрено уплотнение 10. Дополнительно резьбовое соединение заполняется герметиком. Для сборки корпуса предусмотрены лыски (вид Б).

Заднее днище и кососрезанное сопло выполнено как единое целое в виде соплового блока 3. Материал детали – сталь 30ХГСА. Толщина стенок 2,4 мм, толщина в месте соплового стакана и вертикальной стенки увеличена до 3 мм. Для монтажа сделаны 4 отверстия под съемник.

Диафрагма 6 (из эпоксидной смолы) и штыри 7 соединены неразъемно.

Форкамерное воспламенительное устройство состоит из перфорированной трубки 4 и навески воспламенителя 5. Толщина стенок трубки 4 составляет 1,2 мм. Наружное резьбовое соединение предназначено



для соединения ФВУ с корпусом 2, внутреннее – соединения пиропатрона 1 с ФВУ. Для герметизации наружного резьбового соединения предусмотрено уплотнение 11 (вид В).

Сопловая заглушка 9 (из АМг6М) предназначена для защиты внутренностей ДУ от влаги, пыли и других факторов. Поверхность заглушки повторяет внешнюю поверхность корпуса летательного аппарата.

Значения масс элементов конструкции приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Значения масс элементов конструкции

Деталь/Сборочная единица	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объем, м <sup>3</sup>	Масса, г
Корпус	7820	$1,58 \cdot 10^{-5}$	123,6
Сопловой блок	7820	$1,643 \cdot 10^{-5}$	128,5
Перфорированная трубка	7820	$2,260 \cdot 10^{-6}$	17,7
Диафрагма	1200	$7,667 \cdot 10^{-6}$	9,2
Штырь	1800	$50 \cdot 3,554 \cdot 10^{-8}$	$50 \cdot 0,1$
Основной заряд	1600	$2,625 \cdot 10^{-5}$	42,0
Сопловая заглушка	2700	$2,444 \cdot 10^{-6}$	6,6
Кольцо уплотнительное Ø45	1200	$9,166 \cdot 10^{-7}$	1,1
Кольцо уплотнительное Ø 9	1200	$8,333 \cdot 10^{-8}$	0,1
Кольцо уплотнительное Ø14	1200	$8,333 \cdot 10^{-8}$	0,1
Пиропатрон	—	—	4
Сумма (вместе с навеской воспламенителя)	—	—	344,9

Согласно таблице 5.1 полученная масса ИДК меньше допустимой  $m_{\text{ду max}} = 350$  г.

## Закключение

Таким образом, был спроектирован импульсный двигатель коррекции, который создает требуемый суммарный импульс  $140 \text{ Н} \cdot \text{с}$ . Время работы ИДК не более  $0,033 \text{ с}$ , время горения – не более  $0,018 \text{ с}$ .

Исходя из приведенного банка топлив и заданных ограничениях был спроектирован заряд со следующими характеристиками: топливо Б-3, количество шашек  $n = 54$ , внешний и внутренний диаметры шашки  $D_{\text{н}} = 4,4 \text{ мм}$  и  $D_{\text{в}} = 1,6 \text{ мм}$ , длины зарядов 40, 36 и 26 мм. Закон горения заряда приведен на рис. 2.2.

Был произведен расчет массы навески воспламенителя, который обеспечивает гарантированное воспламенение топлива для заданного интервала начальных температур заряда и последующее устойчивое горение топлива. Масса навески воспламенителя оказалась равной  $\omega_{\text{в}} = 0,007 \text{ кг}$ ., начальная площадь поверхности горения воспламенителя  $S_{\text{об}} = 0,0069 \text{ м}^2$ , кривая автономного горения воспламенителя представлена на рис. 3.1.

Была решена основная задача внутренней баллистики посредством интегрирования системы однородных дифференциальных уравнений. В результате были получены графики давлений (рис. 4.1) и тяги (рис. 4.2), при трех температурах  $t_0 = -50^\circ\text{C}$ ,  $t_0 = +18^\circ\text{C}$  и  $t_0 = +50^\circ\text{C}$ . Из рис. 4.1 видно, что рассчитанные минимальное, номинальное и максимальное давления  $p_{\text{imin}} = 80 \text{ МПа}$ ,  $p_{\text{IN}} = 59,7 \text{ МПа}$  и  $p_{\text{imax}} = 34,7 \text{ МПа}$  совпадают со средними давлениями. Средняя тяга при минимальной температуре практически совпадает с потребной тягой  $P = 7234 \text{ Н}$ . Значения суммарного импульса ( $J_{\Sigma-50} = 143,30 \text{ Н} \cdot \text{с}$ ,  $J_{\Sigma+18} = 155,07 \text{ Н} \cdot \text{с}$ ,  $J_{\Sigma+50} = 162,31 \text{ Н} \cdot \text{с}$ ) оказались больше требуемого в техническом задании  $140 \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

Была проведена конструкторская проработка ИДК. Модель и чертеж конструкции приведены на рис. 5.1 и 5.2 соответственно. Масса конструкции

$m_{\text{ду}} = 344,9$  г не превышает заданного в техническом задании допустимой

$m_{\text{ду max}} = 350$  г.

### Список использованной литературы

1. Федоров А. А. Курс лекций по проектированию энергетических установок ракетного оружия.
2. Серпинский О. С. Топливные заряда РДТТ – 2021 г.
3. Толкачева И.О., Максимов М.А., Никитина И.Е. 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.: ил.