

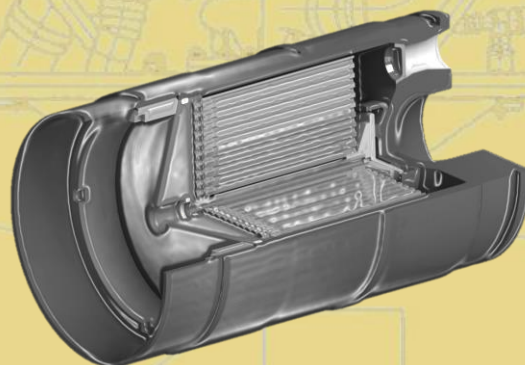
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э.Баумана  
кафедра «Ракетные и импульсные системы»



*Курс лекций*

*Проектирование энергетических установок ракетного оружия*

# *Лекция №14. Алгоритм проектирования ИДК*



*Лектор  
Старший преподаватель  
Федоров А.А.*

*2021 г.*

### Варианты исходных данных для выполнения домашнего задания

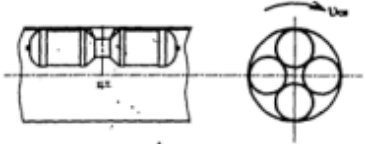
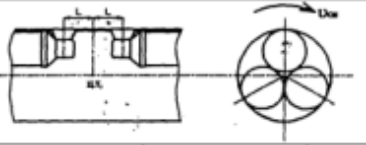

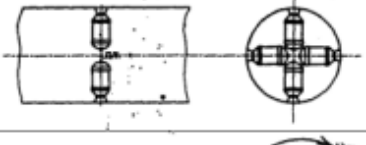
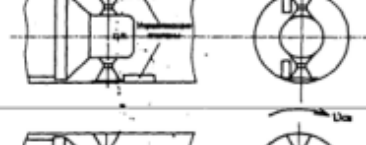


Вариант	$D_{\text{сн}}$ , мм	$M_{\text{сн}}$ , кг	$V_{\text{сн кор}}$ , м/с	$v_{\text{сн}}$ , об/с	$I_{\text{кор}}$ , Н·с	2φ град	$t_{\text{в}}=\Delta t_1$ , мс	$N_{\text{кор}}$	$n_{\text{ду}}$ шт	$\Delta T_{\text{н}}$ , °C	Способ коррекции	Констр схема (№ рис)	$(m_{\text{ду}}^1)_{\text{max}}$ , кг
№1	240	115	220...240	7...9	2100 (1050x2)	120	6	4	8 (4x2)	±50	Многоимп. поперечная коррекция	Рисунок 1	2.05
№2	120	36	280...300	9...11	1120 (560x2)	90	4	3	6 (3x2)	-10...+60	- // -	Рисунок 2	1.07
№3	195	60	260...280	9...11	375	120	4	6	6	-30...+60	- // -	Рисунок 3	0.71
№4	175	45	230...250	6...8	300	90	3	4	4	±60	- // -	Рисунок 4	0.51
№5	186	85	250...270	4...6	9000; P=30 кН	-	8...10 $t_{\text{д}}=300$ мс	N	1	±50	Пропорц. поперечная коррекция	Рисунок 5	13.5
№6	81	15	360...390	5...7	700	60	4	1	1	0... -60	Одноимп. поперечная коррекция	Рисунок 6	1.33
№7	203	85	240...280	7...9	150	120	4	6 (по 3ДУ) 12 (6 по 2 ДУ) + 6 по 1 ДУ) 18 (по 1 ДУ)	18 (3 ряда по 6 ИДК)	±60	Многоимп. поперечная коррекция	Рисунок 7	0.3
№8	195	93	370...410	8...10	140	120	4	6 (по 3ДУ) 12 (6 по 2 ДУ) + 6 по 1 ДУ) 18 (по 1 ДУ)	18 (3 ряда по 6 ИДК)	±50	- // -	Рисунок 9	0.35
№9	220	147	380...420	3...5	900	60	4	12	12	-10...+60	- // -	Рисунок 10	1.75
№10	120	41	250...280	7...9	500	120	5	6	6	-40...+60	- // -	Рисунок 11	0.97
№11	155	45	350...380	8...10	800 (400x2)	90	4	4	8 (4x2)	-40...+60	- // -	Рисунок 12	0.78

Вариант	$D_{\text{сн}}$ , мм	$M_{\text{сн}}$ , кг	$V_{\text{сн кор}}$ , м/с	$v_{\text{сн}}$ , об/с	$I_{\text{кор}}$ , Н·с	2φ град	$t_{\text{в}}=\Delta t_1$ , мс	$N_{\text{кор}}$	$n_{\text{ду}}$ шт	$\Delta T_{\text{н}}$ , °C	Способ коррекции	Констр схема (№ рис)	$(m_{\text{ду}}^1)_{\text{max}}$ , кг
№12	210	105	210...260	5...8	160	120	4	6 (по 3ДУ) 12 (6 по 2 ДУ) + 6 по 1 ДУ) 18 (по 1 ДУ)	18 (3 ряда по 6 ИДК)	±60	- // -	Рисунок 9	0.42
№13	250	162	300...370	3...5	1000	60	4	12	12	-10...+60	- // -	Рисунок 10	2
№14	140	40	280...300	9...11	1200 (600x2)	90	4	3	6 (3x2)	-50...+60	- // -	Рисунок 2	1.3
№15	200	80	350...380	8...10	1000 (500x2)	120	4	4	8 (4x2)	-50...+60	- // -	Рисунок 12	1.2
№16	220	120	300...350	9...11	170	120	4	6 (по 3ДУ) 12 (6 по 2 ДУ) + 6 по 1 ДУ) 18 (по 1 ДУ)	18 (3 ряда по 6 ИДК)	±50	- // -	Рисунок 9	0.5
№17	190	56	230...250	8...10	350	120	3	4	4	±50	- // -	Рисунок 4	0.65
№18	200	102	250...270	7...9	11200; P=35 кН	-	8...10 $t_{\text{д}}=320$ мс	N	1	±60	Пропорц. поперечная коррекция	Рисунок 5	15
№19	205	68	220...240	9...11	400	120	4	6	6	-60...+60	Многоимп. поперечная коррекция	Рисунок 3	0.85
№20*	160	45	300...320	9...1	750	120	4	4	4	±50	- // -	Рисунок 8	1.46

\* - вариант №20 разбирается на семинаре

Таблица 2

Рекомендуемые принципиальные схемы ИДК  
к вариантам домашнего задания

№ рисунка	Принципиальная схема
№1	
№2	
№3	
№4	
№5	
№6	
№7	

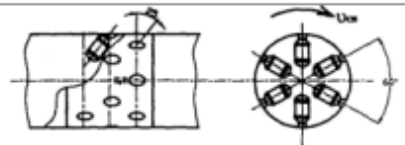
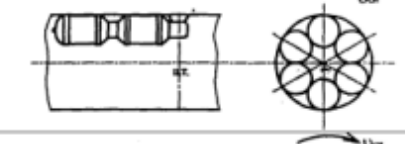


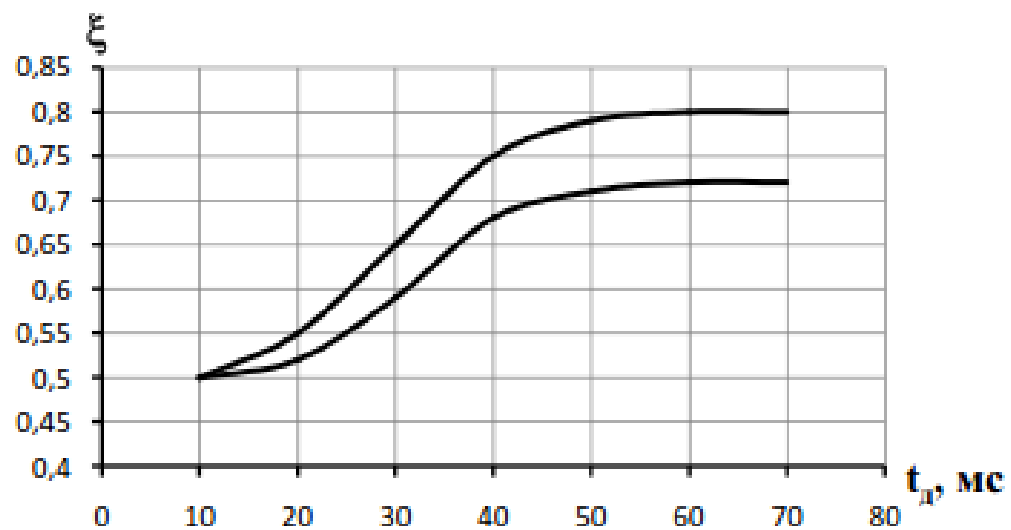
№ рисунка	Принципиальная схема
№9	
№10	
№11	
№12	



Таблица 3

## Основные характеристики топлив

Показатель	Пироксилиновое			Баллиститное			Смесевое
	П-1	П-2	П-3	Б-1	Б-2	Б-3	С-1
Плотность кг/м <sup>3</sup>	1600	1620	1650	1610	1620	1640	1780
Сила пороха Дж/кг	$1.03 \cdot 10^6$	$1.04 \cdot 10^6$	$1.04 \cdot 10^6$	$0.92 \cdot 10^6$	$1.035 \cdot 10^6$	$1.04 \cdot 10^6$	$1.02 \cdot 10^6$
Газовая постоянная Дж/(кг·К)	360	349	359	347	345	338	298
Температура торможения, К	2860	2980	2900	2655	3000	3080	3420
Показатель адиабаты	1.2	1.24	1.25	1.24	1.23	1.25	1.17
Единичный импульс, м/с	2150	2250	2200	2200	2250	2300	2600
Термохимическая константа, К	400	278	400	280	310	370	320
Скорость горения, м/с (р в МПа)	$0.003p^{0.7} (5 < p < 45)$ $0.00046(p-42)^{1.17} + 0.0381$ $(45 < p < 60)$ $0.00086p (p > 60)$	$0.0000315(9.81p)^{1.17}$ $(20 < p < 150)$	$0.000306(9.81p)^{0.78}$ $(39 < p < 200)$	$0.00294p^{0.65}$ $(30 < p < 80)$	$0.000198(9.81p)^{0.39}$ $(34 < p < 150)$	$0.00085(9.81p)^{0.89}$ $(16 < p < 150)$	$0.00595p^{0.31}$ $(2 < p < 30)$ $0.0096p^{0.37}$ $(30 < p < 80)$
Скорость горения, мм/с при T=20°C и p=50 МПа	43.3	44.3	38.4	37.4	49.1	61.1	40.8
Скорость горения, мм/с при T=20°C и p=80 МПа	68.8	76.8	55.4	50.7	74.6	84.5	48.6



10	0,5	0,5
20	0,55	0,52
30	0,65	0,59
40	0,75	0,68
50	0,79	0,71
60	0,8	0,72
70	0,8	0,72

# Пример выполнения домашнего задания по проектированию импульсного двигателя коррекции

Рассмотрим пример *Технического задания*.

Спроектировать блок из  $n=4$  импульсных двигателей коррекции, для поперечной коррекции вращающегося ЛА калибром  $D=160$  мм. Количество импульсов –  $N_{кор}=4$ . Суммарный импульс коррекции не менее  $J_{\Sigma}=750$  Н·с при телесном угле коррекции  $2\phi=120^\circ$ . Частота вращения ЛА  $v_{min}...v_{max}=9...11$  об/с, скорость полета в момент коррекции –  $V_{min}...V_{max}=300...320$  м/с. Время выхода двигателя на режим не более  $t_e=4$ мс. Максимальная масса одного двигателя не более  $m^{(1)}_{\partial y}=1.46$  кг. Температурный диапазон эксплуатации  $T_{min}...T_{max}=-50...+50^\circ\text{C}$ .

Вариант	$D_{сн}$ мм	$M_{сн}$ кг	$V_{сн\ кор}$ м/с	$v_{сн}$ об/с	$I_{кор}$ Н·с	$2\phi$ град	$t_{в}=\Delta t_1$ мс	$N_{кор}$	$n_{ду}$ шт	$\Delta T_n$ °C	Способ коррекции	Констр схема (№ рис)	$(m_{ду}^1)_{max}$ кг
№19	205	68	220...240	9...11	400	120	4	6	6	-60...+60	Многоимп. поперечная коррекция	Рисунок 3	0.85
№20*	160	45	300...320	9...11	750	120	4	4	4	±50	– // –	Рисунок 8	1.46

\* - вариант №20 разбирается на семинаре

$D:=0.16$  м – калибр ЛА

$V_{cp}:=310$  м/с – средняя скорость полета в момент коррекции

$v_{min}:=9$  об/с – минимальная скорость вращения

$v_{max}:=11$  об/с – максимальная скорость вращения

$J_{\Sigma}:=750$  Н·с – суммарный импульс коррекции

$\varphi:=1/2 \cdot 2\pi/3$  – телесный угол коррекции

$n:=4$  – количество импульсных двигателей

$N_{кор}:=4$  – количество коррекций

$t_v:=0.004$  с – время выхода двигателя на режим

$T_{nmax}:=323$  К – максимальная температура окружающей среды

$T_{nmin}:=223$  К – минимальная температура окружающей среды



## Этапы выполнения Домашнего задания

1. Сформировать недостающие исходные данные
2. Спроектировать сопло и рассчитать газодинамические параметры на выходе
3. Спроектировать топливный заряд по критерию минимальной массы
4. Провести проверочный расчет в диапазоне заданных температур применения – решить ОЗВБ
5. Разработать конструкцию спроектированного двигателя
6. Рассчитать массовые характеристики двигателя

## 1.1. Выбор конструктивного решения

Так как полный импульс  $J_{\Sigma}=750 \text{ Н}\cdot\text{с}$  достаточно велик при относительно небольшом диаметре корпуса ИДК  $D=0.16 \text{ м}$ , то принимается решение о симметричном продольном размещении по периферии корпуса ЛА 4-х идентичных однокамерных ТТД с центрально расположенным у каждого двигателя форкамерно-воспламенительным устройством трубчатого типа и односопловыми блоками для каждого двигателя, установленными под углом  $90^\circ$  относительно продольной оси ЛА.

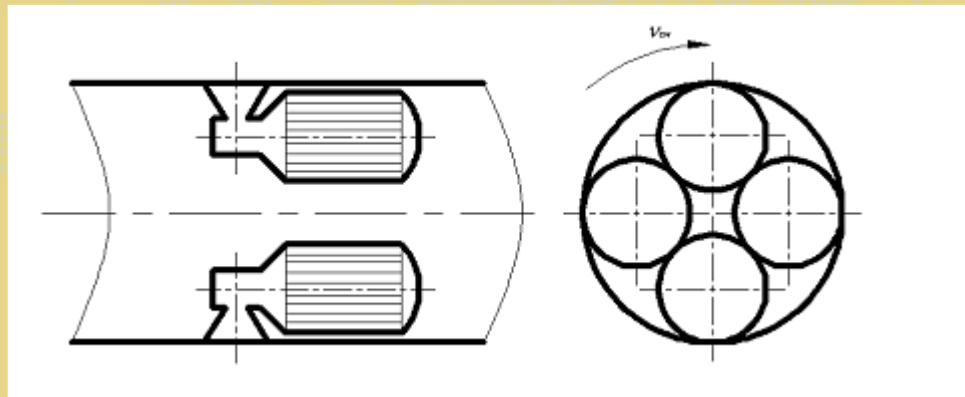


Рисунок 1 – Компонировочное решение

## 1.2. Определение наружного и внутреннего диаметров корпуса ИДК

На основании предварительной прорисовки поперечного сечения ЛА с установленными ИДК, приняв толщину стенки корпуса ЛА 3 мм, и назначив зазор между корпусом ЛА и ИДК 3 мм, внешний диаметр корпуса ИДК  $D_k = 0.0578$  м (см. рисунок 2).

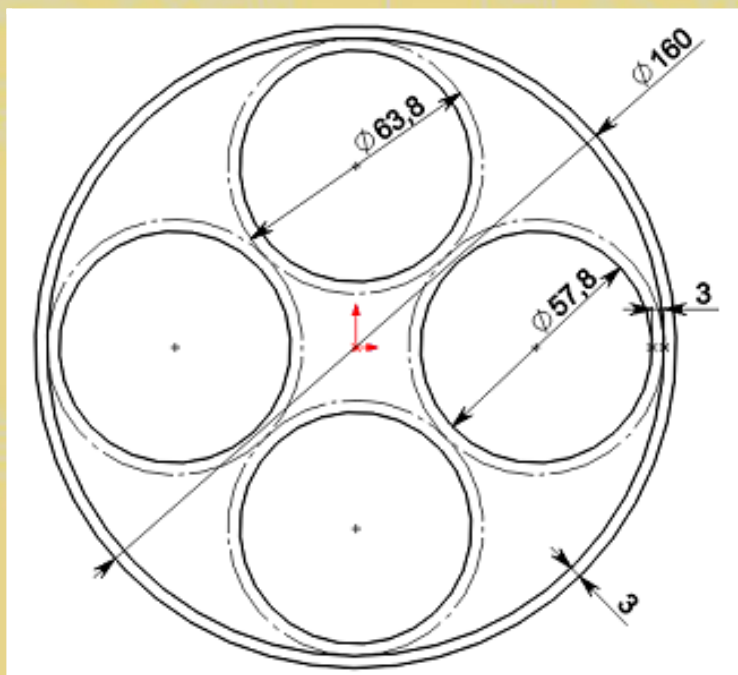
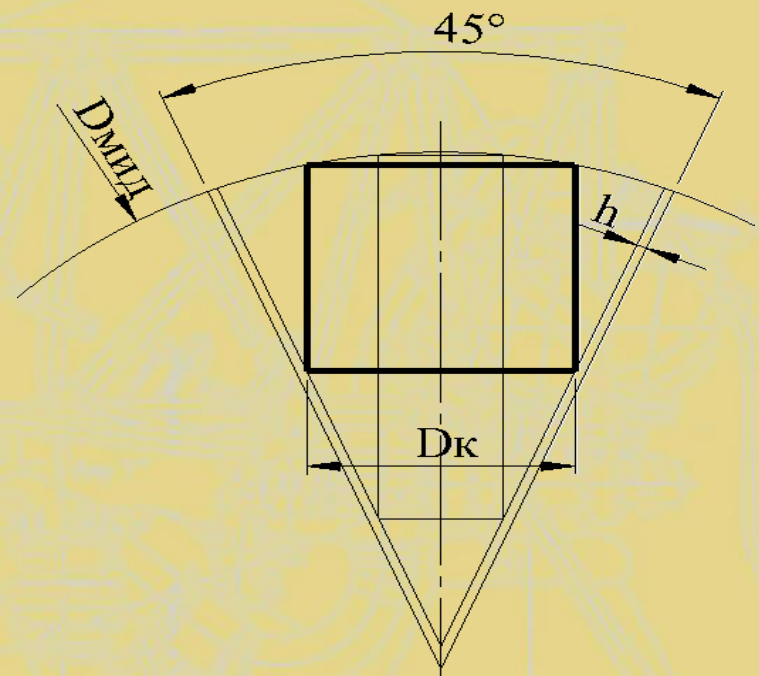
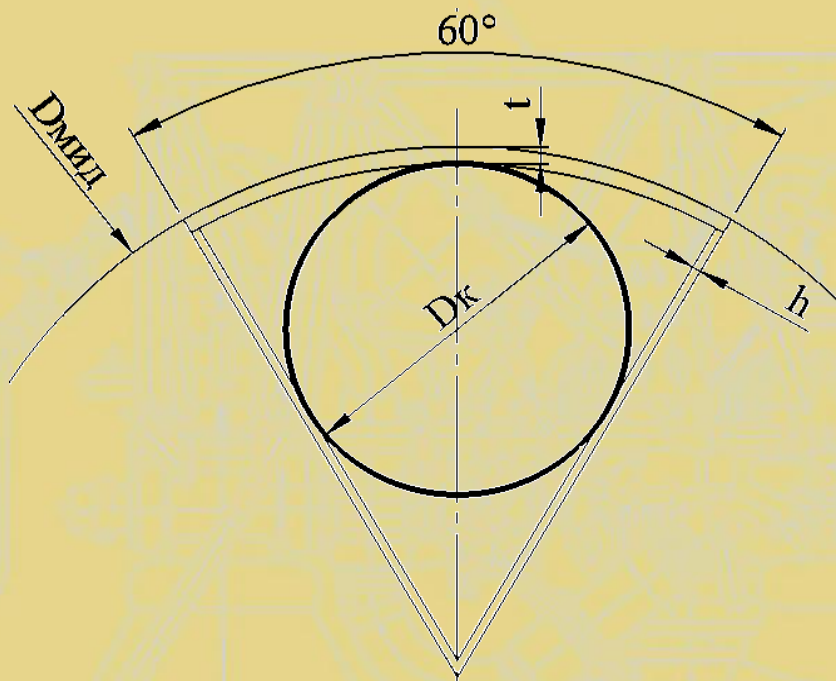


Рисунок 2 – Предварительная прорисовка поперечного заполнения корпуса ЛА





По известным значениям диаметра миделя и количества ИДК, размещаемых в одном сечении строится сектор с углом раствора равным отношению  $360^\circ$  к количеству ИДК. Отступив от границ сектора зазор  $h$  (может быть принят 3-5 мм на сторону), вырисовывается новый сектор (геометрическое место существования объекта), в котором размещается ИДК. В случае радиального расположения невозможно определить размеры однозначно, так как длина двигателя будет зависеть от диаметра. Необходимо в начальном приближении назначить диаметр и найти предельно возможную длину ИДК. Для ИДК с осевым расположением диаметр двигателя определяется однозначно. Также при осевом расположении нужно учесть толщину стенки корпуса ЛА и зазор между стенкой и ИДК (сумма этих размеров обозначена  $t$ ).



В первом приближении назначается максимальное давление в камере двигателя  $p_{I_{\max}} := 45$  МПа. Тогда толщина стенки и соответственно внутренний диаметр КС могут быть найдены по следующим формулам:

$\sigma_d := 1000$  МПа – предел прочности материала стенки (30ХГСА)

$\eta := 1.3$  – коэффициент безопасности

$$\delta_{\text{ст}} := \eta \frac{p_{I_{\max}} D_{\text{к}}}{2\sigma_d} = 0.001697 \text{ м}$$

Округлим в сторону большего значения  $\delta_{\text{ст}} := 1.7 \cdot 10^{-3}$  м

$$D_{\text{км}} := D_{\text{к}} - 2\delta_{\text{ст}} = 0.0544 \text{ м}$$

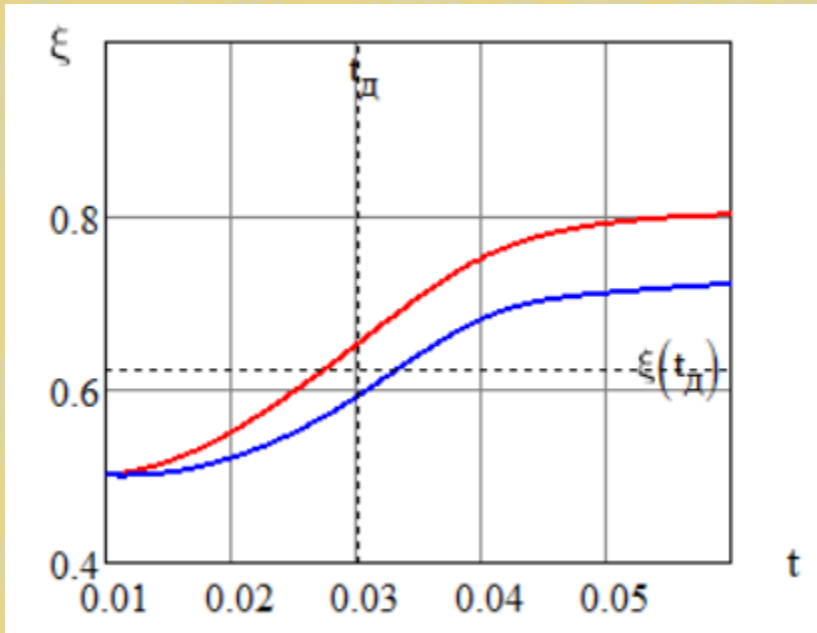
### 1.3. Определение времени работы ИДК

$$t_{Д\min} := \frac{1}{v_{\max}} \frac{2\varphi}{2\pi} = 0.03 \text{ с}$$

$$t_{Д} := t_{Д\min} = 0.03 \text{ с}$$

$$t_{Д\max} := \frac{1}{v_{\min}} \frac{2\varphi}{2\pi} = 0.037 \text{ с}$$

$$\xi(t_{Д}) = 0.623$$



Время горения заряда топлива (первое приближение)

$$t_{Г} := \frac{t_{Д}}{4} \left( 5 \cdot \xi(t_{Д}) - 1 \right) - \frac{3}{8} t_{В} = 0.015 \text{ с}$$

Время последствия тяги

$$t_{П} := t_{Д} - t_{В} - t_{Г} = 0.012 \text{ с}$$

## 1.4. Действительное значение коэффициента тяги

Назначим в первом приближении коэффициент расширения сопла:

$$\zeta := 2.0$$

Тогда теоретический коэффициент тяги может быть найден аппроксимацией таблицы:

$\zeta$	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

$$K_T(\zeta) := 1.6$$

Введем дополнительные потери на тепло и скорость:

$\varphi_1 := 0.92$  – коэффициент потерь на тепло (для развернутого на  $90^\circ$  сопла)

$\varphi_2 := 0.95$  – коэффициент потерь скорости

$$K_D = \varphi_1 \varphi_2 \cdot K_T(\zeta) := 1.398$$



## 1.5. Величина тяги на квазистационарном участке

2

$K_1 := 0.98$  – коэффициент, учитывающий снижение эффективности действия тяги для вращающихся ЛА

$$K_1 = 0.92 \dots 0.98 \text{ для } 2\varphi = \pi/3 \dots 2\pi/3$$

$K_2 := 1.05$  – поправка на усиление реакции выдуваемого потока на поверхность ЛА

$$K_2 = 1.05 \dots 1.3 \text{ – для сверхзвуковых скоростей полета}$$
$$0.9 \dots 1.05 \text{ – для дозвуковых скоростей полета}$$

Приняв, что коррекция происходит при  $H=0$  м ( $a_{зв}=340.4$  м/с), найдем число Маха:

$$M := \frac{V_{ср}}{a_{зв}} = 0.901 \quad \text{дозвуковая скорость полета.}$$

Тогда необходимая тяга на квазистационарном участке равна:

$$P := \frac{J_{\Sigma}}{K_1 K_2 \xi(t_d) t_d} = 38601 \text{ Н}$$



## 1.6. Выбор марки топлива

Для дальнейшего проектирования необходимо выбрать марку топлива. Для ИДК предпочтение необходимо отдать пироксилиновым и баллиститным топливам. Выберем марку П-1:

$f:=1.03 \cdot 10^6$  Дж/кг – сила топлива

$k:=1.2$  – показатель адиабаты

$R:=360$  Дж/кг·К – газовая постоянная продуктов сгорания

$T_0:=2860$  К – температура продуктов сгорания

$\rho_T:=1600$  кг/м<sup>3</sup> – плотность топлива

$B_T:=400$  К – термохимическая константа

Закон горения топлива задается в виде:

$$\frac{de}{dt} = F_1(p)F_2(\lambda)F_3(T_3)$$

где  $F_1(p)$  – зависимость от давления,  $F_2(\lambda)$  – поправка на возникновение эррозионного горения,  $F_3(T_3)$  – поправка на начальную температуру заряда.

При проектировании ИДК, как правило, не допускается эррозионное горение. Поэтому принимается  $F_2(\lambda) \approx 1$ . Зависимость скорости горения от температуры может быть записана через термохимическую константу  $B_T$ :

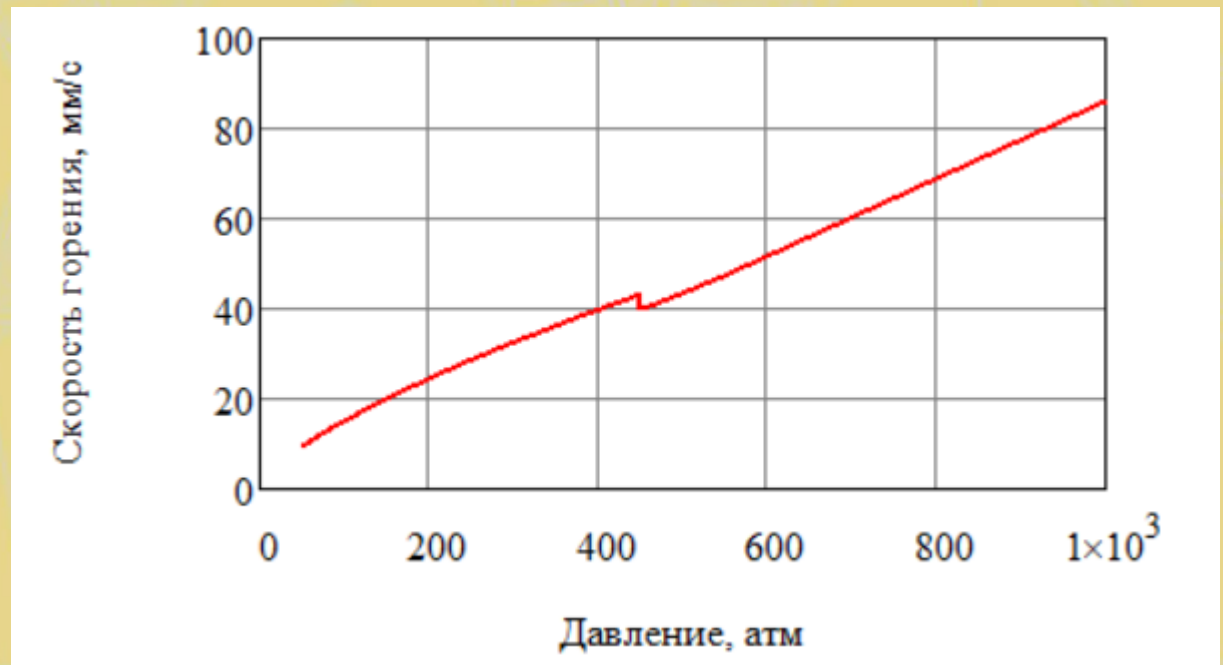
$$F_3(T_3) = \frac{B_T}{B_T - (T_3 - T_N)}$$

где  $T_N = 291$  К – нормальная температура заряда.

Для топлива П-1 закон горения имеет вид:

$$F_1(p) := \begin{cases} 0.003 \cdot \left( \frac{p}{10 \text{ atm}} \right)^{0.7} & \text{if } 50 \text{ atm} \leq p \leq 450 \text{ atm} \\ 0.00046 \left( \frac{p - 420 \text{ atm}}{10 \text{ atm}} \right)^{1.17} + 0.0381 & \text{if } 450 \text{ atm} < p \leq 600 \text{ atm} \\ 0.00086 \frac{p}{10 \text{ atm}} & \text{if } p > 600 \text{ atm} \end{cases}$$

где atm:=101325 Па.





Из уравнения Бори можно вывести систему уравнений, позволяющую найти максимальное, минимальное и номинальное давления по одному заданному. В данном случае по значению максимального давления можно определить минимальное и номинальное давления в камере:

$$p_{N1} := 0.9 \cdot p_{I \max} \quad p_{m1} := 0.6 \cdot p_{I \max}$$

Given

$$\frac{F_1(p_{N1})}{p_{N1}} = \frac{F_1(p_{I \max}) \cdot F_3(T_{3 \max})}{p_{I \max}}$$

$$\frac{F_1(p_{m1})}{p_{m1}} = \frac{F_1(p_{I \max}) \cdot F_3(T_{3 \max})}{p_{I \max} \cdot F_3(T_{3 \min})}$$

$$\begin{pmatrix} p_{IN} \\ p_{Imin} \end{pmatrix} := \text{Find}(p_{N1}, p_{m1}) = \begin{pmatrix} 3.408 \cdot 10^7 \\ 2.019 \cdot 10^7 \end{pmatrix}$$

**!** Эта система не будет иметь решения для закона горения  $u=u_1 p$ , а будет принимать начальное приближение.



## 2.1. Определение геометрических размеров сопла

Площадь критического сечения сопла определяется по формуле тяги:

$$F_{\text{кр}} = \frac{P}{K_d p_{I \text{ min}}} = 8.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Диаметр критического сечения равен:

$$D_{\text{кр}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{кр}}}{\pi}} = 0.0321 \text{ м}$$

Для ИДК сопло в большинстве случаев коническое с прямолинейными образующими. Общие рекомендации по выбору углов наклона образующих такие же, как и для классических РДТТ. Назначим углы наклона входной (дозвуковой) и выходной частей сопла:

$$\varphi_{\text{вх}} := 45 \text{ deg}$$

$$\varphi_{\text{с}} := 20 \text{ deg}$$

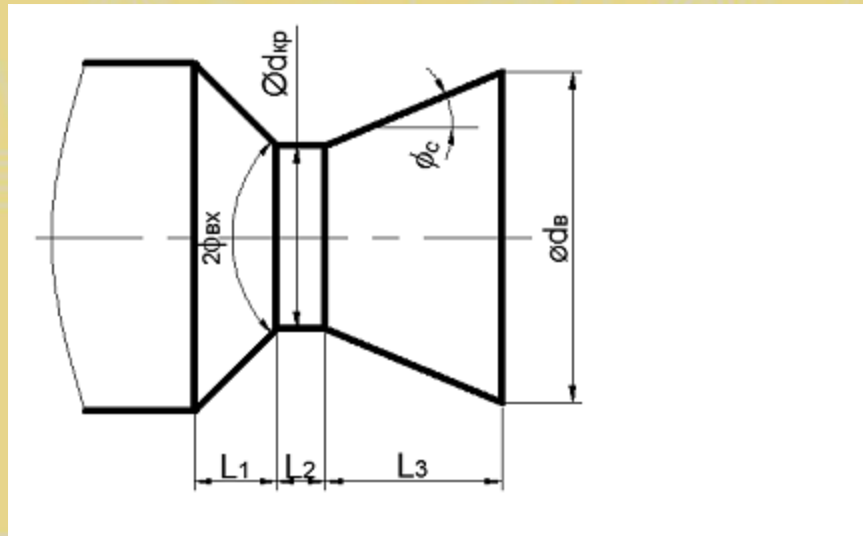
Длины участков сопла могут быть найдены по формулам:

$$L_1 = \frac{D_{\text{км}} - \zeta_{\phi} D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{\text{вх}}}$$

$$L_2 = 0.002 \text{ [м]} \dots D_{\text{кр}}$$

$$L_3 = \frac{D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{\text{с}}} (\zeta - 1) = 0.0441 \text{ м}$$

где  $\zeta_{\phi}$  — учитывает наличие дополнительного объёма с сечением на 10% больше критического для развернутых на  $90^\circ$  сопел ( $\zeta_{\phi}=1.05$  — для развернутых сопел,  $\zeta_{\phi}=1$  — для прямых сопел)

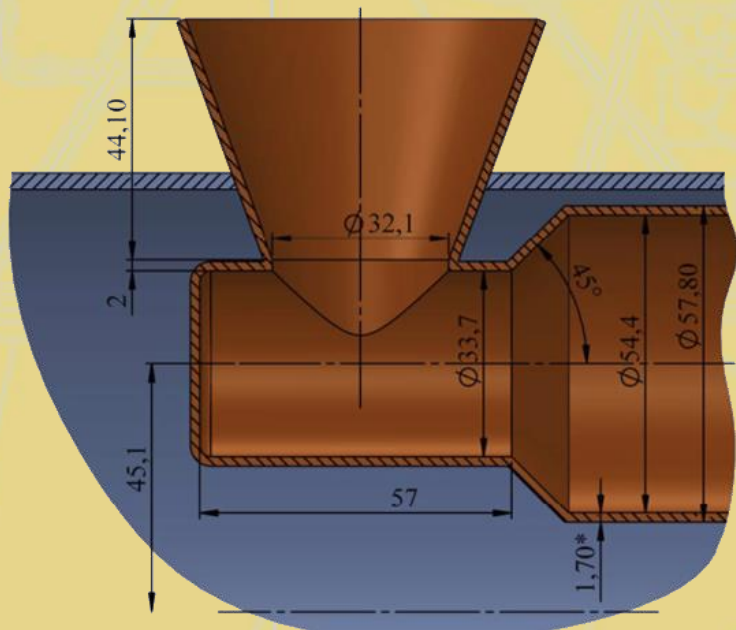


Диаметр форкамеры предсоплового объема должен быть на 10% больше по площади критического сечения. Тогда диаметр форкамеры может быть найден по формуле:

$$D_{\phi} := \sqrt{1.1 \cdot d_{\text{кр}}} = 0.0337 \text{ м}$$

Объем форкамеры должен быть не менее объема полусферы с диаметром камеры сгорания. Тогда длина форкамеры определится по формуле:

$$L_{\phi} := \frac{0.5 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{к}}}{2} \right)^3}{\frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4}} = 0.057 \text{ м}$$



Применительно к выбранной компоновке по полученным размерам прорисовываются внутренние обводы сопла.

Сопло выступает за габариты корпуса. Для уменьшения габарита сопла необходимо уменьшить площадь критического сечения, а следовательно увеличить давление в камере. Необходимый диаметр критического сечения находится из геометрических соображений согласно рисунку 5.

Рисунок 5 - Предварительная прорисовка сопла



Из геометрических соображений находится диаметр критического сечения, обеспечивающий возможность размещения сопла:

$$0.0451 + D_{\phi} / 2 + L_2 + L_3 = D / 2$$

$$d_{\text{кр}2} := 0$$

Given

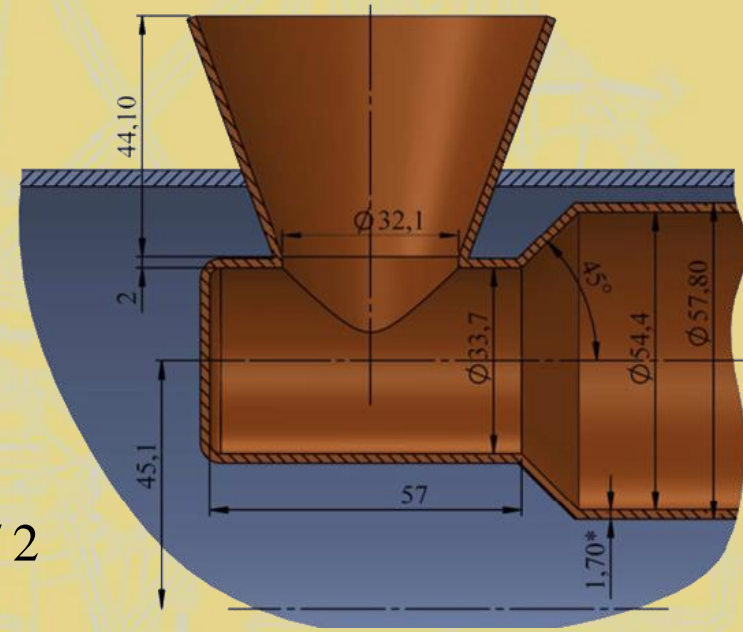
$$0.0451 + \sqrt{1.1} \cdot d_{\text{кр}2} / 2 + L_2 + \frac{d_{\text{кр}2}}{2 \tan(\varphi_c)} (\zeta - 1) = D / 2$$

$$d_{\text{кр}} := \text{Find}(d_{\text{кр}2}) = 0.0174 \text{ м}$$

Тогда во втором приближении давление в камере равно:

$$p_{\text{II N}} = \frac{4P}{K_d \pi d_{\text{кр потр}}^2} = 116.3 \text{ МПа}$$

Полученное значение выходит за границы устойчивой работы топлива П-1.





Изменим марку топлива. Выберем марку Б-3:

$f:=1.04 \cdot 10^6$  Дж/кг – сила топлива

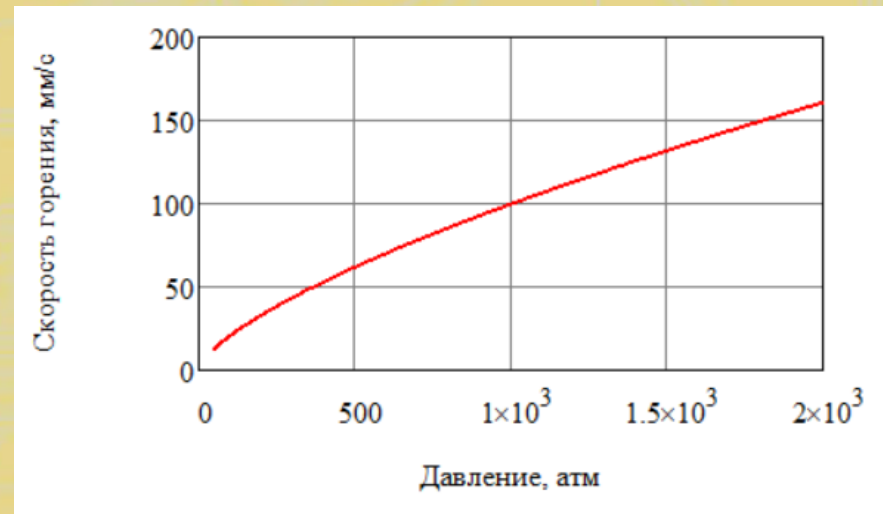
$k:=1.25$  – показатель адиабаты

$R:=338$  Дж/кг·К – газовая постоянная продуктов сгорания

$T_0:=3080$  К – температура продуктов сгорания

$\rho_T:=1640$  кг/м<sup>3</sup> – плотность топлива

$V_T:=370$  К – термохимическая константа



$$F_1(p) := 0.00085 \cdot \left( 9.81 \frac{p}{10^6} \right)^{0.69} \quad \text{if } 16 \cdot 10^6 \leq p \leq 150 \cdot 10^6$$

Воспользуемся формулой Бори. В данном случае по значению номинального давления можно определить минимальное и максимальное давления в камере:

Given

$$p_{\max 2} := 1.2 \cdot p_{\text{IIN}} \quad p_{\min 2} := 0.8 \cdot p_{\text{IIN}}$$

$$\frac{F_1(p_{\max 2})}{p_{\max 2}} = \frac{F_1(p_{\text{IIN}})}{p_{\text{IIN}} \cdot F_3(T_{3 \max})}$$

$$\frac{F_1(p_{\min 2})}{p_{\min 2}} = \frac{F_1(p_{\text{IIN}})}{p_{\text{IIN}} \cdot F_3(T_{3 \min})}$$

$$\begin{pmatrix} p_{\text{IImax}} \\ p_{\text{IImin}} \end{pmatrix} := \text{Find}(p_{\max 2}, p_{\min 2}) = \begin{pmatrix} 15.22 \cdot 10^7 \\ 7.007 \cdot 10^7 \end{pmatrix}$$

Пересчитаем зависящие от давления параметры:

$$\delta_{\text{ст}} := \eta \frac{p_{\text{IImax}} D_{\text{к}}}{2\sigma_{\text{д}}} \approx 0.0057 \text{ м}$$

Толщина стенки значительна, принято решение перейти на сталь СП-33 с  $\sigma_{\text{д}} = 1400 \text{ МПа}$

$$\delta_{\text{ст}} := \eta \frac{p_{\text{IImax}} D_{\text{к}}}{2\sigma_{\text{д}}} \approx 0.0041 \text{ м}$$

$$D_{\text{KM}} := D_{\text{K}} - 2\delta_{\text{CT}} = 0.0496 \text{ м}$$

$$F_{\text{кр}} = \frac{P}{K_{\text{д}} p_{\text{IN}}} = 2.374 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$D_{\text{кр}} := \sqrt{\frac{4F_{\text{кр}}}{\pi}} = 0.0174 \text{ м}$$

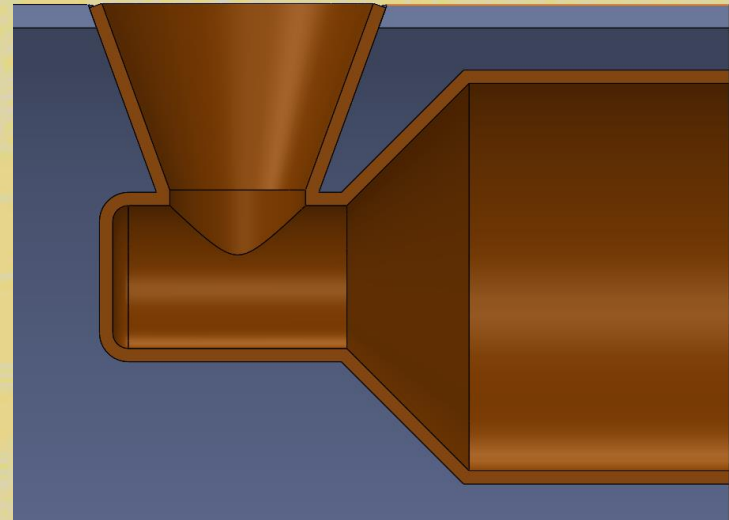
$$L_1 = \frac{D_{\text{KM}} - \zeta_{\phi} D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{\text{BX}}} = 0.016 \text{ м}$$

$$L_2 = 0.002 \text{ м}$$

$$L_3 = \frac{D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{\text{c}}} (\zeta - 1) = 0.0239 \text{ м}$$

$$D_{\phi} := \sqrt{1.1} \cdot d_{\text{кр}} = 0.0183 \text{ м}$$

$$L_{\phi} := \frac{0.5 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{K}}}{2} \right)^3}{\frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4}} = 0.193 \text{ м}$$





## 2.1. Расчет газодинамических параметров в выходном сечении сопла

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

$$\lambda_1 := 1.5$$

Given

$$q(\lambda_1) = \frac{1}{\zeta^2}$$

$$\lambda_a := \text{Find}(\lambda_1) = 2.07$$

Критическая скорость звука

$$a_{\text{кр}} := \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} = 1076 \text{ м/с}$$

Скорость в выходном сечении сопла

$$V_a := \lambda_a a_{\text{кр}} = 2226 \text{ м/с}$$

Давление в выходном сечении сопла:

$$p_a := p_{\text{ин}} \cdot \pi(\lambda_a) = 4.595 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Температура в выходном сечении сопла:

$$T_a := T_0 \cdot \tau(\lambda_a) = 1614 \text{ К}$$

Плотность потока в выходном сечении сопла:

$$\rho_a := \frac{p_a}{R \cdot T_a} = 8.423 \text{ кг/м}^3$$

### 3. 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 (не допуск эрозионного горения).

Коэффициент поперечного заполнения сечения ДУ:

$$\varepsilon_s = \frac{F_{\Sigma \text{торца}}}{F_{\text{кам}}} > 0.5$$

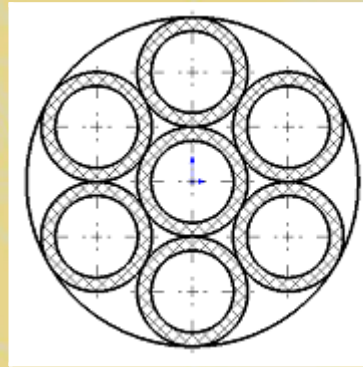


Рисунок 6 - Поперечное заполнение КС



Для импульсных ракетных двигателей используют только вкладные заряды, изготавливаемые чаще всего из пироксилинового или баллиститного твердого топлива. Чаще всего применяются трубчатые заряды.

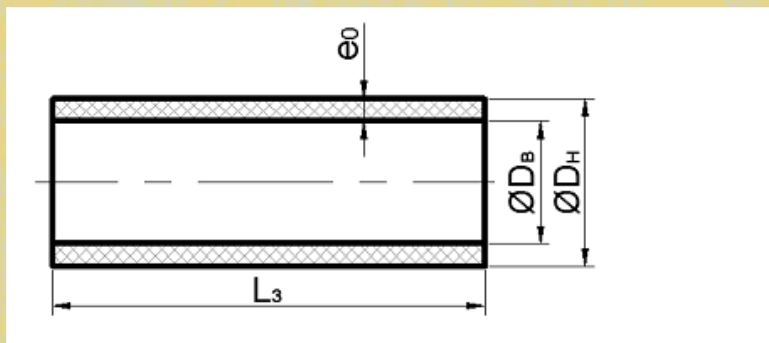


Рисунок 7 - Геометрические параметры заряда

Наибольшая плотность укладки шашек многошашечного заряда определяется формулой:

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

где  $m$  – модуль, целое число шашек, укладываемое по диаметру камеры

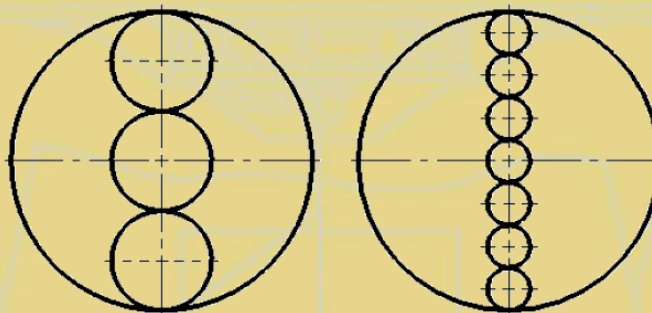


Рисунок 8 - Иллюстрация "модуля"

```

n(m) :=
  i ← 1
  k ← 0
  while i ≤ m
    k ← k + (m - i)
    i ← i + 2
  1 + 3k

```

Зависимость числа шашек от модуля

m	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
n	1	7	19	37	61	91	127	169	217	271

Скорость горения выбираемых топлив обычно ограничена «снизу» значениями 30-50 мм/с, так как тонкосводные элементы не могут быть бесконечно тонкими, исходя из его прочностных характеристик и технологии производства.

При выборе необходимо выбирать топливо с малой температурной чувствительностью скорости горения, а также малой эрозионной чувствительностью.

Высокое значение тяги за малый промежуток времени приводит к высоким перегрузкам, следовательно топливо должно обладать высокой механической прочностью и высокой ударной вязкостью. Наиболее подходящими являются пироксилиновые пороха.

После выбора вида и марки пороха, а также формы приступают к определению параметров заряжания.

$$A(k) := \sqrt{k \cdot \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

Назначается коэффициент расхода сопла

$$\mu_c := 0.95$$

Расход газов через сопло равен:

$$G_p := \frac{\mu_c A(k) F_{кр} p_{II \min}}{\sqrt{RT_0}} = 16.913 \text{ кг/с}$$

Опорный запас топлива:

$$\omega_T := G_p \cdot t_T = 0.246 \text{ кг}$$



Проектирование заряда ИДК ведется для наихудшего случая – минимальной температуры окружающей среды. Расчетная толщина горящего свода при этом определяется по формуле:

$$e_0 := 2F_1(p_{\Pi \min})F_3(T_{з \min})t_r = 1.915 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Потребная площадь горения:

$$S_r := \frac{\omega_T}{\rho_T u_{r \min} t_r} = 0.156 \text{ м}^2$$

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 каждого из вариантов будет максимальное значение коэффициента поперечного заполнения КС при непревышении параметром Победоносцева критического значения. И выполнение технологических ограничений.

Зададимся  $\kappa_{кр} := 180$  – критическое значение параметра Победоносцева

Зададимся значениями модуля:

$$m := (3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 11)^T$$

Наружный диаметр заряда находится по формуле:

$$D_{H_j} = \frac{D_{\text{км}} - dz}{m_j}$$

где  $dz$  – зазор между зарядом и стенкой. Назначим  $dz:=0.001$  м

Внутренний диаметр заряда определяется по формуле:

$$D_{B_j} = D_{H_j} - 2e_0$$

Общее число шашек равно:

$$n_j = n(m_j)$$

Длина заряда:

$$L_{3j} = \frac{S_{\Gamma}}{\pi \cdot n_j (D_{H_j} + D_{B_j})}$$

Параметр Победоносцева по внутреннему каналу:

$$\kappa_{BH_j} := \frac{4L_{3j}}{D_{B_j}}$$

Параметр Победоносцева по наружной поверхности:

$$\kappa_{\text{нар}j} := \frac{4n_j D_{H_j} L_{3j}}{D_{\text{км}}^2 - n_j D_{H_j}^2}$$

Коэффициент заполнения поперечного сечения:

$$\varepsilon_{S_j} := \frac{D_{H_j}^2 - D_{B_j}^2}{D_{KM}^2} n_j$$

Критерий Шварца:

$$Sh_j := \frac{4F_{кр}}{\pi D_{KM}^2 (1 - \varepsilon_{S_j})}$$

Сведем все вычисления в таблицу:

m	3	5	7	9	11
n	7	19	37	61	91
D <sub>н</sub> , мм	16.2	9.7	6.9	5.4	4.4
D <sub>в</sub> , мм	12.4	5.9	3.1	1.6	0.6
L <sub>з</sub> , мм	249	167.9	133.8	117.1	109.2
κ <sub>вн</sub>	80.4	113.9	171.7	297.5	738.5
κ <sub>нар</sub>	181.2	186.4	203.1	226.3	256.8
ε <sub>с</sub>	0.311	0.461	0.579	0.662	0.709
Sh	0.178	0.228	0.292	0.363	0.422



Увеличим зазор между зарядом и корпусом до 2 мм.

m	3	5	<b>7</b>	9	11
n	7	19	<b>37</b>	61	91
D <sub>н</sub> , мм	15,9	9,5	<b>6,8</b>	5,3	4,3
D <sub>в</sub> , мм	12,0	5,7	<b>3,0</b>	1,5	<b>0,5</b>
L <sub>з</sub> , мм	254,9	172,3	<b>137,7</b>	120,9	113,4
κ <sub>вн</sub>	84,6	121,0	<b>185,2</b>	330,6	905,5
κ <sub>нар</sub>	162,2	168,8	<b>184,9</b>	206,9	236,0
ε <sub>s</sub>	0,304	0,45	<b>0,563</b>	0,641	0,683
Sh	0,176	0,223	<b>0,281</b>	0,342	0,388

Примем вариант с модулем m=7 как наиболее рациональный.

В импульсных РДТТ для уменьшения времени выхода на режим применяются форкамерные воспламенительные устройства. Такой воспламенитель представляет из себя перфорированную трубку с воспламенительным составом, размещенную в центре КС. Минимальный диаметр такого устройства составляет 7-8 мм. Следовательно для размещения воспламенителя необходимо изъять центральный пороховой элемент (-ы). В варианте с модулем 5 можно удалить один элемент, в варианте с модулем 7 – 4 элемента. Рассмотрим оба варианта.

Округлим геометрические параметры (в скобках приведены значения для варианта  $m=5$ ,  $K$  – индекс выбранного варианта):

$$D_{H_I} = \frac{\text{round}(D_{H_K} \cdot 10000)}{10} = 6.8 (9.5) \text{ мм}$$

$$D_{B_I} = \frac{\text{round}(D_{B_K} \cdot 10000)}{10} = 3 (5.7) \text{ мм}$$

$$e_0 = \frac{D_{H_I} - D_{B_I}}{2} = 1.9 \text{ мм}$$

Количество шашек:

$$n = n_K - 4 (1) = 33 (18)$$

Длина заряда, обеспечивающая заданную площадь горения с убранными шашками:

$$L_{3_I} = \text{round} \left[ \frac{S_{\Gamma} \cdot 1000000}{\pi \cdot n (D_{H_I} + D_{B_I})} \right] = 154 (182) \text{ мм}$$

Коэффициент заполнения поперечного сечения:

$$\varepsilon_{S_j} := \frac{D_{H_I}^2 - D_{B_I}^2}{(D_{KM} \cdot 1000)^2} n = 0.499 (0.422)$$