



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 параметров ДУ минимальной массы

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.

Оглавление

Исходные данные	3
1. Термодинамический расчет	5
2. Определение диапазонов варьирования входных проектных параметров .	6
3. Обоснование проектных параметров РДТТ	10
3.1. Определение номинального давления в камере сгорания	10
3.2. Выбор формы топливного заряда и определение его геометрических характеристик	10
3.3. Определение массовых и габаритных характеристик РДТТ	12

Исходные данные

Таблица 1. Исходные данные

Основные исходные данные				
Наружный диаметр РДТТ D_n , мм				200
Полный импульс тяги РДТТ I_P , кН·с				125
Продолжительность работы РДТТ в номинальном режиме $t_{ном}$, с				5
Характеристики ТРТ				
Краткое обозначение	Содержание, %	Условная химическая формула	Δh_{f298}^0 , кДж / кг	ρ , кг/м ³
ПБГГ	13,7	$C_{7.075}H_{10.65}O_{0.223}N_{0.063}$	-310	920
ПХА	71	NH_4ClO_4	-2510	1950
Алюминий	15	Al	0	2700
Оксид железа	0,3	Fe_2O_3	-5150	5250
Параметры закона горения ТРТ				
u_1 , мм/с·МПа			6,4	
ν			0,358	
u , мм/с ($p = 5$ МПа)			11,4	
D_t , 1/К			0,0012	

Таблица 1. Продолжение

Характеристики материала корпуса РДТТ (СП-28Ш)	
Плотность ρ_k , кг/м ³	7830
Предел прочности $\sigma_{вр}$, МПа	1700
Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	1400
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	-1840,02	T_p , К	3342,4
Теплофизические характеристики продуктов сгорания					
c_p , Дж / (кг·К)	1,9098	R_g , Дж / (кг·К)	411,52	z	0,26754
c_{pg} , Дж / (кг·К)	3,6138	λ_g , Дж / (кг·К)	0,38647	μ_g , Па·с	$0,9404 \cdot 10^{-4}$
Параметры потока в критическом сечении сопла					
β , м / с	1576,1	$I_{удп}$, м / с	1944,5	n	1,1408
Параметры потока в выходном сечении сопла (равновесное расширение)					
v_a , м / с	2438,2	$I_{удп}$, м / с	2704,9	n	1,1346
Параметры потока в выходном сечении сопла («замороженное» расширение)					
v_a , м / с	2410,1	$I_{удп}$, м / с	2661,6	n	1,1597

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	2,32	6,41	0,81	4	1	2337
2	2,65	22,52	0,52	20	1	2694
3	2,05	3,1	0,08	20	13,41	2337

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

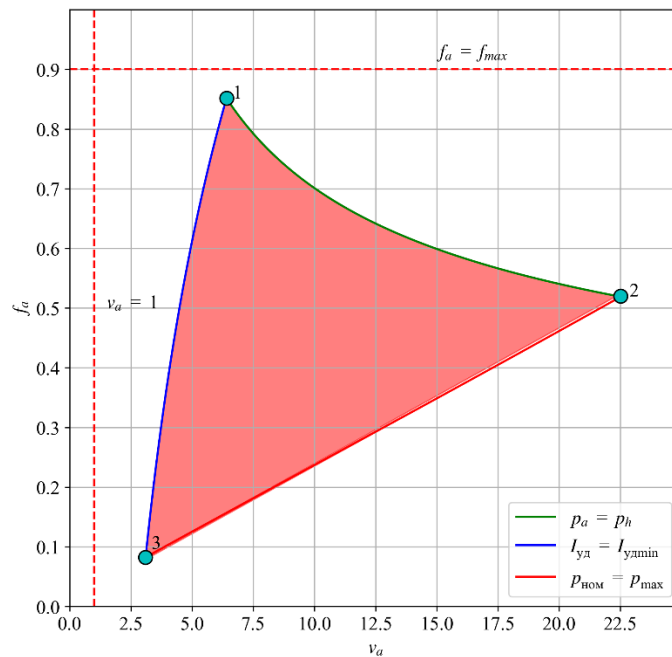


Рис. 1. Границы ОДБР

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.

Для ОДБР задаётся множество точек. Для каждой точки ОДБР 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).

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)

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

- 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)

$$\varepsilon_{\omega}(\varepsilon_f, f_{\text{ш}}) = \varepsilon_f(\bar{d}) - \bar{a} f_{\text{ш}}(\bar{d}), \quad (9)$$

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)

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

где:

- плотность ТРТ определяется по формуле

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

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)

$$\kappa(l_{\text{зар}}, e_d) = \frac{4l_{\text{зар}}(\omega, \varepsilon_{\omega})}{D_{\text{КС}}(1 - e_d(u))}. \quad (12)$$

3.3. Определение массовых и габаритных характеристик РДТТ

По условию ДЗ топливный заряд скреплён со стенками камеры, сопловой блок имеет одно центральное сопло.

ДУ разбивается на следующие элементы:

- цилиндрическая обечайка с защитно-крепящим слоем (ЗКС);
- эллиптическое переднее днище с ТЗП;
- сопловое днище (эллиптическое с центральным отверстием) с ТЗП;
- коническая дозвуковая часть сопла с ТЗП;
- цилиндрический сопловой стакан и эрозионностойкий вкладыш критического сечения;
- коническая сверхзвуковая часть сопла с ТЗП.

Исходные данные для определения массы конструкции включают в себя геометрические размеры, необходимые для вычисления объёмов элементов, представленных выше, а также значения плотностей конструкционных и теплозащитных материалов.

Толщина цилиндрической оболочки камеры (13)

$$\delta_{об} = \frac{D_{н}}{2} \frac{p_p}{\sigma_{вр}}, \quad (13)$$

где p_p – расчётное давление в КС, определяемое на основе давления при максимальной температуре эксплуатации ($T_0 = 323$ К) с учётом поправок

$$p_p = p_{+50} \frac{\sigma_{вр}}{\sigma_{0,2}} k_1 k_2 \eta,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий всплеск давления при совместном горении воспламенителя и основного заряда ($k_1 = 1,1$); k_2 – коэффициент, учитывающий повышение давления, обусловленное разбросом характеристик топлива ($k_2 = 1,2$); η – коэффициент запаса прочности ($\eta = 1,25$).

Давление в КС при $T_0 = 323$ К.

$$p_{+50} = p_{ном} \left(\varphi_t(T_0) \varphi_{\kappa}(\kappa) \right)^{\frac{1}{1-\nu}},$$

где $\varphi_t(T_0)$, $\varphi_{\kappa}(\kappa)$ – поправки, учитывающие зависимость скорости горения топлива от начальной температуры заряда T_0 и параметра Победоносцева (при превышении порогового значения ($\kappa_{пор} = 100$))

$$\varphi_i(T_0) = e^{D_i(T_0 - T_{ref})},$$

где $T_{ref} = 293 \text{ K}$;

$$\varphi_\kappa(\kappa) = \begin{cases} 1 + 0,003(\kappa - \kappa_{пор}), & \text{при } \kappa \geq \kappa_{пор} \\ 1, & \text{при } \kappa < \kappa_{пор} \end{cases},$$

где $\kappa_{пор} = 100$.

Толщина переднего днища КС

$$\delta_{дн1} = \frac{D_n}{2} \frac{p_p}{\sigma_{вр}} \left(\frac{D_n^2}{24b^2} + \frac{1}{3} \right),$$

где меньшая полуось эллиптической образующей (b)

$$b = \frac{D_n}{4}.$$

Толщины остальных элементов ДУ:

- сопловое днище КС $\delta_{дн2} = \delta_{дн1}$;
- дозвуковая часть сопла $\delta_{с1} = 2\delta_{об}$;
- сверхзвуковая часть сопла $\delta_{с2} = \delta_{об}$;
- сопловой стакан $\delta_{ст} = 3\delta_{об}$;
- ЗКС в цилиндрической части КС $\delta_{зкс} = 1 \text{ мм}$;
- ТЗП переднего и соплового днищ КС $\delta_{п1} = \delta_{п2} = 6 \text{ мм}$;
- ТЗП дозвуковой части сопла $\delta_{пс1} = 6 \text{ мм}$;
- ТЗП сверхзвуковой части сопла $\delta_{пс2} = 3 \text{ мм}$;
- вкладыш критического сечения $\delta_{вкс} = 15 \text{ мм}$.

Диаметр входного сечения сопла, совпадающий с диаметром центрального отверстия соплового днища, равен

$$D_{вх} = \frac{D_n}{2}.$$

Диаметры выходного и критического сечений сопла:

$$D_a = \sqrt{\frac{4}{\pi} f_a F_m};$$

$$D_{\text{кр}} = \frac{D_a}{\sqrt{v_a}}.$$

Длина цилиндрической обечайки КС

$$l_{\text{об}} = l_{\text{зар}}.$$

Длины дозвукового и сверхзвукового участков сопла:

$$l_{\text{с1}} = \frac{D_{\text{вх}} - D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \theta_{\text{с1}}};$$

$$l_{\text{с2}} = \frac{D_a - D_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg} \theta_{\text{с2}}},$$

где $\theta_{\text{с1}} = 30^\circ$, $\theta_{\text{с2}} = 15^\circ$.

Длина соплового стакана

$$l_{\text{ст}} = \frac{D_{\text{кр}}}{2}.$$

Длина двигателя (14)

$$l_{\text{дв}} = b + l_{\text{дв}} + b \sqrt{1 - \frac{D_{\text{вх}}^2}{D_{\text{н}}^2}} + l_{\text{с1}} + l_{\text{ст}} + l_{\text{с2}} \dots \quad (14)$$

Элементы ДУ разбиваются на простые формы, объёмы которых вычисляются по формулам:

1. Цилиндрическая оболочка $V_{\text{цил}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D - 2\delta)^2) l$;
2. Коническая оболочка $V_{\text{кон}} = \frac{\pi l \delta}{\cos \theta} \left(\frac{D_{\text{вн1}} + D_{\text{вн2}}}{2} + \frac{\delta}{\cos \theta} \right)$;
3. Эллиптическое днище $V_{\text{элл1}} = \frac{2\pi \delta}{3} \left(\frac{D^2}{4} + Db - (D + b)\delta + \delta^2 \right)$;
4. Эллиптическое днище с центральным отверстием

$$V_{\text{элл2}} = \frac{\pi D^2 b}{6} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{\pi}{6} (D - 2\delta)^2 (b - \delta) \left(1 - \frac{d^2}{(D - 2\delta)^2} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Плотности материала корпуса, ТЗП, ЗКС и вкладыша критического сечения представлены в табл. 1.

Масса «сухой» ДУ (15)

$$m_{\text{дв}0} = \sum_{i=1}^N \rho_i V_i. \quad (15)$$

Масса снаряженной ДУ (16)

$$m_{\text{дв}} = m_{\text{дв}0} + \omega. \quad (16)$$

Коэффициент конструктивно-массового совершенства (17)

$$\alpha_{\text{дв}} = \frac{m_{\text{дв}0}}{\omega}. \quad (17)$$

Выбор одного лучшего решения для дальнейшей проработки выполняется по критерию качества (18)

$$C_{\text{дв}} = \sqrt{\frac{m_{\text{дв}}}{m_{\text{min}}} \frac{l_{\text{дв}}}{l_{\text{min}}}}, \quad (18)$$

где m_{min} , l_{min} – наименьшие среди рассмотренных вариантов значения массы и длины ДУ (используются для нормирования критерия).

Лучшее решение соответствует минимуму коэффициента качества $C_{\text{дв}}$. В результате проделанной работы строятся графики зависимостей $C_{\text{дв}}(m_{\text{дв}}, l_{\text{дв}})$, $m_{\text{дв}}(m_{\text{дв}}, l_{\text{дв}})$, $l_{\text{дв}}(m_{\text{дв}}, l_{\text{дв}})$, результаты представлены на рис. 2 – 4 соответственно. Параметры, соответствующие минимуму критерия представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчёта

$C_{\text{дв}}$	$m_{\text{дв}}$, кг	$l_{\text{дв}}$, м
1,036	60	1,356

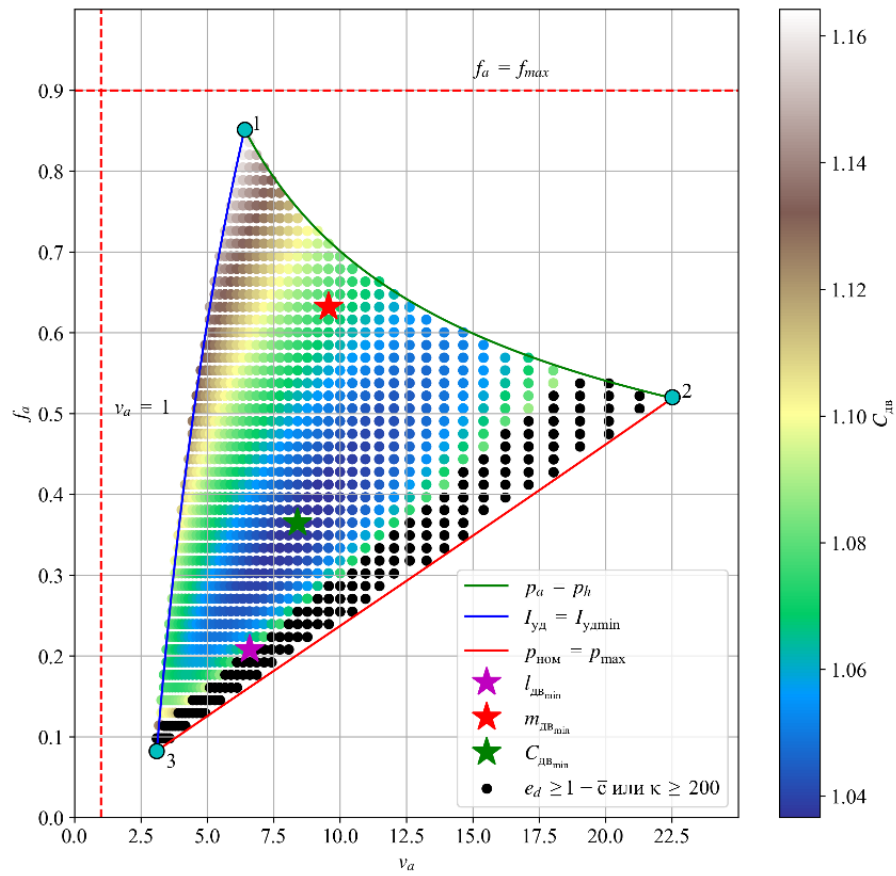


Рис. 2. График зависимости $C_{dv}(m_{dv}, l_{dv})$

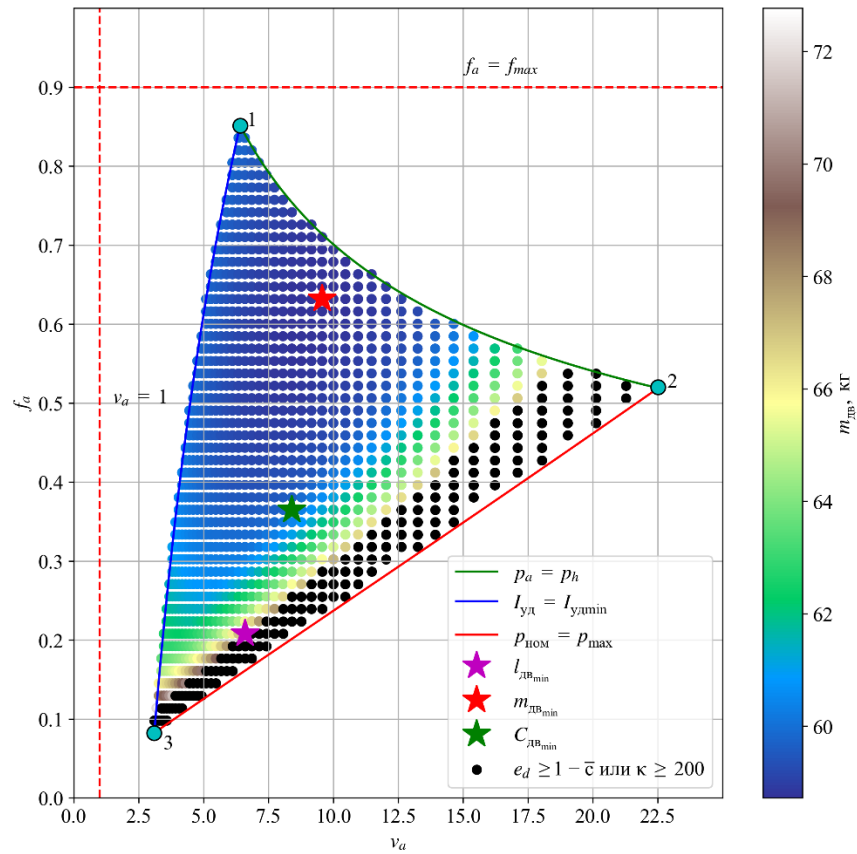


Рис. 3. График зависимости $m_{dv}(m_{dv}, l_{dv})$

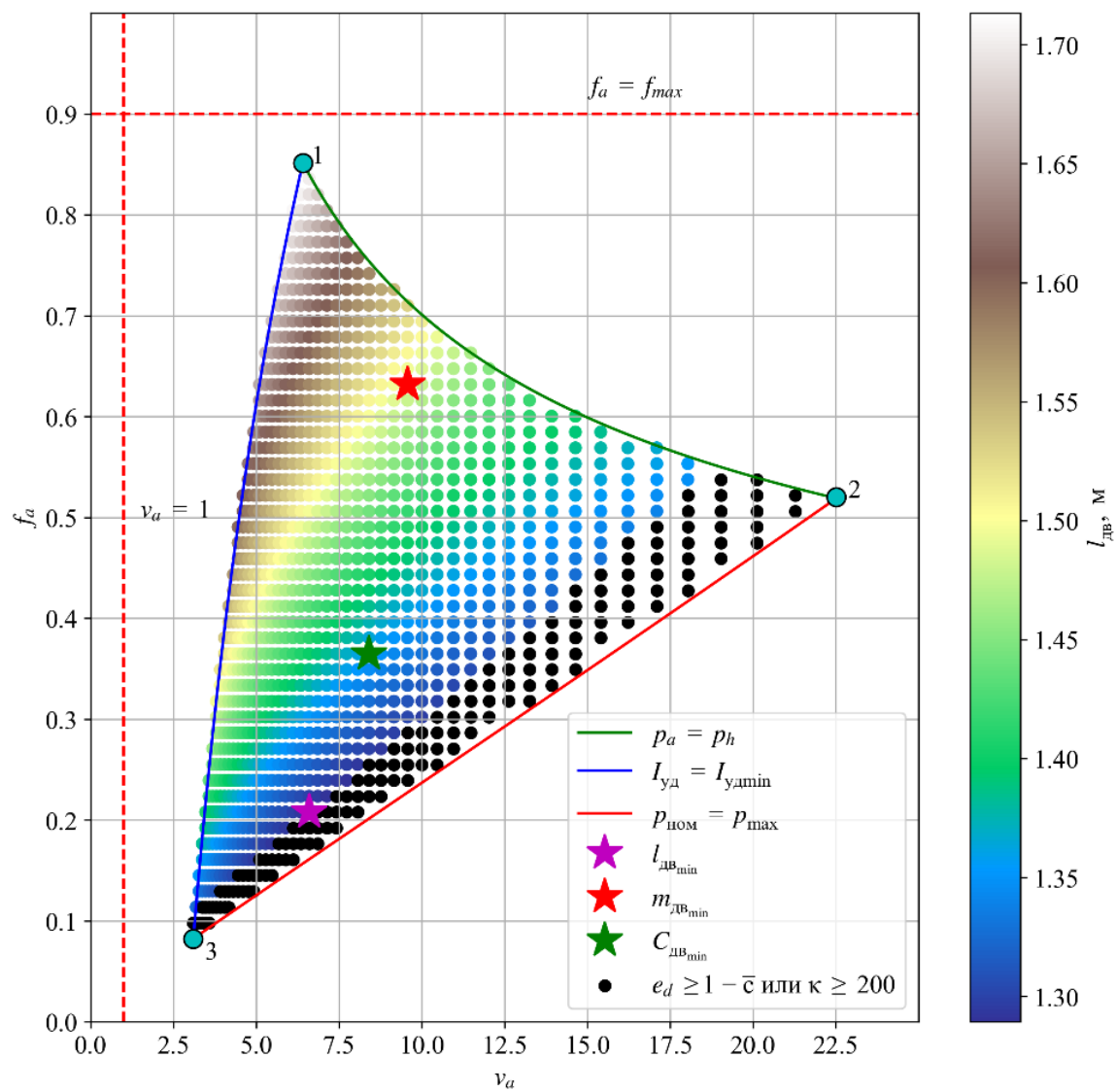


Рис. 4. График зависимости l_{dv} (m_{dv} , l_{dv})