



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:
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
РАКЕТНОГО ОРУЖИЯ

НА ТЕМУ:
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УПРАВЛЯЮЩЕГО ДВИГАТЕЛЯ

Студент группы _____ СМ6-92 _____ Н.К. Широкопетлев
(подпись, дата) (И.О. Фамилия)

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

Москва, 2022 г.

Оглавление

1. Теоретическая часть	3
1.1. Конструкция, технические характеристики и работа ДУ	3
1.2. Теоретические зависимости	5
2. Практическая часть	7
2.1. Исходные данные	7
2.2. Расчёт теоретических зависимостей	7
2.3. Выбор параметров заряда.....	8
2.4. Расчёт площади горения заряда.....	10
2.5. Расчет воспламенительного устройства	11
2.6. Решение обратной задачи внутренней баллистики	15
3. Экспериментальная часть	17
Вывод.....	19

1. Теоретическая часть

Цель работы:

- ознакомиться с конструкцией, техническими характеристиками и принципами работы управляющего двигателя;
- ознакомиться с расчетными и экспериментальными методами отработки двигательных установок на твердом топливе;
- получить практические навыки при проведении горячих испытаний и обработке результатов экспериментов.

Задачи работы:

- рассчитать необходимую массу топлива по заданным исходным данным;
- рассчитать диаметра дроссельного отверстия;
- рассчитать геометрические параметры топливного заряда;
- осуществить запуск ДУ и обработать полученные результаты эксперимента;
- провести сравнение и анализ теоретических и экспериментальных результатов.

Продолжительность работы - 10 ч.

Оборудование для проведения работы:

- двигатель управляющий (ДУ) (в снаряженном состоянии) (рисунок 1);
- датчик давления (типа ЛХ-412);
- регистрирующая аппаратура (ЭВМ).

1.1. Конструкция, технические характеристики и работа ДУ

Конструкция двигательной установки (ДУ) представлена на рисунке 1: ДУ состоит из корпуса 2, крышки 5, заряда 8, воспламенителя 4, электровоспламенителя 3, переходника 1, втулки 6, диафрагмы 7.

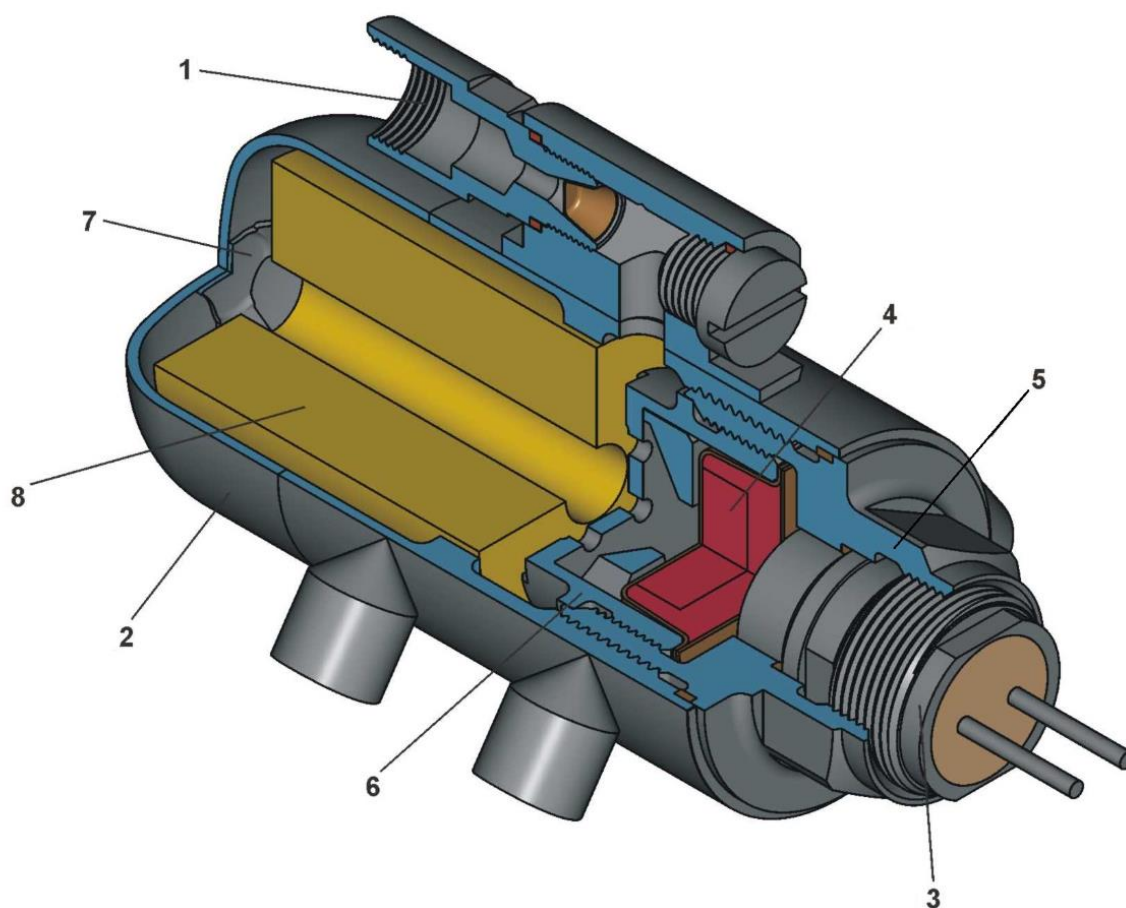


Рисунок 1. Конструкция двигательной установки

Корпус 2 представляет собой штамповарную конструкцию из стали. На корпусе имеются резьбовые отверстия для установки крышки, переходника и винта для проверки герметичности ДУ. Материал крышки 5 – титановый сплав ВТ14, материал переходника 1 – сталь 20Х13.

Заряд 8 представляет собой цилиндрическую канальную шашку из баллиститного пороха НДП-2МК. Габариты заряда: наружный диаметр $21_{-0,5}$ мм, диаметр канала $5,5 \pm 0,5$ мм, длина $29_{-0,5}$ мм. Заряд фиксируется в корпусе ДУ диафрагмой 7 пружинного типа из стали 60С2А.

Воспламенитель 4 устанавливается во втулку 6 из титанового сплава ВТ14, имеющую пять расходных отверстий диаметром $1,6\text{Н}12^{(+0,1)}$ мм. Воспламенитель представляет собой навеску дымного ружейного пороха массой 0,3 г и усилитель в виде пиротехнической петарды из баллиститного пороха РСК-6К массой 1,4 г, размещенные в полиэтиленовом корпусе.

Электровоспламенитель 3 предназначен для задействования ДУ от электрического импульса, подаваемого от системы управления изделия. Электровоспламенитель содержит элементы защиты от зарядов статического электричества и электромагнитных полей в виде

проходных конденсаторов, установленных по одному на каждый из выводных проводников и имеющих электрический контакт с корпусом.

Параметры внутренней баллистики ДУ и расход газа определяются диаметром дроссельного отверстия в переходнике $2Н8^{(+0,014)}$ мм.

Герметичность ДУ обеспечивается прокладками и заглушкой из нитропленки.

Технические характеристики ДУ:

- максимальное давление в камере ДУ не более 31,4 (320) МПа (кгс/см²);
- давление в камере ДУ при крайних температурах эксплуатации:
 - а) при $t = + 50$ °С в течение 0,52 с не ниже 4,9 (50) МПа (кгс/см²);
 - б) при $t = - 50$ °С в течение 0,7 с не ниже 3,92 (40) МПа (кгс/см²);
- время задержки воспламенения (до начала роста давления) не более 0,05 с;

При подаче инициирующего импульса на электровоспламенитель 3 происходит нагрев его мостика накаливания, воспламеняющего навеску собственного пиротехнического состава электровоспламенителя. После срабатывания электровоспламенителя загорается пиротехническая петарда воспламенителя 4, которая в свою очередь поджигает его пороховую навеску.

При горении дымного ружейного пороха образуются крупные раскаленные частицы, которые попадают на заряд 8 и вызывают его возгорание. Заряд горит по всей открытой поверхности. При этом скорость его горения составляет порядка 7 мм/с. Это обусловлено требуемым временем работы ДУ и необходимостью быстрого выхода на максимальное давление.

Образующиеся при горении газы через ввернутый в корпус 2 переходник 1 поступают в газораспределительную систему. Расход газа составляет около 20 г/с.

1.2. Теоретические зависимости

К двигателю управляющему предъявляются следующие основные требования:

- номинальное время работы $t = 0,7$ с;
- газоприход от ДУ должен обеспечивать эффективный импульс реактивных сил сопел газового распределителя в диапазоне $[6,86 \dots 14,7]$ Н · с.

Таким образом, реактивная сила составит:

$$R = \frac{J_{\text{эф}}}{t} = 9,8 \dots 21 \text{ Н} \quad (1)$$

Одной из основных характеристик топлива является величина удельного импульса J_1 . Тогда необходимый расход топлива:

$$G_T = \frac{R}{J_1} \quad (2)$$

Газоприход в камеру сгорания G_T определяется зависимостью

$$G_T = S \cdot u \cdot \rho_T = S \cdot u_1 \cdot p^\nu \cdot \rho_T, \quad (3)$$

где:

- S – площадь поверхности горения;
- u_1 – единичная скорость горения топлива;
- p – давление в камере сгорания;
- ν – показатель степени закона горения топлива;
- ρ_T – плотность топлива;

Исходя из зависимостей (2) и (3) определяется необходимая площадь горения

$$S = \frac{G_T}{u_1 \cdot p^\nu \cdot \rho_T} = \frac{R}{J_1 \cdot u_1 \cdot p^\nu \cdot \rho_T} \quad (4)$$

При выборе формы заряда необходимо учитывать толщину горящего свода

$$e = u \cdot t \quad (5)$$

Используя равенство газоприхода в камеру сгорания и расхода газа через дроссельные отверстия (критику), то есть закон сохранения массы, запишем равенство:

$$S \cdot u \cdot \rho_T = \frac{A_1 \cdot p \cdot F_{др}}{\sqrt{R_T \cdot T}}, \quad (6)$$

где

- $A_1 = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ – расходный комплекс;
- $F_{др}$ – площадь дроссельного отверстия;
- k – показатель адиабаты;
- R – газовая постоянная;
- T – температура горения топлива.

Исходя из зависимости (6) определяется площадь дроссельного отверстия

$$F_{др} = \frac{G_T \sqrt{R_T T}}{A_1 \cdot p} = \frac{S \cdot u \cdot \rho_T \cdot \sqrt{R_T T}}{A_1 \cdot p} \quad (7)$$

2. Практическая часть

2.1. Исходные данные

Общие исходные данные:

- время работы ДУ $t = 0,7$ с;
- полное давление в камере ДУ $p = 4,5$ МПа;
- эффективный импульс реактивных сил и характеристики топливных составов индивидуальны. Представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Вариант	Эффективный импульс, Н·с	Топливо
12	15	<div>Топливо №3</div> <div>$R_T = 367,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$</div> <div>$T = 2047 \text{ К}$</div> <div>$\rho_T = 1590 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$</div> <div>$k = 1,24$</div> <div>$J_1 = 1979,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$</div> <div>$u_1 = 6,45 \frac{\text{мм}}{\text{с} \cdot \text{МПа}}$</div> <div>$\nu = -0,095$</div>

2.2. Расчёт теоретических зависимостей

Исходя из формулы (1), вычислим реактивную силу:

$$R = \frac{J_{\text{эф}}}{t} = \frac{15}{0,7} = 21,429 \text{ Н}$$

Необходимый расход топлива находится из зависимости (2):

$$G_T = \frac{R}{J_1} = \frac{21,429}{1979,6} = 1,08 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Потребная масса топлива определяется как расход топлива за всё время работы:

$$\omega = G_T \cdot t = 0,0108 \cdot 0,7 = 7,57 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

Скорость горения топлива определяется законом степенным законом при малых давлениях:

$$u = u_1 \cdot p^{\nu} = 6,45 \cdot 4,5^{-0,095} = 5,59 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}} = 5,59 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

Площадь поверхности горения находится исходя из зависимости (4):

$$S = \frac{G_T}{u_1 \cdot p^v \cdot \rho_T} = \frac{1,08 \cdot 10^{-2}}{5,59 \cdot 10^{-3} \cdot 1590} = 1,218 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Расходный комплекс $A_{1(k)}$ упрощает работу при вычислениях и может быть найден:

$$A_1 = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} = \sqrt{1,4 \cdot \left(\frac{2}{1,4+1}\right)^{\frac{1,4+1}{1,4-1}}} = 0,656$$

Площадь дроссельного отверстия находим из зависимости (7):

$$F_{др} = \frac{S \cdot u \cdot \rho_T \cdot \sqrt{R_T T}}{A_1 \cdot p};$$

$$F_{др} = \frac{1,218 \cdot 10^{-3} \cdot 5,59 \cdot 1590 \cdot \sqrt{367,6 \cdot 2047}}{0,656 \cdot 4,5} = 3,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Исходя из определения площади поперечного сечения, диаметр дроссельного отверстия (критики) равен

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4F_{кр}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,17 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 2,01 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 2 \text{ мм}$$

Тогда потребная площадь горящего свода равна

$$e_1 = u \cdot t_p = 5,59 \cdot 10^{-3} \cdot 0,7 = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,91 \text{ мм.}$$

2.3. Выбор параметров заряда

Исходя из ограничений на габариты ДУ, наружный диаметр шашки не должен превышать 21 мм, а длина не должна превышать 29 мм, данные параметры подбираются такими, чтобы индикаторная кривая давления, полученная теоретически совпала с экспериментальной кривой максимально.

Для этого произведём оптимизацию, диапазоны варьирования:

- По диаметру шашки от 15 до 25 мм;
- По длине шашки от 10 до 21 мм.

Шаг по диаметру и длине в первом приближении возьмём 1 мм. Критерий оптимизации $\Delta p = \sum |p_{экс i} - p_{теор i}|$. Полученное распределение представлено на рисунке 2.

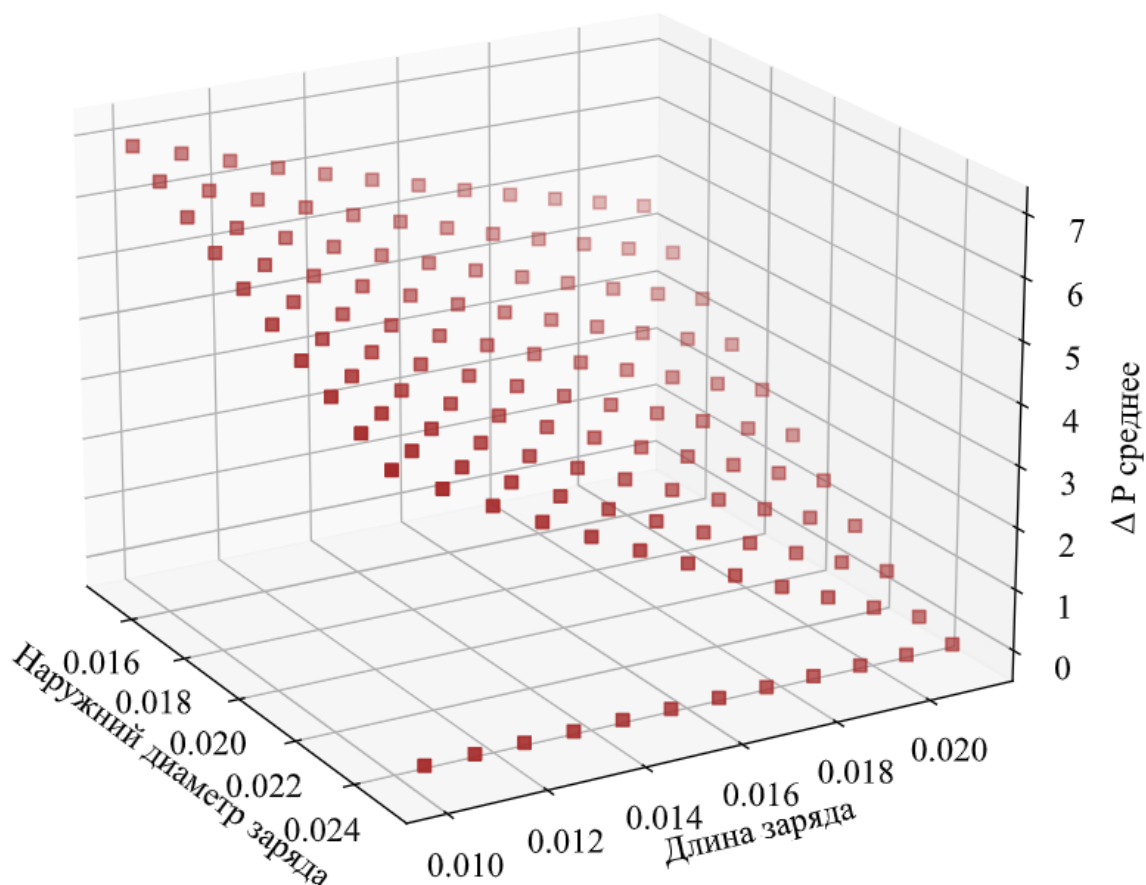


Рисунок 2. Первое приближение поиска оптимальной геометрии заряда

Как видно из рисунка, минимальное значение Δp достигается при максимальной длине заряда и значению диаметра около 24 мм. Нулевые значения обусловлены отсутствием решения при данном сочетании параметров.

Выполним приближение, назовем диапазоны:

- По диаметру шашки от 22 до 26 мм;
- По длине шашки от 18 до 22 мм.

Шаг выбирается 0.1 мм, полученное приближение представлено на рисунке 3.

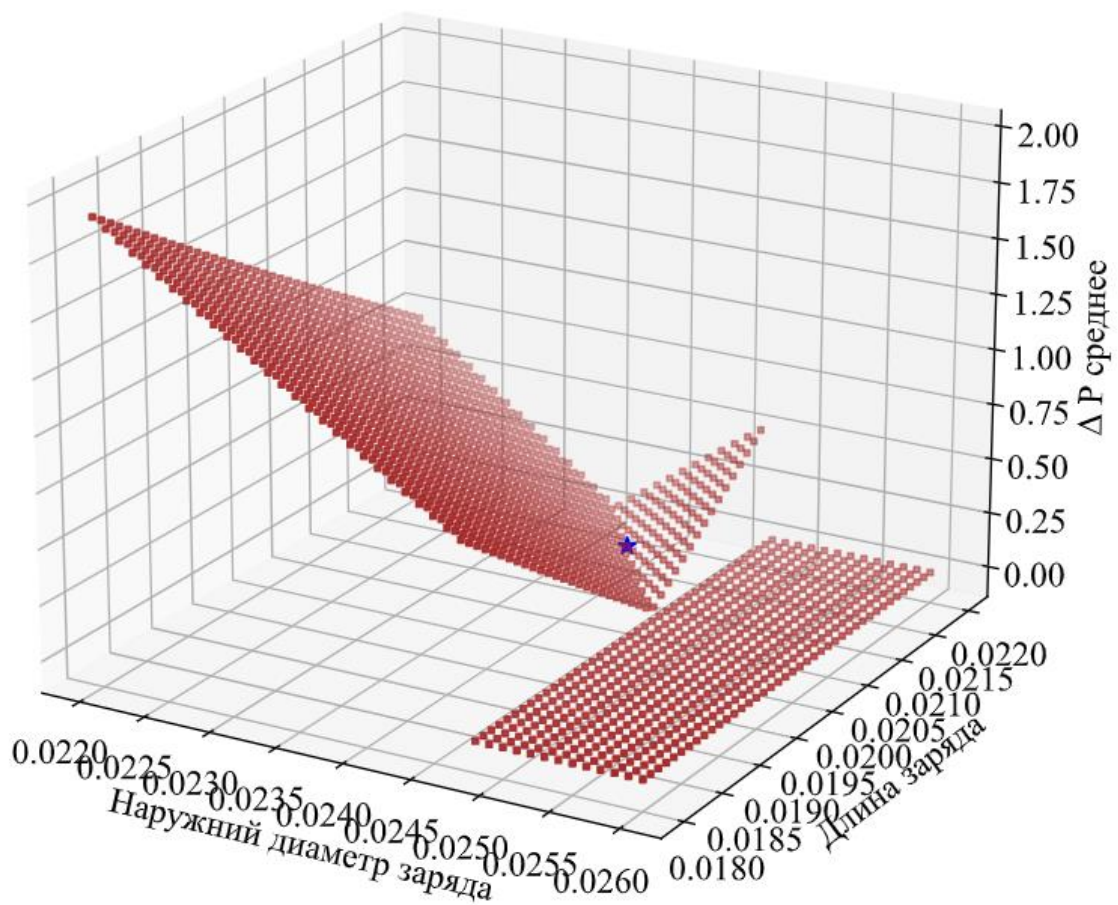


Рисунок 3. Второе приближение поиска оптимальной геометрии заряда

Экстремум обусловлен превышением теоретического значения экспериментального.

Исходя из последовательных приближений назначим:

- ✓ Наружный диаметр шашки 24 мм;
- ✓ Длина шашки от 21 мм.

2.4. Расчёт площади горения заряда

Так как заряд имеет форму канальной шашки всестороннего горения, то закон изменения площади поверхности горения для будет выглядеть следующим образом.

$$S(z) = \pi \cdot (d_{\text{вн}} + 2z)(l - 2z) + \pi \cdot (d_{\text{н}} - 2z)(l - 2z) + \frac{2\pi}{4} [(d_{\text{н}} - 2z)^2 - (d_{\text{вн}} + 2z)^2]$$

Внутренний диаметр горящего свода:

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 4e_1 = 24 - 4 \cdot 3,91 = 8.34 \text{ мм}$$

Изменение площади поверхности горения по мере выгорания заряда выглядит как показано на рисунке 4. Как видно по рисунку, характер горения заряда дегрессивный (с

уменьшением площади поверхности горения), это обусловлено отсутствием бронирования торцов.

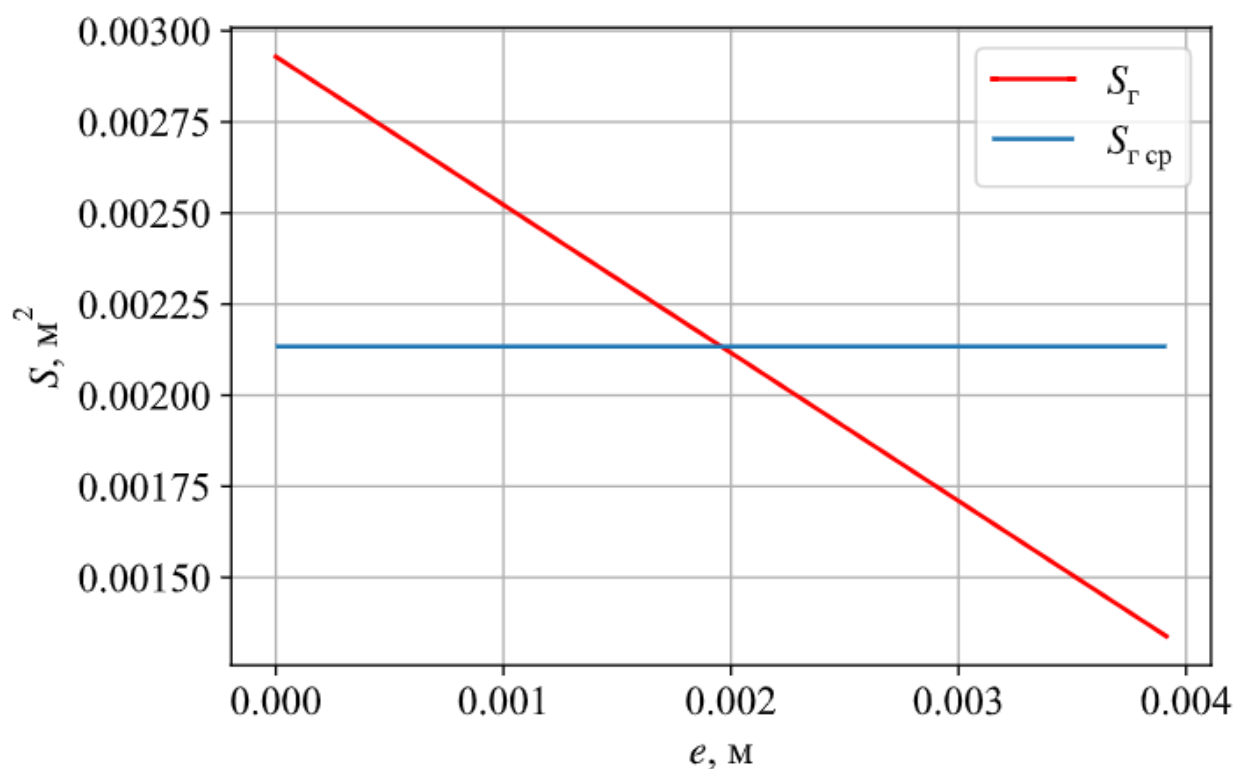


Рисунок 4. Изменение площади поверхности горящего заряда

2.5. Расчет воспламенительного устройства

Для воспламенения топлива необходимо спроектировать ВУ. Навеска для ВУ будет состоять из крупнозернового дымного пороха (КЗДП). Характеристики КЗДП представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики КЗДП

Газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$R_{\text{в}} = 314$
Теплота сгорания, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$Q_{\text{жв}} = 3050 \cdot 10^3$
Скорость горения, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$u_{\text{в}} = 0,05$
Показатель адиабаты	$k = 1,25$
Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{\text{в}} = 1700$

Показатель дегрессивности	$m = 3$
Толщина горящего свода зерна воспламенителя, м	$e_b = 6 \cdot 10^{-3}$

Закон изменения площади поверхности горения выглядит следующим образом

$$S_g = S_{0g} e^{-m \frac{t}{t_g}}.$$

где S_{0g} - начальная площадь горения воспламенителя; m – показатель дегрессивности горения воспламенителя; $t_g = \frac{e_g}{u_g}$ – время горения воспламенителя; e_g – толщина горящего свода.

Для определения момента вспышки воспользуемся зависимостью, характеризующей динамическое равновесие (модель процесса теплопередачи). При этом количество теплоты, поступающее от продуктов сгорания воспламенителя, аккумулируется в реакционном слое, что приводит к полному его выгоранию

$$\alpha(T_g - T_s) = c_T \delta u(T_s - T_n),$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газов к топливу, T_g – температура продуктов сгорания воспламенителя в момент вспышки ТТ; T_s – температура вспышки ТТ, T_n – начальная температура ТТ, c_T – удельная теплоемкость ТТ.

Температуру T_g можно считать постоянной и определить по формуле

$$T_g = \frac{k-1}{k} \frac{Q_B}{R}.$$

Давление вспышки определяется из уравнения Бори

$$p_{всп}(T_n) = p_{всп}^{+18} \left(\frac{F(T_n)}{F(291)} \right)^{\frac{1}{1-\nu}},$$

где $p_{всп}^{+18} = 5$ МПа, т.к. при данном давлении происходит воспламенение основного заряда.

Уравнение, описывающее изменение давления в камере за счет автономного горения воспламенителя, можно получить из общей системы уравнений внутренней баллистики РДТТ.

Полагая, что к моменту вспышки топлива объем камеры изменился несущественно, получаем

$$\frac{dp_{\epsilon}}{dt} = b_1 e^{-\frac{m}{t_{\epsilon}}} - b_2 p,$$

где $b_1 = \frac{k-1}{W_0} Q_{\epsilon} S_{0\epsilon} u_{\epsilon} \delta_{\epsilon}$; $b_2 = \frac{k}{W_0} \sqrt{R_{\epsilon} T_{\epsilon}} A_1 F_{kp} + \frac{k-1}{W_0} \frac{\sigma_T v_T F_{охл}}{R_{\epsilon}}$, $F_{охл} \simeq \pi D_H l$ – площадь

поверхности охлаждения КС, A – расходный комплекс.

Решение уравнения

$$p_{\epsilon} = \left(p_a + \frac{b_1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} \right) e^{-b_2 t} - \frac{b_1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} e^{-\frac{m}{t_{\epsilon}}}.$$

После преобразований имеем следующие уравнения для определения максимального давления и времени достижения этого давления:

$$p_{\epsilon \max} = \frac{b_1}{b_2} \left(\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} \right)^{\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} - m};$$

$$t_{\epsilon \max} = \frac{1}{\frac{m}{t_{\epsilon}} - b_2} \ln \frac{m}{b_2 t_{\epsilon}}.$$

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

$$p_{\epsilon \max} = 1,1 \dots 1,2 p_{\text{всп-50}}.$$

Подставляя в выражение для давления значение b_1 , получим соотношение для нахождения начальной площади поверхности горения воспламенителя

$$S_{0\epsilon} = \frac{W_0 p_{\epsilon \max} b_2 \left(\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} \right)^{-\frac{m}{b_2 t_{\epsilon}} - m}}{(k-1) Q_{\epsilon} u_{\epsilon} \delta_{\epsilon}}.$$

Массу навески воспламенителя определим, как

$$m_{\epsilon} = \delta_{\epsilon} e_{\epsilon} S_{0\epsilon} \frac{1 - e^{-m}}{m}.$$

Начальный свободный объем задается следующим образом $W_0 = W_{\text{КС}} - W_{\text{зар}}$,

где $W_{\text{КС}}$ – объем камеры сгорания, $W_{\text{КС}} = 1,1 \cdot \frac{\pi D_{\text{км}}^2}{4} l$, где 1,1 используется как поправка на

свободные объемы, и иными элементами; $W_{\text{зар}} = \frac{\omega}{\rho_T}$ – объем заряда.

При заданном условии заряджании масса навески воспламенителя получается равной $m_g = 0,65$ г. График автономного горения воспламенителя представлен на рисунке 5.

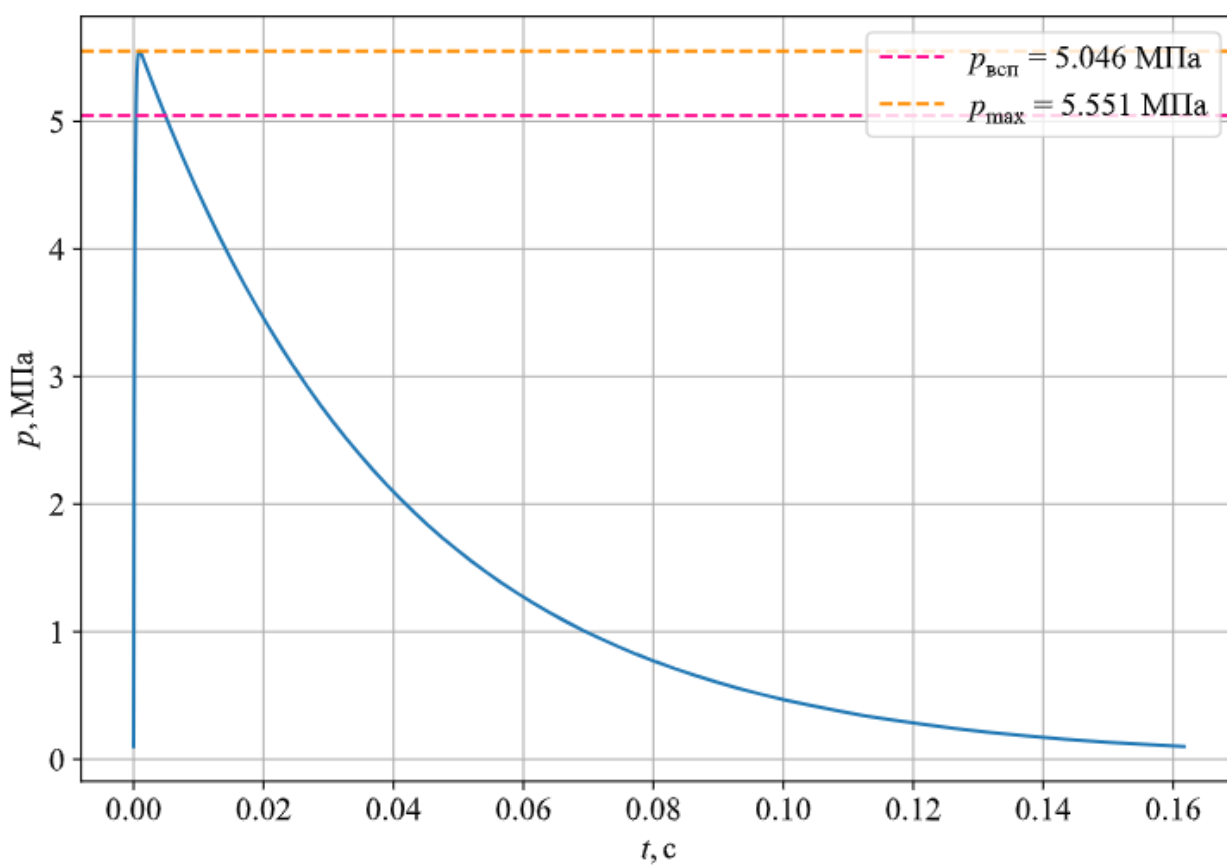


Рисунок 5. Индикаторная кривая автономного горения воспламенителя

2.6. Решение обратной задачи внутренней баллистики

При построении кривой давления используется следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dt} = \left[(k_{\epsilon} - 1) Q_{\epsilon} \frac{d\omega_{\epsilon}}{dt} + (k - 1) Q \frac{d\omega_{\Gamma}}{dt} - (k - 1) \frac{\sigma_{\Gamma} v_{\Gamma} F_{oxl} p}{R} - \right. \\ \left. - k \mu_c A_k(k) F_{kp} p \sqrt{RT} - kp \frac{dW}{dt} \right] \frac{1}{W}; \\ \frac{dW}{dt} = \frac{1}{\rho_{\epsilon}} \frac{d\omega_{\epsilon}}{dt} + \frac{1}{\rho_{\Gamma}} \frac{d\omega_{\Gamma}}{dt}; \\ \frac{d\omega_{\Gamma}}{dt} = S_{\Gamma}(e) \rho_{\Gamma} \frac{de}{dt}; \\ \frac{d\omega_{\epsilon}}{dt} = S_{\Gamma\epsilon 0} e^{-m \frac{t}{t_{\epsilon}}} u_{\epsilon} \rho_{\epsilon} \xi_{\epsilon}(t); \\ \frac{de}{dt} = u_1 p^{\nu} \xi_p(e, p) \xi_z(t). \end{array} \right.$$

Переключатели:

$$\xi_p(t) = \begin{cases} 1 & \text{если } p > p_{ecn} \text{ и } z > 0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$\xi_{\epsilon}(t) = \begin{cases} 1 & t \leq t_{\epsilon}, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

$$\xi_z(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq z \leq z_0, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases}$$

Начальные условия:

- давление равно давлению окружающей среды 101325 Па (0,1 МПа);
- начальный свободный объем равен $W_0 = 0,37 * 10^{-6} \text{ м}^3$;
- $\omega_{\epsilon} = 0$;
- $\omega_{\epsilon\Gamma} = 0$;
- $e = 0$;
- $t_0 = 0$.

Система дифференциальных уравнений интегрировалась с помощью интегратора систем обыкновенных дифференциальных уравнений (*scipy.integrate.ode*) библиотеки SciPy языка программирования Python 3.11

Результатом решения системы уравнений являются следующие индикаторные кривые давления в КС и наложенные на них экспериментальные кривые, представленные на рисунках 6 и 7.

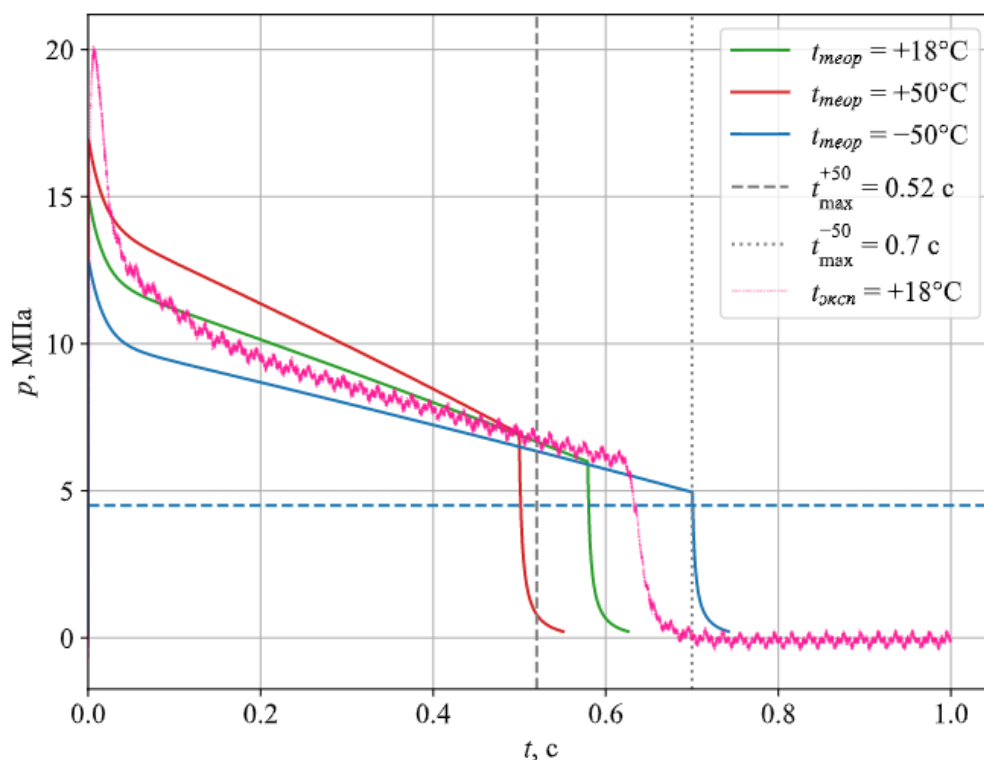


Рисунок 6. Индикаторные кривые давления в КС

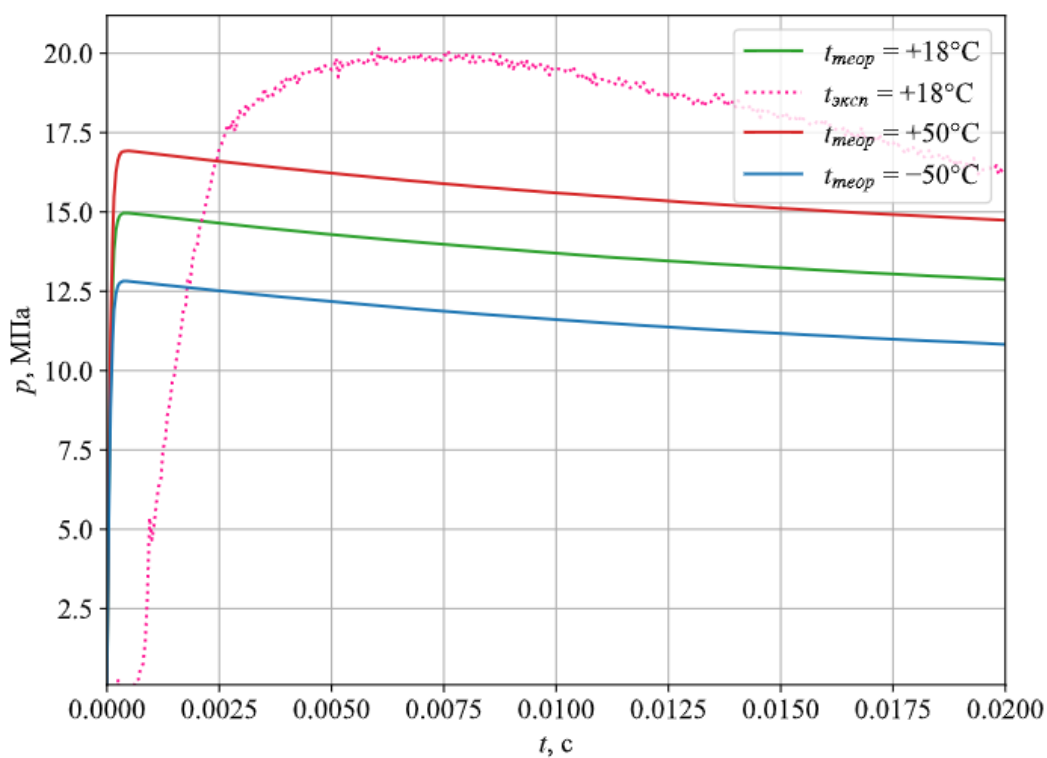


Рисунок 7. Индикаторные кривые давления в КС для участка автономного горения воспламенителя

3. Экспериментальная часть

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 8

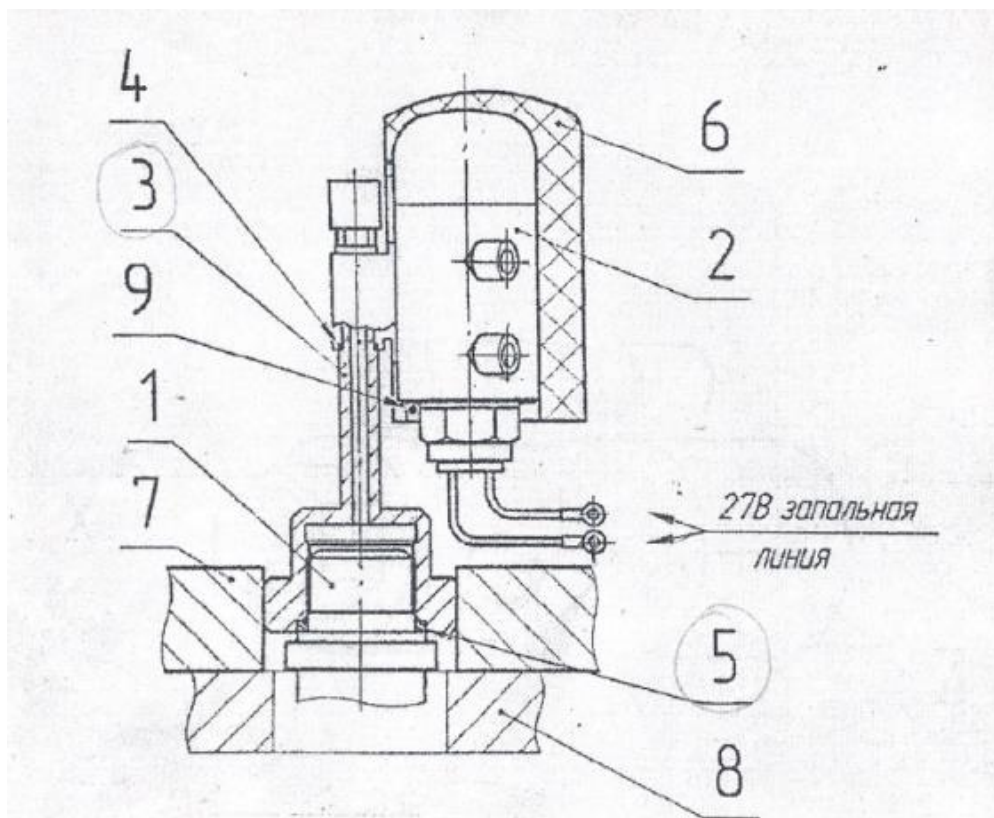


Рисунок 8. Схема эксперимента:

1 – датчик давления, 2 – двигатель управляющий, 3 – переходник,
4,5 – прокладки, 6 – стакан, 7 – зажимное приспособление,
8 – стенд, 9 – шплинт.

Этапы эксперимента:

- осуществление тарировки датчика давления;
- монтаж УД на стенде;
- присоединение датчика давления;
- соединение электрических цепей;
- запуск ДУ;
- снятие показания датчика давления.

В процессе проведения эксперимента с помощью датчиков фиксировалось изменение давления в КС ДУ. В конце эксперимента был получен график индикаторной кривой давления, представленный на рисунке 9. На рисунке 10 представлен период работы воспламенителя.

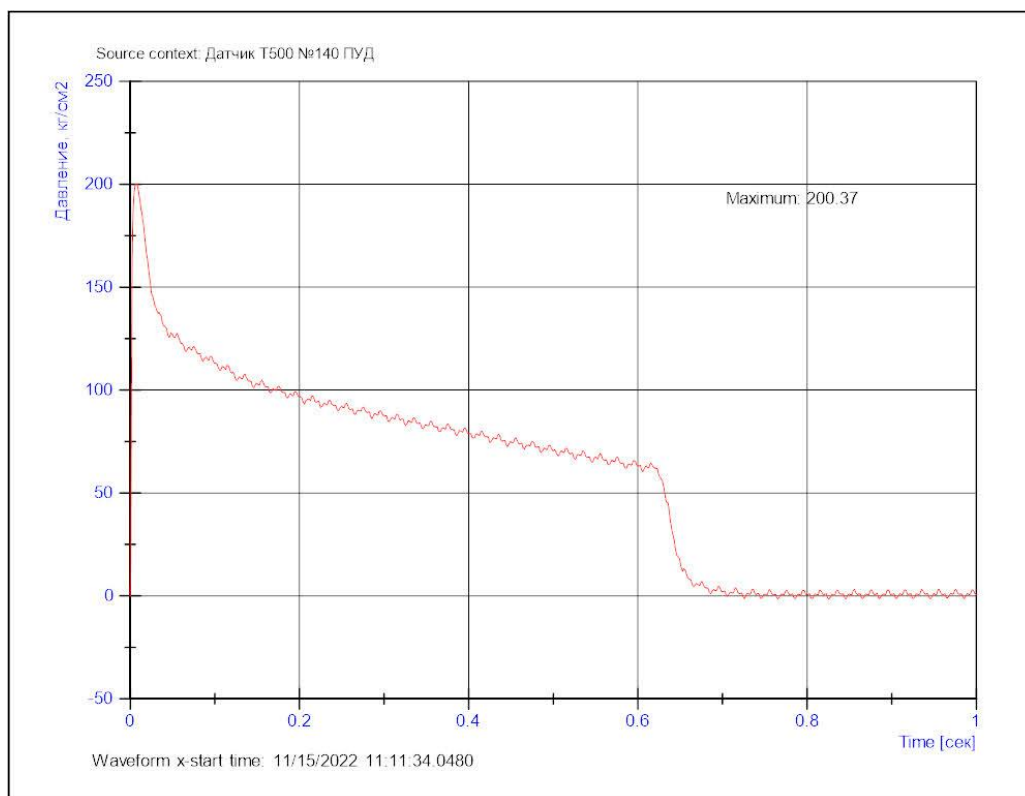


Рисунок 9. Экспериментальная кривая давления в КС

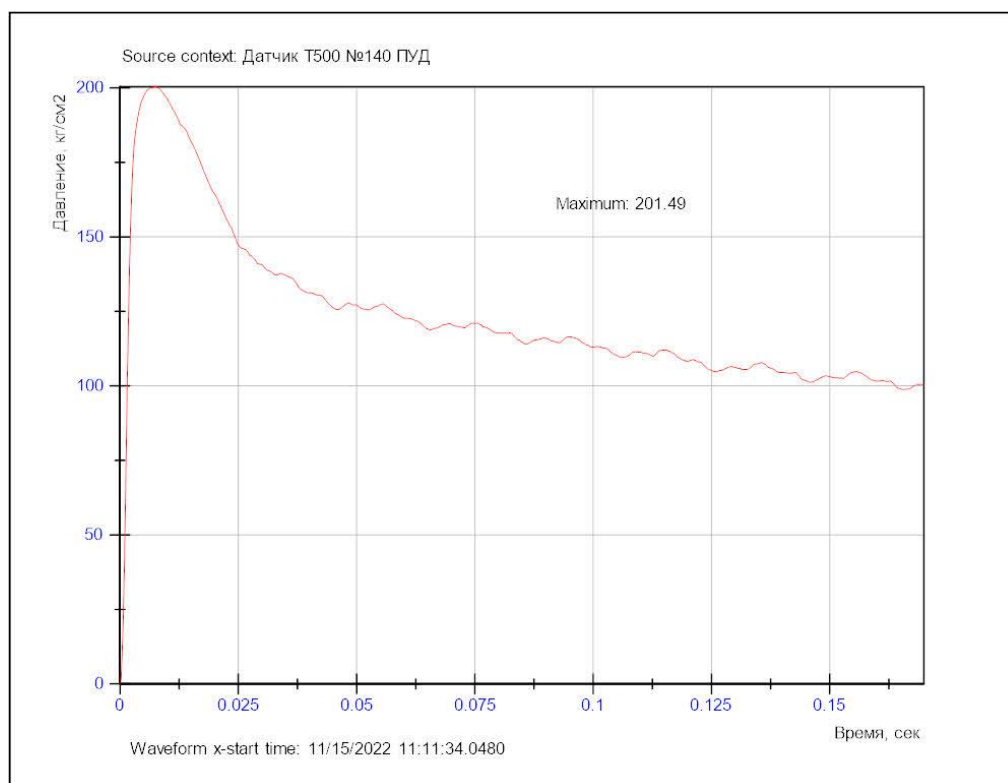


Рисунок 10. Период работы воспламенителя

Вывод

В результате проделанной работы были получены индикаторные кривые давления теоретическим и экспериментальным способами.

Теоретический расчёт проводился по исходным данным выданного варианта.

При сравнении кривых давления в КС ДУ, полученных теоретически и экспериментально, видно, что при теоретическом расчёте варианта максимальное давление ниже, чем при проведении эксперимента; горение имеет более дегрессивный характер; воспламенении топлива происходит примерно одновременно.