



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)

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

НА ТЕМУ:

«Баллистическое проектирование артиллерийских орудий»

Вариант 24

Студент СМ6-72

(Группа)

(Подпись, дата)

М.В. Ерофеев
(И.О.Фамилия)

Руководитель курсовой работы

В.А. Федулов

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

2025 г.

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)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой СМ6
(Индекс)

(И.О. Фамилия) В.М.Кашин

« _____ » _____ 20 _____ г.

ЗАДАНИЕ
на выполнение курсовой работы

по дисциплине Газовая динамика

Студент группы СМ6-72

(Фамилия, имя, отчество) Ерофеев Максим Викторович

Тема курсовой работы Баллистическое проектирование артиллерийских орудий
на сжатом газе

Направленность КР (учебная, исследовательская, практическая, производственная, др.)
Учебная

Источник тематики (кафедра, предприятие, НИР) Кафедра

График выполнения работы: 25% к 4 нед., 50% к 8 нед., 75% к 12 нед., 100% к 14 нед.

Задание Найти оптимальные параметры ствола и условий заряжания при решении обратной задачи
внутренней баллистики. При этом $d = 85$ мм, $q = 5$ кг, $v_{pm} = 950$ м/с, тип орудия – НР, тип
математической модели – квазиодномерная (КМ), критерий оптимальности – Z_{B1} , $p_m^{\max} = 390$ МПа, l_m^{\max}
 $= 65$ ед.д, $v_{pm-50} = 850$ м/с, $p_{mz+50} = 180$ МПа.

Оформление курсовой работы:

Расчетно-пояснительная записка на _____ листах формата А4.

Дата выдачи задания «13» сентября 2024 г.

Руководитель курсовой работы

(Подпись, дата)

В.А. Федулов
(И.О.Фамилия)

Студент

(Подпись, дата)

М.В. Ерофеев
(И.О.Фамилия)

Оглавление

1	Прямая задача внутренней баллистики	3
1.1	Описание математической модели	3

Введение

Данная курсовая работа посвящена нахождению оптимальных параметров артиллерийского орудия и условий заряжания путем решения обратной задачи внутренней баллистики. Ключевым критерием оптимальности решения является критерий качества баллистического решения Z_{B1} .

Решение должно удовлетворять следующим требованиям:

- $p_m^{\max} \leq 390$ МПа
- $l_m^{\max} \leq 65$ ед.д

Также на решение наложены следующие ограничения:

- $v_{pm-50} = 830$ м/с
- $p_{mz+50} = 180$ МПа

Условие задания:

- $d = 85$ мм
- $q = 5$ кг
- $v_{pm} = 950$ м/с
- Тип орудения – нарезное (НР)
- Тип мат. модели – квазиодномерная (КМ)

Данная задача будет решаться с использованием мат. аппарата квазиодномерной модели внутренней баллистики. Также использованы методы оптимизации для нахождения оптимального решения обратной задачи с учетом критериев и ограничений.

Вычисления проводились с помощью языка программирования Python с использованием библиотеки PyBallistics [1], визуализация данных осуществлялась через библиотеку Matplotlib [2].

Глава 1

Прямая задача внутренней баллистики

1.1 Описание математической модели

Выстрел представляет собой довольно сложный быстропротекающий физико-химический процесс. Его физическая сущность состоит в том, что при сгорании порохового заряда образуются газообразные продукты сгорания под большим давлением, под действием которого снаряд выталкивается из канала ствола с огромной скоростью. Прямая задача состоит в том, чтобы описать движение снаряда массой q по каналу ствола диаметра d под действием давления продуктов сгорания заряда пороха массой ω , находящимся в объеме W_0 . Схема процесса вместе с качественными распределениями давления и скорости представлена на рисунке 1. Для упрощения вводится ствол с камерой приведенной длины l_0 , имеющей тот же объем W_0 , но с диаметром, равным калибру ствола d .



Рис. 1.1: Схема процесса выстрела

Наиболее совершенным и точным описанием процесса выстрела является газодинамический подход, по размерности в нашем случае модель является одномерной (квазиодномерной). Эта модель выстрела содержит некоторые допущения:

- Гипотеза односкоростной газопороховой смеси (ОГПС)
- Геометрический закон горения пороха

В пространстве между дном ствола и дном снаряда (заснарядный объём) в процессе движения снаряда по каналу ствола находятся газообразные продукты сгорания пороха и конденсированные частицы несгоревшего пороха. Для упрощения принимается, что пороховые газы и конденсированные элементы

представляют собой гомогенную смесь, которая движется с общей скоростью. Такое допущение называется гипотезой односкоростной газопороховой смеси (ОГПС). Уравнение состояния ОГПС представляется в виде:

$$\varepsilon = \frac{p}{k-1} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - b\psi \right) + (1-\psi) \frac{f}{k-1}, \quad (1.1)$$

где ε – удельная внутренняя энергия ОГПС, ρ – плотность ОГПС, b – коэффциент порохового газа (эффективный собственный объём молекул), k – показатель адиабаты, $\psi = \omega_b / \omega$ – отношение массы сгоревшего элемента к его исходной массе, ω_b – масса сгоревшего пороха, ω – исходная масса пороха. δ – плотность пороха.

Геометрический закон горения пороха выражается в виде формулы (1):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{p^\nu}{I_e}, \quad (1.2)$$

где p – давление газа, ν – показатель степени в законе горения. В артиллерии, как правило, $\nu = 1$. $z = e / e_1$ – безразмерная толщина сгоревшего свода порохового элемента. В свою очередь e – координата текущего положения поверхности горения, а e_1 – полная толщина горящего свода порохового элемента. I_e – полный импульс давления пороховых газов:

$$I_e = \int_0^{t_e} p^\nu dt = \frac{e_1}{u_1},$$

где u_1 – скорость горения при единичном горении, определяемая экспериментальным путем.

Далее рассмотрим систему уравнений для газодинамической задачи в приближении ОГПС. ОГПС в данном случае представляет собой «псевдогаз», её движение в заснарядном объёме описывается стандартными уравнениями сохранения массы, импульса и энергии в лагранжевых координатах:

$$\frac{\partial v}{\partial m} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho S} \right) \quad (1.3)$$

$$\frac{dv}{dt} + S \frac{\partial p}{\partial m} = 0, \quad (1.4)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + p \frac{\partial}{\partial m} (vS) = 0. \quad (1.5)$$

Здесь m – массовая лагранжева координата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **PyBallistics**
- [2] **Matplotlib**