

УДК 531.55+004.94

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-98-107

Разработка математического и программного обеспечения баллистического расчета и оптимизации параметров активно-реактивного снаряда

С. А. Королев, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Р. Р. Мансуров, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе приводятся результаты разработки математического и программного обеспечения для моделирования внутренней и внешней баллистики, а также оптимизации параметров активно-реактивного снаряда.

Комплексная математическая модель баллистического расчета активно-реактивного снаряда включает в себя задачу внешней баллистики, задачу внутренней баллистики внутри ствола орудия и задачу внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя. Задача оптимизации параметров активно-реактивного снаряда заключается в увеличении дальности полета с учетом условия устойчивости движения на всей траектории. На основе математической модели баллистического расчета разработаны алгоритмы решения многокритериальной задачи оптимизации параметров активно-реактивного снаряда.

Разработанный программный комплекс включает в себя блок расчетных модулей, реализующих математические модели и вычислительные алгоритмы, базу данных параметров снаряда и результатов моделирования, блок визуализации результатов вычислительного эксперимента в виде графиков и таблиц. Программный комплекс может быть использован при проектировании и оптимизации параметров снарядов артиллерийских систем, использующих активно-реактивный принцип метания.

Результаты математического моделирования и оптимизации параметров рассмотрены на примере проектируемого активно-реактивного снаряда для артиллерийской системы калибра 152 мм. Для повышения устойчивости снаряда на траектории во время работы реактивного двигателя на внутренней поверхности сопла предлагается установка ребер под углом к оси снаряда для создания дополнительного вращательного момента. На основе разработанной модели определены оптимальные характеристики стрельбы активно-реактивным снарядом калибра 152 мм. Представлены результаты решения задач внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда, полученные с помощью программного комплекса моделирования баллистического процесса. Решена основная задача внутренней баллистики внутри ствола орудия, задача внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя, прямая задача внешней баллистики активно-реактивного снаряда и исследования устойчивости движения снаряда на траектории. Найдены оптимальные параметры внутренней и внешней баллистики, обеспечивающие максимальную дальность стрельбы активно-реактивным снарядом с учетом устойчивости его движения на всей траектории.

Ключевые слова: внешняя баллистика, внутренняя баллистика, активно-реактивный снаряд, критерий устойчивости снаряда, математическое моделирование, многомерная оптимизация, программный комплекс.

Введение

В настоящее время отечественные артиллерийские активно-реактивные снаряды (АРС) существенно отстают в точности и дальности стрельбы от зарубежных аналогов [1–5].

Для проведения баллистических расчетов, проектирования и оптимизации боеприпасов артиллерийских систем разрабатывается специализированное программное обеспечение [6–8].

Исследование возможности повышения дальности стрельбы за счет активно-реактивного принципа метания требует комплексного подхода к моделированию и оптимизации всех стадий баллистического процесса.

Для проведения баллистических расчетов и оптимизации параметров активно-реактивного

снаряда был разработан и запатентован программный комплекс (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666109. Российская Федерация. Программа для решения задачи оптимизации параметров внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда с целью повышения дальности стрельбы: № 2023664816: заявл. 12.07.2023; опублик. 26.07.2023 / Русяк И. Г., Королев С. А., Мансуров Р. Р.).

Целью работы является проведение исследования пределов повышения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом за счет применения математического моделирования и комплексной оптимизации с помощью разработанного программного обеспечения.

Основной задачей баллистического проектирования является подбор конструктивных параметров боеприпаса под заданную дальность

стрельбы, но не менее важной задачей является увеличение дальности полета снаряда за счет выбора оптимальных параметров [9]. Для увеличения точности и кучности стрельбы снаряд должен быть устойчивым на всей траектории полета.

Снаряды для орудий с нарезным стволом стабилизируются за счет высокой скорости осевого вращения снаряда. Однако при старте реактивного двигателя из-за существенного увеличения скорости за короткий промежуток времени снаряд становится менее устойчивым, что сводит на нет эффект увеличения дальности за счет повышения скорости снаряда.

Для расчета баллистических параметров на всех этапах процесса выстрела, а также исследования устойчивости движения снаряда разработана комплексная математическая модель баллистических процессов активно-реактивного снаряда [10].

Первым этапом баллистического процесса АРС является внутренняя баллистика в стволе орудия. Зная параметры порохового заряда и геометрию ствола, можно определить начальную скорость проектируемого снаряда заданной массы, при этом максимальное давление пороховых газов в стволе орудия не должно превышать предельных значений. Затем определяются характеристики внутренней баллистики реактивного двигателя на твердом топливе (РДТТ) [11, 12].

В зависимости от массы топлива, геометрии камеры сгорания и сопла рассчитываются время работы и сила тяги РДТТ. Также при добавлении в конструкцию снаряда реактивного двигателя необходимо учитывать влияние изменения массогабаритных параметров проектируемого снаряда на процессы внутренней и внешней баллистики.

Следующим этапом является моделирование внешней баллистики, позволяющее рассчитывать траекторные параметры и исследовать устойчивость движения снаряда.

1. Математическое обеспечение решения задач внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда

1.1. Внутренняя баллистика в стволе орудия

Система уравнений внутренней баллистики описывает процессы горения пороховых элементов, движения снаряда в стволе, изменения давления и температуры пороховых газов в переменном объеме заснарядного пространства. Схема задачи внутренней баллистики в стволе орудия представлена на рис. 1.

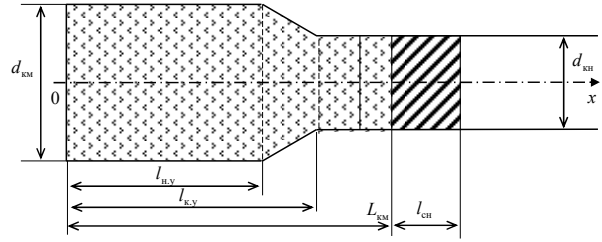


Рис. 1. Схема задачи внутренней баллистики в стволе орудия

Fig. 1. Scheme of the problem of internal ballistics in a gun barrel

Математическая модель внутренней баллистики в стволе орудия включает следующие основные уравнения [13]:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_k}{e_1}, \quad \frac{d\psi}{dt} = \frac{k}{e_1} \sigma(z) u_k, \quad \sigma(z) = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2, \\ \psi \leq \psi_p = k(1 + \lambda + \mu); \quad (1a)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_0}{\Lambda_0} \sigma(\psi) u_k, \quad \sigma(\psi) = \sigma(\psi_p) \sqrt{\frac{1-\psi}{1-\psi_p}}, \quad (1b)$$

$$\psi_p \leq \psi \leq 1, \quad \sigma(\psi_p) = 1 + 2\lambda + 3\mu;$$

$$m_0 \frac{dV_{\text{сн}}}{dt} = p_{\text{сн}} S_{\text{сн}} \eta (p_{\text{сн}} - p_{\text{ф}}), \quad \frac{dx_{\text{сн}}}{dt} = V_{\text{сн}}; \quad (2)$$

$$p \left[W_{\text{сн}} - \frac{\omega}{\delta} (1 - \psi) - \alpha (\omega \psi + \omega_{\text{в}}) \right] = (\omega \psi + \omega_{\text{в}}), \\ f - \left(1 + \frac{(\omega + \omega_{\text{в}}) J_1}{m_0} \right) \theta m_0 \frac{v_{\text{сн}}^2}{2}; \quad (3)$$

$$p \left[W_{\text{сн}} - \alpha (\omega \psi + \omega_{\text{в}}) - \frac{\omega}{\delta} (1 - \psi) \right] = \\ = (\omega \psi + \omega_{\text{в}}) RT; \quad (4)$$

дополнительные соотношения:

$$p_{\text{кн}}(t) = p_{\text{сн}}(t) \left(1 + \frac{(\omega + \omega_{\text{в}}) J_2(x_{\text{сн}})}{m_0} \right) + \\ + (\omega + \omega_{\text{в}}) \frac{V_{\text{сн}}^2}{W_{\text{сн}}} \left(\frac{1}{2} - J_2(x_{\text{сн}}) \right);$$

$$p_{\text{сн}}(t) = \frac{p(t) + (\omega + \omega_{\text{в}}) \frac{V_{\text{сн}}^2}{W_{\text{сн}}} \left(\frac{1}{2} J_1 + J_2(x_{\text{сн}}) - J_3 - \frac{1}{2} \right)}{1 + \frac{(\omega + \omega_{\text{в}})}{m_0} (J_2(x_{\text{сн}}) - J_3)};$$

$$W_{\text{сн}} = W_{\text{км}} + S_{\text{сн}} (x_{\text{сн}} - L_{\text{км}}).$$

В уравнениях (1)–(4) введены следующие обозначения: z – относительная толщина горящего свода; ψ – относительная доля сгорев-

шего пороха; u_k – единичная скорость горения пороха; ω – масса пороха; ω_b – масса воспламенителя; δ – плотность материала пороха; V_{ch} – дульная скорость снаряда; m_0 – масса снаряда; S_{ch} – площадь миделя снаряда; p – давление газа в стволе; R – удельная газовая постоянная продуктов горения пороха; T – температура продуктов горения; p_{kh} – давление на дно канала; p_{ch} – давление на дно снаряда; W_{ch} – объем заснарядного пространства; L_{km} – длина каморы; W_{km} – объем каморы; J_1, J_2, J_3 – баллистические коэффициенты.

На основе модели внутренней баллистики в стволе орудия определяется зависимость дульной скорости АРС от его массы.

1.2. Внутренняя баллистика РДТТ

Для определения силы тяги и момента вращения на активном участке траектории решалась задача внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя. Схема расчета внутренней баллистики РДТТ представлена на рис. 2.

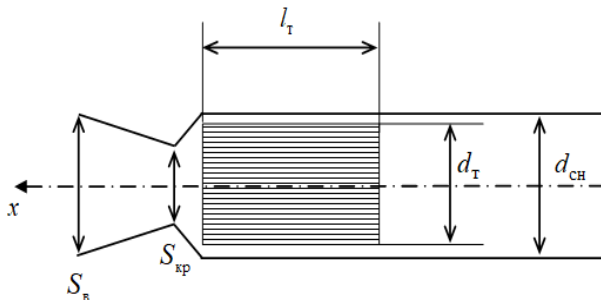


Рис. 2. Схема расчета внутренней баллистики РДТТ

Fig. 2. Scheme for calculating the internal ballistics of a jet engine

Математическая модель внутренней баллистики РДТТ включает следующие уравнения и соотношения:

$$u = u_1 p_k^\mu; \quad (5)$$

$$p_k = \left(\frac{\rho_T u_1 S_T \sqrt{\chi R T_k}}{\Phi_c S_{kp} A_1} \right)^{\frac{1}{1-\mu}}; \quad (6)$$

$$G_{соп} = G_{кр} = \frac{S_{кр} p_k A_1}{\sqrt{\chi R T_k}}; \quad (7)$$

$$P_\Sigma = G_{соп} u_b + S_b (p_b - p_n); \quad (8)$$

$$I_T = \int_0^{\Delta t_T} P_\Sigma dt. \quad (9)$$

Здесь u – скорость горения; u_1, μ – параметры закона горения; p_k, T_k – давление и температура в камере сгорания; S_T – площадь горения топлива; $\Delta t_T = \frac{l_T}{u}$ – время горения (при торцевом горении $S_T = \pi d_T^2 / 4$, $\Delta t_T = l_T / u$); $S_{кр}$ – площадь критического сечения сопла; S_b – площадь выходного сечения; $G_{соп}$ – расход продуктов горения через сопло; P_Σ – суммарная тяга реактивного двигателя; I_T – суммарный импульс тяги двигателя.

Для повышения устойчивости АРС на внутренней поверхности сопла располагаются ребра под углом β к оси снаряда (рис. 3).

Сила тяги и момент вращения реактивного двигателя определяются следующими соотношениями:

$$P = P_\Sigma [(1 - \nu) + \nu \cos \beta], \quad (10)$$

$$M_{px} = P_\Sigma \nu r_e \sin \beta, \quad (11)$$

где ν – доля тяги на вращательный момент; r_e – радиус приложения силы вращения.

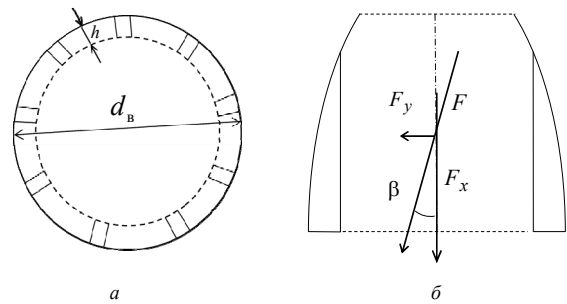


Рис. 3. Схема сопла с ребрами на поверхности: а – торцевое сечение; б – боковое сечение

Fig. 3. Diagram of a nozzle with fins on the surface: a – end section; b – side section

1.3. Внешняя баллистика

Координаты центра масс снаряда определяются из решения кинематических уравнений в стартовой системе координат $O_c x_c y_c z_c$ (рис. 4):

$$\frac{dx_c}{dt} = V_k \cos \theta \cos \psi; \quad (12)$$

$$\frac{dy_c}{dt} = V_k \sin \theta; \quad \frac{dz_c}{dt} = -V_k \cos \theta \sin \psi, \quad (13)$$

где V_k – скорость снаряда; θ – угол наклона траектории; ψ – угол пути.

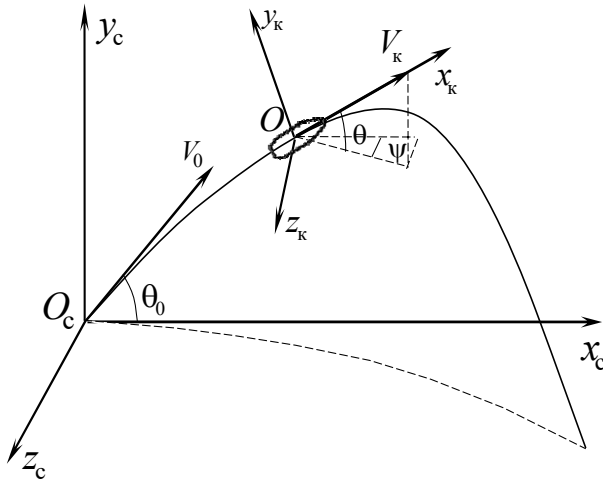


Рис. 4. Ориентация стартовой (O_c, x_c, y_c, z_c) и траекторной (O_k, x_k, y_k, z_k) систем координат
 Fig. 4. Orientation of the starting (O_c, x_c, y_c, z_c) and trajectory (O_k, x_k, y_k, z_k) coordinate systems

Параметры движения снаряда определяются в траекторной системе координат O_k, x_k, y_k, z_k [14]:

$$\frac{dV_k}{dt} = -g \sin \theta + \frac{P - C_x q S_M}{m}; \quad (14)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{V_k} - \frac{C_y q S_M}{m V_k}; \quad (15)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{f_z - C_z q S_M}{m V_k \cos \theta}; \quad (16)$$

$$\frac{d\omega_x}{dt} = -\frac{m_x q S_M l}{I_x} + \frac{M_{px}}{I_x}; \quad (17)$$

$$\frac{dm}{dt} = -G_{\text{сop}}, \quad (18)$$

где C_x, C_y, C_z – коэффициенты проекций аэродинамической силы на оси траекторной системы координат; $q = \frac{\rho V_k^2}{2}$ – скоростной напор воздуха; m – масса снаряда; $S_M = \pi d^2 / 4$ – площадь миделева сечения; d – калибр снаряда; ω_x – аксиальная угловая скорость вращения снаряда; l – длина снаряда; I_x – аксиальный момент инерции; f_z – коэффициент деривации вращающегося снаряда.

Для исследования устойчивости движения снаряда на всей траектории воспользуемся коэффициентом гироскопической устойчивости:

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{\beta_1}{\alpha_1^2}}, \quad (19)$$

где $\alpha = \frac{I_x}{2I_y} \omega_x$ – коэффициент гироскопического

момента; $\beta_1 = \frac{m_z^\alpha q S_M l}{I_y}$ – коэффициент аэродинамического момента; I_y – экваториальный момент инерции; m_z^α – производная коэффициента аэродинамического момента.

1.4. Задача оптимизации

баллистических параметров АРС

Для выбора оптимальных баллистических параметров АРС решалась задача максимизации дальности стрельбы [15]:

$$X = F(m_T, V_0, \theta_0, t_c, \nu) \rightarrow \max, \quad (20)$$

где m_T – масса топлива РДТТ; V_0 – начальная скорость; θ_0 – угол стрельбы; t_c – время старта РДТТ; ν – доля тяги на момент вращения.

Дополнительные соотношения:

$$V_0 = V_0(m_0); I_T = I_T(m_T), \quad (21)$$

где $V_0(m_0)$ – начальная скорость, определяется из решения задачи внутренней баллистики в стволе орудия; $I_T(m_T)$ – суммарный импульс тяги, определяется из решения задачи внутренней баллистики РДТТ.

Основные ограничения задачи оптимизации следуют из ограничения на максимальную длину снаряда и условия устойчивости движения на всей траектории.

2. Программный комплекс моделирования внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда

Разработанный программный комплекс (ПК) представляет возможность пользователю через интерфейс задавать параметры заряда, снаряда, ствола орудия и реактивного двигателя. Программный комплекс позволяет моделировать комплекс задач: внутренняя баллистика в стволе орудия, внутренняя баллистика РДТТ, внешняя баллистика АРС, задача устойчивости снаряда на траектории, задача поиска оптимальных параметров АРС с целью максимизации дальности полета. ПК состоит из следующих модулей (рис. 5):

- входные данные, позволяющие задать начальные параметры для расчета, в том числе параметры снаряда, параметры орудия, параметры заряда, параметры РДТТ;

- расчетный модуль, включающий математические модели и алгоритмы решения задач внутренней баллистики, внешней баллистики и оптимизации параметров АРС;

- выходные данные, включающие визуализацию расчетов в виде графиков и таблиц с данными расчетов.

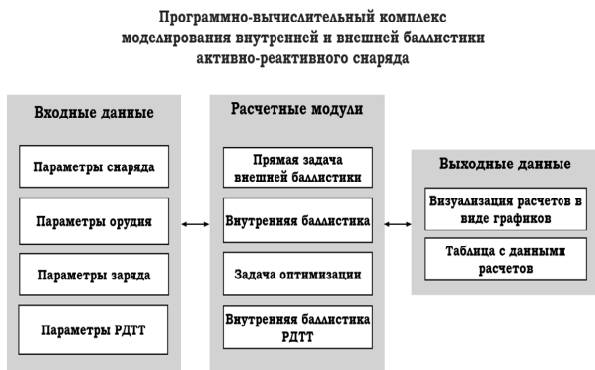


Рис. 5. Структура ПК моделирования внутренней и внешней баллистики

Fig. 5. Structure of the software package for modeling internal and external ballistics

Основные возможности ПК:

- решение основной задачи внутренней баллистики в термодинамической постановке;
- решение прямой задачи внешней баллистики с учетом работы реактивного двигателя и анализом устойчивости движения снаряда;
- решение задачи максимизации дальности полета АРС за счет оптимизации внутри- и внешнебаллистических параметров;
- визуализация результатов моделирования в виде графиков и таблиц;

– экспорт результатов вычислений в формате json и csv.

Разработка ПК велась в среде VisualStudio 2019 Community. В качестве языка программирования был выбран C#, пакет разработки версии .Net4.7.

Для импорта и экспорта данных о стволе, снаряде, реактивном двигателе и пороховом заряде использовался формат json. Данный формат позволяет представлять сведения об объектах в визуальном удобном виде. В сравнении с форматом xml, файлы формата json меньше по объему и имеют более понятный синтаксис.

Интерфейс ПК представлен на рис. 6. Главное окно ПК разделено на две части, в левой области приводится иерархическая структура исходных данных и параметров расчета, в правой части выводятся графики и таблицы результатов расчета. При изменении данных на форме они автоматически заносятся в экземпляры классов снаряда, заряда и ствола, которые используются при проведении вычислений. Введенные параметры могут быть сохранены для возможности дальнейшего использования. К тому же при сравнении снарядов с различными параметрами существует возможность одновременного вывода двух зависимостей на одном графике.

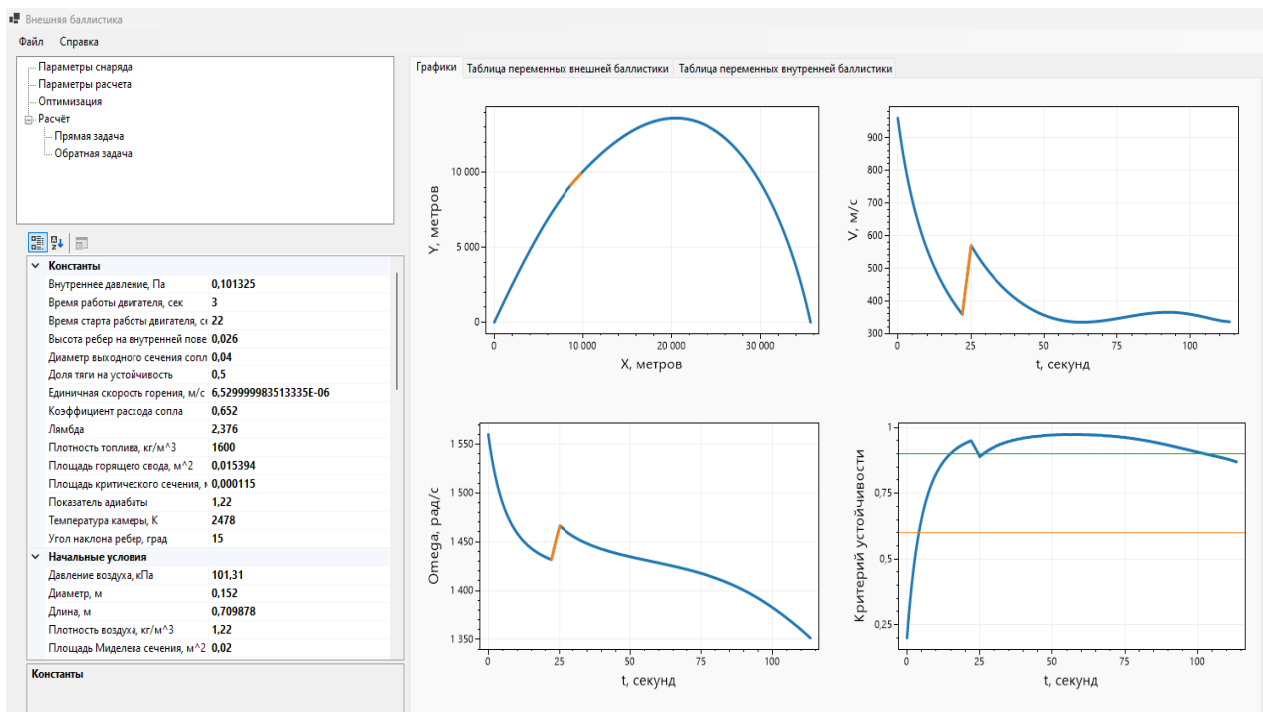


Рис. 6. Интерфейс ПК

Fig. 6. Software package interface

Входными данными ПК являются файлы формата json. Структура файла параметров снаряда представлена в листинге 1.

Листинг – 1. Структура файла параметров снаряда

```
{
  "Name": "ОФ29",
  "Caliber": 0.152,
  "Mass": 46.0,
  "Length": 0.709878,
  "Head_length": 0.4167,
  "I_x": 0.1455,
  "I_z": 1.4417,
  "Rifling_stroke": 25.0,
  "Center_of_mass": 0.45,
  "Starting_velocity": 945.0,
  "Initial_angular_velocity": 1560.0,
  "Start_angle": 25.0,
  "ix": 1.02,
  "cx_law": 1.0,
  "iz": 1.0,
  "mx_wx": 0.0004}

```

Выходными данными ПК являются файлы формата csv. Файл результатов расчета траектории снаряда представляет собой таблицу расчетных параметров, записанную с определенным шагом по времени.

3. Результаты решения задач внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда

3.1. Внутренняя баллистика в стволе орудия

Используя возможности разработанного ПК, проведем сравнение штатного 152-мм осколочно-фугасного снаряда ОФ29 и моделируемого 152-мм активно-реактивного снаряда.

В табл. 1 представлены параметры задачи внутренней баллистики и результаты расчета. Единичная скорость горения пороха u_k подбиралась с учетом ограничения на максимальное давление в стволе, равное 320 МПа.

Таблица 1. Параметры задачи внутренней баллистики

Table 1. Parametric characteristics of projectiles

Параметр	Значение	
	ОФС	АРС
Тип снаряда	ОФС	АРС
Масса пороха, ω	19 кг	
Масса воспламенителя, ω_b	0,810 кг	
Плотность пороха, δ	1520 кг/м ³	
Масса снаряда, m_0	46 кг	55,6 кг
Ед. скорость горения, u_k	5,9e-10 м ³ /(Н·с)	6,5e-10 м ³ /(Н·с)
Давление, $p_{кн}$	320 МПа	
Дульная скорость, V_0	945 м/с	870 м/с

На рис. 11 представлено изменение дульной скорости снаряда во время выстрела.

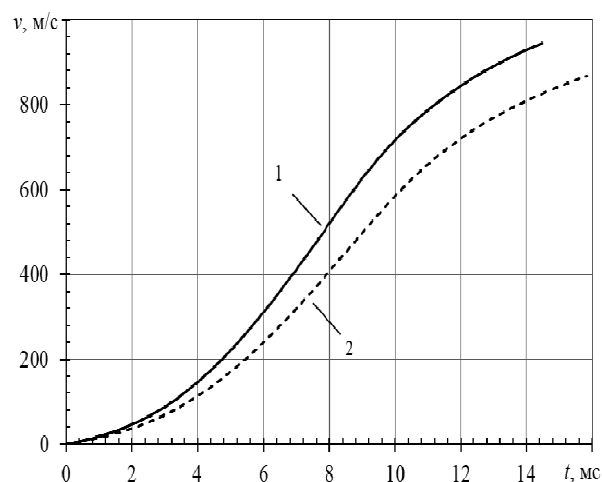


Рис. 11. Изменение скорости в стволе орудия: 1 – ОФС; 2 – АРС

Fig. 11. Change in speed in the gun barrel: 1 – High explosive projectile; 2 – Active-rocket projectile

Из полученных результатов следует, что начальная скорость снаряда для моделируемого АРС составила 870 м/с, а для ОФС – 945 м/с, что соответствует штатной скорости выстрела.

3.2. Внутренняя баллистика РДТТ

При решении задачи внутренней баллистики РДТТ рассматривались параметры, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики РДТТ

Table 2. Solid propellant rocket motor characteristics

Параметр	Значение
Давление в камере p_k	4 МПа
Время работы $t_{рд}$	2,36 с
Масса топлива m_T	5,0 кг
Суммарный импульс I_T	11,56 кПа
Доля тяги на вращательный момент, ν	5 %

В целях обеспечения выполнения условия устойчивости в конструкции РДТТ предусмотрены ребра на внутренней поверхности сопла. Доля тяги на вращательный момент $\nu = 5\%$.

Изменение скорости полета на траектории для ОФС и АРС представлено на рис. 12.

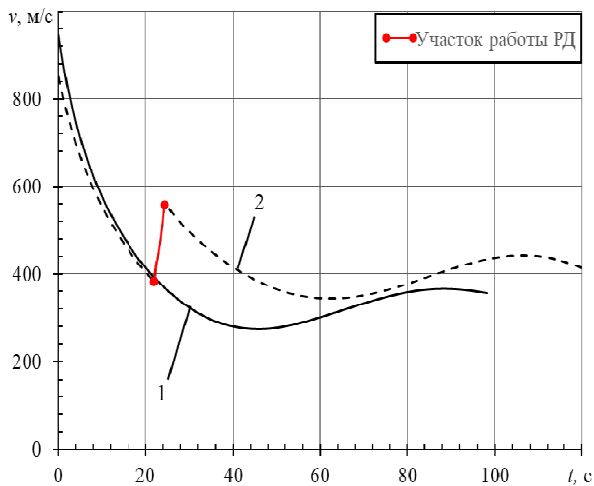


Рис. 12. Изменение скорости полета на траектории: 1 – ОФС; 2 – АРС

Fig. 12. Projectile speed along the trajectory: 1 – High explosive projectile; 2 – Active-rocket projectile

При срабатывании на 22 с реактивного двигателя скорость АРС возрастает на 190 м/с, при этом во время работы РДТТ за счет заполнения заснарядной разряженной зоны газами на 12 % уменьшается аэродинамическая сила сопротивления.

На рис. 13 представлены проекции траектории ОФС и АРС на плоскость стрельбы Oxy .

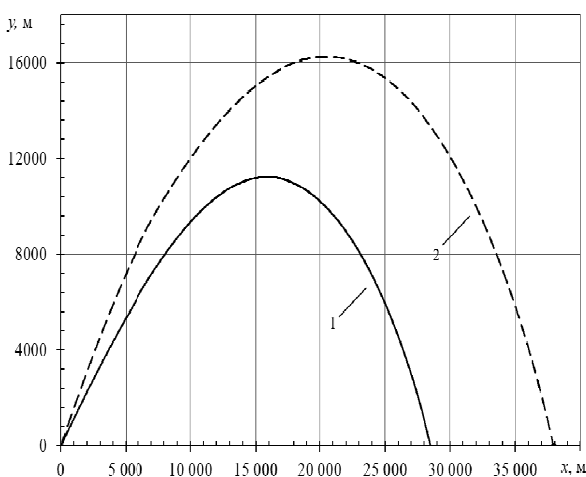


Рис. 13. Проекция траектории на плоскость стрельбы: 1 – ОФС; 2 – АРС

Fig. 13. Projections of the trajectory on the shooting plane: 1 – High explosive projectile; 2 – Active-rocket projectile

Максимальная дальность АРС возрастает на 8 км (30 %) по сравнению с дальностью ОФС.

3.3. Внешняя баллистика

При выборе параметров АРС изменялась масса топлива реактивного двигателя. Увели-

чение массы топлива достигалось за счет увеличения длины камеры сгорания, при этом увеличение массы и длины снаряда прямым образом влияет на аксиальный и экваториальный моменты инерции (см. табл. 3). Для исследования критерия устойчивости это весьма важные параметры, которые необходимо учитывать.

Таблица 3. Параметры задачи внешней баллистики

Table 3. Parametric characteristics of projectiles

Параметр	Значение	
	ОФС	АРС
Тип снаряда	ОФС	АРС
Масса, m_0	46 кг	55,6 кг
Нач. скорость V_0	945 м/с	870 м/с
Длина снаряда, l	700 мм	885 мм
Аксиальный момент инерции, I_x	0,141 кг·м ²	0,175 кг·м ²
Экваториальный момент инерции, I_y	1.473 кг·м ²	2.900 кг·м ²

Оптимальным диапазоном изменения коэффициента устойчивости является интервал $0,6 \leq \sigma \leq 0,9$. Рис. 14 демонстрирует изменение коэффициента устойчивости ОФС и АРС для двух случаев: без момента вращения и с моментом вращения реактивного двигателя.

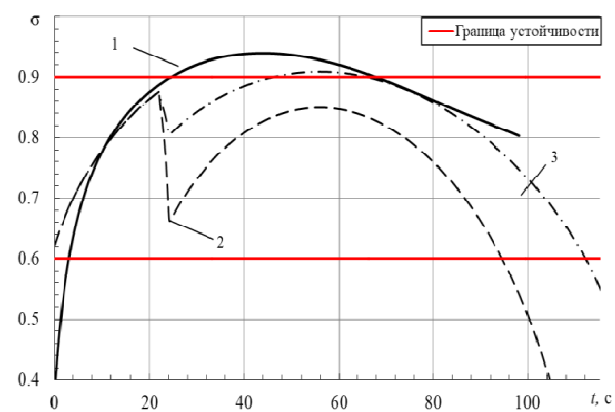


Рис. 14. Изменение коэффициента устойчивости снаряда во время полета: 1 – ОФС, 2 – АРС без момента вращения, 3 – АРС с моментом вращения (5 %)

Fig. 14. Change in the stability coefficient of a projectile during flight: 1 – High-explosive projectile, 2 – Active-rocket projectile without moment of rotation, 3 – Active-rocket projectile with moment of rotation (5%)

Исходя из рис. 14 можно сделать вывод, что при добавлении момента вращения за счет ребер на внутренней поверхности сопла снаряд

сохраняет устойчивость практически на всей траектории.

3.4. Задача оптимизации баллистических параметров APC

Значения дальности стрельбы при различных внешнебаллистических параметрах рассматриваемого APC в сравнении с дальностью ОФС представлены в табл. 4. На рис. 15 представлены расчетные траектории движения ОФС и APC.

Таблица 4. Дальность полета снаряда при различных начальных параметрах

Table 4. Projectile flight range at various initial parameters

Тип снаряда	ОФС	APC		
		t_c, c	$\theta_0, \text{град}$	X, m
t_c, c	–	5	22	45
$\theta_0, \text{град}$	48	48	58	58
X, m	28517	35798	37923	35 065

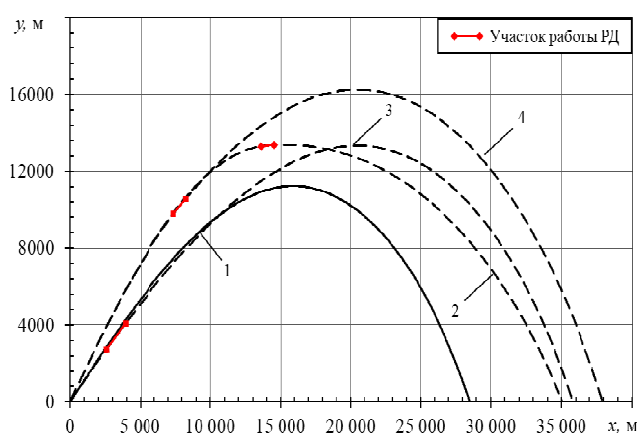


Рис. 15. Траектория полета снаряда при различных параметрах: 1 – ОФС; 2 – APC, $t_c = 5$ с; 3 – $t_c = 45$ с; 4 – $t_c = 22$ с

Fig. 15. Trajectory of projectile for various parameters: 1 – High-explosive projectile; 2 – Active-rocket projectile, $t_c = 5$ s; 3 – $t_c = 45$ s; 4 – $t_c = 22$ s

Данный график демонстрирует то, что угол наклона орудия $\theta_0 = 58$ градусов и время старта реактивного двигателя $t_c = 22$ с, найденные при решении задачи оптимизации, являются оптимальными и позволяют достичь максимальной дальности, равной 37,9 км.

Заключение

В статье представлены результаты разработки математического и программного обеспечения баллистического расчета и оптимизации

параметров активно-реактивного снаряда. Программный комплекс позволяет проводить расчет максимальной дальности с учетом устойчивости полета активно-реактивного снаряда за счет оптимизации внутри- и внешнебаллистических параметров.

Установлено, что для моделируемого активно-реактивного снаряда калибра 152 мм при оптимальном угле наклона орудия 58 градусов и времени старта реактивного двигателя на 22 с максимальная дальность составила 37,9 км, что на 30 % выше дальности штатного осколочно-фугасного снаряда того же калибра.

Библиографические ссылки

1. Некоторые перспективные направления развития боеприпасов и выстрелов / В. М. Буренок, О. Т. Чижевский, К. М. Иванов [и др.]. Часть II // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 2 (117). С. 11–24.

2. Гвоздев А. Е., Шибко С. В., Щукин Д. Е. Основные направления развития высокоточных боеприпасов ствольной артиллерии // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 2 (132). С. 84–90.

3. Оценка баллистических возможностей артиллерийских снарядов с ракетно-прямоточными двигателями / Б. Э. Кэрт, Е. А. Чубасов, Е. А. Знаменский [и др.] // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2019. № 2 (107). С. 125–133.

4. О некоторых перспективных направлениях развития артиллерийских боеприпасов и выстрелов / Б. Э. Кэрт, Е. А. Знаменский, А. В. Панченко, В. А. Чубасов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, 2022. № 4 (124). С. 70–74.

5. Balon R., Komenda J. ANALYSIS OF THE 155 MM ERFB/BB PROJECTILE TRAJECTORY. Advances in Military Technology. 2022. No. 1 (1). P. 91–114.

6. Беляева, С. Д. Пакетное решение основной задачи внешней баллистики // Артиллерийский журнал. 2023. № 4. С. 27–32.

7. Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А. Разработка программы для расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия // Липановские научные чтения : материалы региональной научной конференции, Ижевск, 2021. С. 106–111.

8. Бельский А. Б. Основные подходы к созданию перспективного полигонного программно - аппаратного комплекса обеспечения и анализа летных испытаний неуправляемых авиационных средств поражения с боевых вертолетов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 1 (116). С. 75–81.

9. Исследование возможности увеличения стрельбы за счет баллистических факторов / И. Г. Русяк, С. А. Королев, Д. А. Клюкин, Р. Р. Мансуров // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах

(ICOC'2023). Липановские чтения : сборник трудов одиннадцатой всероссийской конференции и школы-семинара молодых ученых и студентов, Ижевск, 14–16 июня 2023 года. Ижевск: Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 2024. С. 167–178.

10. Мансуров Р. Р., Королев С. А. Исследование пределов повышения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом // Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов : труды 19-й Всероссийской научно-технической конференции, Нижний Тагил, 29–30 сентября 2022 года. Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2023. С. 159–170.

11. Арсентьева М. В., Никитин В. А., Численное моделирование рабочего процесса в ствольном баллистическом двигателе // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 12. С. 3–7. DOI:10.24412/2071-6168-2022-12-3-8.

12. Направление повышения точности и дальности стрельбы управляемых реактивных снарядов систем залпового огня / В. С. Асташов, С. Н. Грушичев, А. С. Иванов, А. А. Поляков // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. № 11. С. 122–126. DOI:10.24411/2071-6168-2020-00191.

13. Русак И. Г., Тенев В. А. Влияние размерности математической модели внутренней баллистики на расчетные параметры выстрела для зарядов из зерненого пороха // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. С. 95–110. DOI 10.17223/19988621/73/9.

14. Нефедов Д. Г., Юминов А. Ю. Создание интеллектуальной системы наведения на цель с использованием технологии дополненной реальности // Липановские научные чтения : материалы Всероссийской школы-семинара молодых ученых и студентов. 2023. С. 91–94.

15. Королев С. А., Мансуров Р. Р. Решение задачи максимизации дальности полёта активно-реактивного снаряда с учетом устойчивости движения на всей траектории // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2023). Липановские чтения : сборник трудов одиннадцатой всероссийской конференции и школы-семинара молодых ученых и студентов, Ижевск, 14–16 июня 2023 года. Ижевск : Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, 2024. С. 99–107.

References

1. Burenok V.M., Chizhevsky O.T., Ivanov K.M. [et al.] [Some promising directions for the development of ammunition and shots. Part II]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2021. No. 2. Pp. 11-24 (in Russ.).

2. Gvozdev A.E., Shibeko S.V., V.D. Shchukin V.D.E. [Main directions of development of high-

precision ammunition for barrel artillery]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2024. No. 2. P. 84–90 (in Russ.).

3. Kert B.E., Chubasov E.A., Znamensky E.A. [et al.] [Evaluation of the ballistic capabilities of artillery shells with ramjet engines] *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2019. No. 2. Pp. 125-133 (in Russ.).

4. Kert B.E., Znamensky E.A., Panchenko A.V., Chubasov V.A. [On some promising directions of development of artillery ammunition and shots]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2022. No. 4. Pp. 70-74 (in Russ.).

5. Balon R., Komenda J. ANALYSIS OF THE 155 MM ERFB/BB PROJECTILE TRAJECTORY. *Advances in Military Technology*. 2022. No. 1(1). P. 91-114.

6. Belyaeva S.D. [Package solution of the main problem of external ballistics]. *Artilleriiskii zhurnal*. 2023. No. 4. Pp. 27-32 (in Russ.).

7. Sufiyarov V.G., Klyukin D.A. *Razrabotka programmy dlya rascheta prodol'no-poperechnykh kolebaniy stvola artilleriiskogo orudiya* [Development of a program for calculating longitudinal-transverse vibrations of an artillery gun barrel]. *Lipnovskie nauchnye chteniya : materialy regional'noi nauchnoi konferentsii* [Proc. Lipanovsky Scientific Readings: Proceedings of the regional scientific conference], Izhevsk, 2021. Pp. 106-111 (in Russ.).

8. Belsky A.B. [Basic approaches to the creation of a promising polygon software and hardware complex for supporting and analyzing flight tests of unguided aircraft weapons from combat helicopters]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*. 2021. No. 1. P. 75-81 (in Russ.).

9. Rusyak I.G., Korolev S.A., Klyukin D.A., Mansurov R.R. *Issledovanie vozmozhnosti uvelicheniya strel'by za schet ballisticheskikh faktorov* [Study of the possibility of increasing firing rate due to ballistic factors]. *Vnutrikamernye protsessy i gorenie v ustanovkakh na tverdom toplive i stvol'nykh sistemakh (ICOC'2023)*. *Lipnovskie chteniya : sbornik trudov odinnadsatoi vserossiiskoi konferentsii i shkoly-seminara molodykh uchenykh i studentov*, Izhevsk, 14–16 iyunya 2023 goda [Proc. Intrachamber processes and combustion in solid fuel installations and barrel systems (ICOC'2023). Lipanovskie chteniya: Proceedings of the eleventh all-Russian conference and school-seminar of young scientists and students], Izhevsk, June 14-16, 2023. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024. Pp. 167-178 (in Russ.).

10. Mansurov R.R., Korolev S.A. *Issledovanie pre-delov povysheniya dal'nosti strel'by aktivno-reaktivnym snaryadom* [Study of the Limits of Increasing the Firing Range of an Active-Reactive Projectile]. *Proektirovanie sistem vooruzheniya i izmeritel'nykh kompleksov : trudy 19-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Nizhnii Tagil, 29–30 sentyabrya 2022 goda* [Proc. Design of Weapon Systems and Measuring Complexes: Proceedings of the 19th All-Russian Scientific and

Technical Conference, Nizhny Tagil, September 29–30, 2022]. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Technological Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin", 2023. Pp. 159-170 (IN Russ.).

11. Arsentyeva M.V., Nikitin V.A., [Numerical modeling of the working process in a barrel ballistic engine]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2022. No. 12, Pp. 3-7 (in Russ.). DOI: 10.24412/2071-6168-2022-12-3-8.

12. Astashov V.S., Grushchev S.N., Ivanov A.S., Polyakov A.A. [Direction of increasing the accuracy and firing range of guided rockets of multiple launch rocket systems]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 11. Pp. 122-126 (in Russ.). DOI: 10.24411/2071-6168-2020-00191.

13. Ruyak I.G., Tenenev V.A. [Influence of the dimensionality of the mathematical model of internal ballistics on the calculated parameters of a shot for charges of granular gunpowder]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2021. Pp. 95-110 (in Russ.). DOI 10.17223/19988621/73/9.

14. Nefedov D.G., Yuminov A.Yu. *Sozдание intellektual'noi sistemy navedeniya na tsel' s ispol'zovaniem tekhnologii dopolnennoi real'nosti* [Creation of

an intelligent targeting system using augmented reality technology]. *Lipnovskie nauchnye chteniya : materialy Vserossiiskoi shkoly-seminara molodykh uchenykh i studentov* [Proc. Lipanovsky Scientific Readings: Proceedings of the All-Russian School-Seminar of Young Scientists and Students]. 2023. Pp. 91-94 (in Russ.).

15. Korolev S.A., Mansurov R.R. *Reshenie zadachi maksimizatsii dal'nosti poleta aktivno-reaktivnogo snaryada s uchetom ustoychivosti dvizheniya na vsej traektorii* [Solution of the problem of maximizing the flight range of an active-reactive projectile taking into account the stability of motion along the entire trajectory]. *Vnutrikamernye protsessy i gorenje v ustanovkakh na tverdom toplive i stvol'nykh sistemakh (ICOC'2023)*. *Lipnovskie chteniya : sbornik trudov odinnadsatoi vserossiiskoi konferentsii i shkoly-seminara molodykh uchenykh i studentov, Izhevsk, 14–16 iyunya 2023 goda* [Proc. Intra-chamber processes and combustion in solid-fuel installations and barrel systems (ICOC'2023). Lipanovsky Readings: Collection of works of the eleventh all-Russian conference and school-seminar of young scientists and students, Izhevsk, June 14-16, 2023]. Izhevsk: Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2024. Pp. 99-107 (in Russ.).

Development of Mathematical Support and Software for Ballistic Analysis and Optimization of Active-Missile Projectile Parameters

S. A. Korolev, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

R. R. Mansurov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The paper presents the results of developing mathematical and software support for internal and external ballistics modelling, as well as optimizing the parameters of an active-reactive projectile.

A complex mathematical model of active-reactive projectile ballistic analysis includes the problem of external ballistics, the problem of internal ballistics inside the gun barrel and the problem of internal ballistics of a solid-fuel jet engine. The problem of active-reactive projectile parameter optimization is to increase the flight range with respect to motion stability condition along the entire trajectory. Based on the mathematical model of ballistic analysis, the algorithms for solving a multi-criteria problem of active-reactive projectile parameter optimization have been developed.

The developed software package includes a block of calculation modules implementing mathematical models and computational algorithms, a database of projectile parameters and simulation results, a block for visualization the computational experiment results in the form of diagrams and tables. The software package can be used in the design and optimization of the projectile parameters of artillery systems implementing the active-reactive throwing principle.

The results of mathematical modeling and optimization of parameters are considered using the example of the designed active-reactive projectile for the 152 mm artillery system. To improve the projectile stability on the trajectory during jet engine operation, it is proposed to install ribs at an angle to the projectile axis on the inner surface of the nozzle so as to create extra torque. Based on the developed model, the optimal characteristics of firing an active-reactive projectile of caliber 152 mm are determined. The results of internal and external ballistics problem solution for an active-reactive projectile obtained by means of the software package for ballistic process modeling are presented. The main problem of internal ballistics inside the gun barrel, the problem of internal ballistics of a solid-fuel jet engine, the direct problem of external ballistics of an active-reactive projectile and the study of the projectile motion stability along the trajectory are solved. Optimal parameters of internal and external ballistics, providing the maximum firing range of an active-reactive projectile with respect to its motion stability along the entire trajectory, are found.

Keywords: external ballistics, internal ballistics, active-reactive projectile, projectile stability criterion, mathematical modelling, multidimensional optimization, software package.

Получено: 11.09.24

Образец цитирования

Королев С. А., Мансуров Р. Р. Разработка математического и программного обеспечения баллистического расчета и оптимизации параметров активно-реактивного снаряда // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 4. С. 98–107. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-98-107.

For Citation

Korolev S.A., Mansurov R.R. [Development of mathematical and software support for ballistic calculation and optimization of parameters of an active-reactive projectile]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 98-107. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-90-107.