УДК 531.55 +531.57

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПОВЫШЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ СТРЕЛЬБЫ АКТИВНО-РЕАКТИВНЫМ СНАРЯДОМ**

*Королев С.А., Мансуров Р.Р.*

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», 426069, Ижевск, ул. Студенческая, 7

*Аннотация: в статье рассматриваются различные способы повышения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом. Для увеличения дальности стрельбы решалась задача многомерной оптимизации. Разработана математическая модель баллистического расчета активно-реактивного снаряда. Решена задача внутренней баллистики РДТТ с учетом разделения тяги на осевую составляющую и момент вращения. Решена задача внешней баллистики, с учетом условия устойчивости снаряда на всей траектории. На основе разработанной модели определены пределы повышения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом калибра 152 мм.*

*Ключевые слова: внешняя баллистика, внутренняя баллистика РДТТ, многомерная оптимизация, критерий устойчивости снаряда, активно-реактивный снаряд, реактивный двигатель.*

**Введение**

Для исследования пределов повышения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом (АРС) разработана комплексная математическая модель внутренней и внешней баллистики АРС и методика оптимизации параметров с целью повышения дальности стрельбы. При этом, помимо увеличения дальности, необходимо обеспечить необходимую точность стрельбы, которая зависит от устойчивости снаряда на траектории. Контроль устойчивости движения АРС на траектории выполняется с помощью критерия гироскопической устойчивости.

Математическое моделирование выстрела из артиллерийского орудия активно-реактивным снарядом (АРС) включает несколько этапов:

1) моделирование внутренней баллистики в стволе орудия;

2) моделирование внешней баллистики АРС с контролем устойчивости по траектории;

3) моделирование внутренней баллистики реактивного двигателя твердого топлива (РДТТ);

4) оптимизация параметров внутренней и внешней баллистики с целью повышения дальности стрельбы.

**1. Математическая модель внутренней баллистики в стволе орудия**

Начальная скорость снаряда после вылета из ствола орудия рассчитывается на основе термодинамического подхода в нульмерной постановке [1]. Схема задачи внутренней баллистики в стволе орудия представлена на рис. 1.

***Рис. 1. Схема задачи внутренней баллистики ствола***

Для решения задачи использовалась математическая модель, включающая в себя следующие уравнения [2, 3]:

-уравнения горения

Дополнительные соотношения:

а) до фазы распада пороховых элементов или:

; (1а)

б) после распада пороховых элементов :

; (1б)

-уравнения движения снаряда

; (2)

-уравнение энергии

; (3)

-уравнение состояния

, (4)

дополнительные соотношения:

- давление на дно канала



- давление на дно снаряда



- объём заснарядного пространства

;

- объём каморы

;

- площади сечений каморы и канала ствола

.

Параметры задачи:  = 19 кг;  = 0,810 кг;  = 1520 кг/м3;  = 40 кг;  = 5,9е-10 м3/(Н·с).

В уравнениях (1) – (4) введены следующие обозначения:  –относительная толщина горящего свода;  – относительная доля сгоревшего пороха;  – дульная скорость снаряда;  – масса снаряда; – давление на снаряд;  – площадь миделя снаряда;  – давление на дно канала;  – давление газа в стволе;  – масса пороха;  – масса воспламенителя;  – плотность материала пороха;  – удельная газовая постоянная продуктов горения пороха;  – температура продуктов горения пороха;  – заснарядный объем;  – единичная скорость горения пороха в канале ствола;  – баллистические коэффициенты.

**2. Математическая модель внешней баллистики**

Траектория движения снаряда строится в стартовой системе координат , связанной с точкой расположения орудия и ориентированной по направлению стрельбы. Характеристики движения снаряда определяются в траекторной системе координат , связанной с центром масс снаряда и ориентированной по вектору скорости (рис. 2)[4].



***Рис. 2. Стартовая*** ** ***и траекторная  системы координат***

Система дифференциальных уравнений движения для случая активно-реактивного снаряда включает следующие уравнения [5]:

- уравнения движения центра масс снаряда

, , ; (5)

- уравнение скорости снаряда

; (6)

- уравнение угла наклона траектории

; (7)

- уравнение угла направления

; (8)

- уравнение угловой скорости вращения снаряда

; (9)

- уравнение изменения массы снаряда

, (10)

где  – координаты центра масс снаряда: дальность, высота боковое отклонение; *V*к – скорость снаряда;  - скоростной напор в воздухе; θ – угол наклона траектории; ψ – угол направления; ω*x*– аксиальная угловая скорость вращения снаряда; *m*0– масса снаряда; *l* – длина;  – аксиальный момент инерции; – площадь миделева сечения; *d* – калибр;  – коэффициент деривации вращающегося снаряда; *P* – тяга реактивного двигателя;  – единичный расход продуктов горения сопла,  – коэффициент вращения снаряда.

Аэродинамические коэффициенты снаряда определяются на основе численного моделирования внешнего обтекания снаряда [6] или по законам сопротивления воздуха 1943 или 1958 годов. На активном участке траектории во время работы реактивного двигателя коэффициент сопротивления снаряда  снижается на 10-15% за счет снижения донного сопротивления.

**3. Математическая модель внутренней баллистики реактивного двигателя**

Для определения силы тяги, момента вращения, суммарного импульса и времени работы реактивного двигателя на активном участке траектории решалась задача внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя (РД) [7, 8].

Математическая модель внутренней баллистики РД включает следующие уравнения и соотношения:

- уравнение скорости горения

; (11)

- уравнение давления в камере сгорания (формула Бори)

; (12)

- расход продуктов горения через сопло

; (13)

- сила тяги реактивного двигателя

; (14)

- суммарный импульс тяги двигателя

 (15)

Здесь , – давление и температура в камере сгорания;  – площадь горения топлива;  – время горения (при торцевом горении , );  – площадь критического сечения сопла;  – площадь выходного сечения;  – коэффициент расхода;  – коэффициент тепловых потерь;  – коэффициент механических потерь.

Для повышения устойчивости АРС на внутренней поверхности сопла располагаются ребра под углом β к оси снаряда. При этом импульс реактивного двигателя будет направлен не только на увеличение скорости полёта снаряда, но и на увеличения скорости вращения.

Сила тяги реактивного двигателя с учетом доли тяги на вращательный момент:

; (16)

момент вращения:

, (17)

где ν – доля тяги на вращательный момент;  – радиус приложения силы вращения; β – угол наклона ребер к оси снаряда.

Параметры в выходном сечении сопла определяются с помощью газодинамических функций:

; (18)

Приведенная скорость λ определяется из решения нелинейного уравнения:

. (19)

Система обыкновенных дифференциальных уравнений внутренней и внешней баллистики решалась численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Шаг интегрирования выбирался исходя из заданной точности расчетов по правилу Рунге [9].

**4. Задача устойчивости снаряда на траектории**

Для анализа устойчивости движения снаряда на траектории используется общеизвестный критерий гироскопической устойчивости [5]:

,

где – коэффициент гироскопического момента, – коэффициент опрокидывающего аэродинамического момента.

На основе теоретических исследований считается, что снаряд устойчив при условии . Однако на практике коэффициент гироскопической устойчивости выбирают из условия  [10]. Для значений  ось снаряда совершает значительные колебаний относительно центра масс, что приводит к большому рассеиванию. Для  возникает эффект перестабилизации снаряда – ось снаряда стремиться сохранить свое первоначальное направление, что также является нежелательным эффектом.

На рис. 3 представлен график изменения критерия устойчивости активно-реактивного снаряда на траектории при отсутствии и наличии вращательного момента двигателя. Горизонтальными красными линиями на графике отмечены границы устойчивости полета снаряда: .



***Рис. 3. Изменение критерия устойчивости активно-реактивного снаряда***

Сравнивая критерий устойчивости траектории АРС без момента вращения РД и с моментом вращения РД (ν = 5 %) становится очевидно, что для поддержания устойчивости снаряда на всей траектории необходимо добавить момент вращения РД. Без момента вращения снаряд выходит за нижнюю границу устойчивости на 95 секунде. Дальнейшее увеличение коэффициента вращательного момента ν приводит к перестабилизации снаряда.

Коэффициент устойчивости при увеличении момента вращения РД растет за счет увеличения угловой скорости. На рис. 4 проведено сравнение угловой скорости без момента вращения и моментом вращения РД (ν = 5%). Как видно из данного графика, на 22 секунде снаряд с моментом вращения РД угловая скорость за 3 секунды вырастает на 200 рад/с.

За счет использования части энергии РД на вращение снаряда снижается осевая составляющая силы тяги. Однако снижение дальности стрельбы при этом незначительно и составляет 176 м (0,5% от максимальной дальности стрельбы 33,7 км).



***Рис.4. Изменение угловой скорости вращения активно-реактивного снаряда***

**5. Задача оптимизации параметров активно-реактивного снаряда**

Для выбора оптимальных баллистических параметров АРС решалась задача максимизации дальности стрельбы [11]:

, (20)

где  – начальная масса активно-реактивного снаряда;  – начальная скорость;  – угол стрельбы; – время старта РД;  – суммарный импульс тяги РД;  – время работы РД; ν – доля тяги на момент вращения.

В качестве оптимизируемых параметров будем рассматривать угол стрельбы **, массу топлива , время старта РД .

Начальная масса снаряда , где масса пассивной части снаряда; масса камеры РД; масса соплового блока; масса ракетного топлива.

Начальная скорость снаряда  при вылете из ствола орудия определяется из решения задачи внутренней баллистики и зависит от начальной массы снаряда . Доля тяги ν, идущей на создание момента вращения, подбирается из условия выполнения критерия устойчивости на всей траектории.

**6. Результаты решения задач внутренней и внешней баллистики АРС**

На основе решения задачи внутренней баллистики была определена зависимость начальной скорости снаряда при вылете из ствола орудия от массы снаряда. При изменении суммарной массы снаряда, за счёт увеличения массы топлива реактивного двигателя, от 40 кг до 70 кг начальная скорость изменяется от 983,4 м/с до 759,1 м/с (рис. 5). Для удобства дальнейших вычислений зависимость начальной скорости от массы была аппроксимирована в виде функции .



***Рис. 5. Зависимость начальной скорости от массы снаряда***

На основе решения задачи внешней баллистики была найдена зависимость дальности полёта снаряда *X* от общей массы снаряда *m*0, включающей массу топлива*m*т (таблица 1). Как видно из таблицы, обычный снаряд без реактивного двигателя достигает дальности 27,7 км. При использовании реактивного двигателя с массой топлива 5 кг дальность возрастает до 37,9 км (на 40%), а при массе топлива равной 10 кг снаряд достигает дальности полета 65,4 км (в 2,4 раза).

***Таблица 1***

***Зависимость дальности полета снаряда от массы топлива***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***m*Т, кг** | 0 | 2,5 | 5 | 10 |
| ***m*0, кг** | 40 | 48,31 | 55,6 | 61,5 |
| ***X*, м** | 27 710 | 30 309 | 37 868 | 65 391 |

Для определения оптимальных внешнебаллистических параметров рассматривался АРС с характеристиками, приведенными в таблице 2. Такой снаряд является устойчивым на всей траектории.

***Таблица 2***

***Параметры активно-реактивного снаряда***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***d*, мм** | **, кг** | **, кг** | **, кН·с** | **, с** |
| 152 | 55,6 | 5,0 | 11,56 | 2,36 |

Значения дальности стрельбы при различных внешнебаллистических параметрах рассматриваемого АРС представлены в таблице 3. На рис. 6 представлены расчетные траектории движения данного АРС.

***Таблица 3***

***Дальность стрельбы при различных внешнебаллистических параметрах***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***, с*** | 41 | 22 | 0 |
| **, град** | 58 | 58 | 52 |
| ***X*, м** | 34 787 | 37 868 | 35 208 |



***Рис. 6 – Траектории снаряда при различных параметрах***

При решении задачи оптимизации были получены следующие оптимальные параметры: угол наклона орудия – 58°, время старта двигателя *t*1 = 22 c. Дальность полёта снаряда при таких параметрах составила 37,9 км, что на 7,6% больше, чем 35,2 км – дальность полёта снаряда при оптимальном угле наклона для снаряда без двигателя – 52° и времени старта РД после выхода снаряда из ствола орудия. Также сравнивались варианты расчёта при старте двигателя на восходящем участке траектории (*t*1 = 22 c) и на горизонтальном участке полёта (*t*1 = 41 c). Видно, что дальность стрельбы при включении двигателя на горизонтальном участке меньше, чем при оптимальном времени старта двигателя.

**Заключение**

1. Разработана комплексная математическая модель внутренней и внешней баллистики активно – реактивного снаряда.
2. Сформулирована математическая постановка задачи оптимизации параметров внутренней и внешней баллистики с целью повышения дальности стрельбы.
3. Решена задача внутренней баллистики в стволе орудия, найдена зависимость начальной скорости от массы снаряда. При изменении массы от 40 кг до 70 кг скорость снаряда меняется от 983,4 м/с до 759,1 м/с.
4. Решена задача внутренней баллистики реактивного двигателя. За счёт реактивного двигателя дальность полёта снаряда увеличивается на 40% по сравнению со снарядом без двигателя (при массе топлива *m*Т = 5 кг).
5. Решена задача внешней баллистики активно-реактивного снаряда с контролем устойчивости движения по траектории. Устойчивость снаряда обеспечена за счёт дополнительно момента вращения двигателя, доля тяги на вращение составляет ν = 5%.
6. Решена задача оптимизации. При оптимальном подборе параметров, дальность стрельбы активно-реактивным снарядом дополнительно увеличивается на 7,6% по сравнению с дальностью полета снаряда при старте реактивного двигателя после выхода снаряда из орудия. Найдены оптимальные значения угла стрельбы 58° и времени старта реактивного двигателя 22 с, при которых дальность полёта снаряда достигает 37,9 км, что является пределом дальности стрельбы для данного снаряда.

**Список литературы**

1. **Русяк И.Г., Липанов А.М., Ушаков В.М**., Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. – 456с.

2. **Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В.З.** Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. – 256 с.

3. **Серебряков М.Е**. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз. 1962. – 705 с.

4. **Коновалов А. А., Николаев Ю. В***.* Внешняя баллистика. – М.: ЦНИИ информации, 1979. – 228 с.

5. **Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н.** Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.

6. **Королев С.А., Липанов А.М., Русяк И.Г.** Исследование путей повышения дальности стрельбы ствольной артиллерии // Вестник Ижевского гос. техн. Ун-та им. М.Т. Калашникова 2018.– №3. – Т. 21. – С. 185-191.

7. **Баллистика ракетного и ствольного оружия:** учебник для вузов / под ред. А.А. Королева, В.А. Комочкова; науч. конс. В.А. Шурыгин. – Волгоград, 2010. – 472с.

8. **Липанов А. М., Алиев А.В.** Проектирование ракетных двигателей твердого топлива: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1995. – 399 с.

9. **Самарский А.А., Гулин А.В.** Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2003. – 316 с.

10. **Балаганский И.А***.* Основы баллистики и аэродинамики: учебное пособие / И.А. Балаганский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – 200 с.

11*.* **Мансуров Р.Р., Королев C.А***.* Разработка методики баллистического расчета и оптимизации параметров активно-реактивного снаряда // Сборник материалов XXXIII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов. – Ижевск, 2022. – С. 229-237.

*Королев Станислав Анатольевич, д-р техн. наук, доц.,* [*stkj@mail.ru*](mailto:stkj@mail.ru)*, Россия, Ижевск, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,*

*Мансуров Рустам Ренатович, инженер-программист 1 категории, otum@bk.ru, Россия, Ижевск, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова.*

*STUDY OF THE LIMITS OF INCREASING THE FIRE RANGE OF AN ACTIVE-JET PROJECT*

*S.A. Korolev, R.R. Mansurov*

***Annotation****: The article discusses various ways to increase the firing range limits of an active-rocket projectile. To increase the firing range, the problem of multidimensional optimization was solved. A mathematical model for the ballistic calculation of ARS has been developed. The problem of internal ballistics of solid propellant rocket engines has been solved, and the problem of external ballistics has also been solved, taking into account the condition of projectile stability along the entire trajectory.*

***Keywords:***

*External ballistics, internal ballistics of solid propellant rocket engines, multidimensional optimization, projectile stability criterion, active rocket projectile, jet engine.*

*Korolev Stanislav Anatol'yevich, doctor of technical sciences, docent,* [*stkj@mail.ru*](mailto:stkj@mail.ru)*, Russia, Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University,*

*Mansurov Rustam Renatovich 1st category software engineer, otum@bk.ru, student, Russia, Izhevsk, Kalashnikov Izhevsk State Technical University,*