УДК 531.55 +531.57

**МЕТОДИКА БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНО-РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА**

*Королев С.А., Мансуров Р.Р.*

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

*Аннотация: в статье рассматривается процесс баллистического проектирования активно-реактивного снаряда. Выделяются основные способы увеличения дальности стрельбы активно-реактивным снарядом. Разработана комплексная математическая модель выстрела и полета активно-реактивного снаряда. Для увеличения устойчивости снаряда на траектории составлена математическая модель реактивного двигателя с ребрами на внутренней поверхности сопла. На основе разработанной модели определены оптимальные характеристики 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**

Первым этапом процесса является внутренняя баллистика внутри ствола орудия. Зная параметры порохового заряда и геометрию ствола, можно определить начальную скорость снаряда заданной массы. Затем определяются параметры внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя (РД). В зависимости от массы топлива, конструкции камеры сгорания и сопла определяются время работы и сила тяги РД. Следующим этапом является моделирование внешней баллистики, позволяющей рассчитывать траекторные параметры снаряда.

Для расчета параметров движения АРС на всех этапах выстрела была разработана комплексная математическая модель [1]. Такой подход позволяет провести комплексную оптимизацию внутри- и внешнебаллистических параметров АРС с целью повышения дальности стрельбы.

Устойчивость движения снаряда является не менее важным фактором. В данной статье предлагается стабилизация снаряда вращением, за счёт добавления в конструкцию реактивного двигателя ребер на внутренней поверхности сопла.

**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

 (5)

- давление на дно снаряда

 (6)

- объём заснарядного пространства

; (7)

- объём каморы

; (8)

- площади сечений каморы и канала ствола

. (9)

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

, , ; (10)

- уравнение скорости снаряда

; (11)

- уравнение угла наклона траектории

; (12)

- уравнение угла направления

; (13)

- уравнение угловой скорости вращения снаряда

; (14)

- уравнение изменения массы снаряда

, (15)

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].

Допущения модели:

- горение топлива торцевое,

- давление в камере сгорания постоянно,

- топливо сгорает равномерно.



***Рис. 3. Схема расчета внутренней баллистики реактивного двигателя***

Математическая модель внутренней баллистики РД включает следующие уравнения и соотношения:

- уравнение скорости горения

; (16)

- уравнение давления в камере сгорания (формула Бори)

; (17)

- расход продуктов горения через сопло

; (18)

- сила тяги реактивного двигателя

; (19)

- суммарный импульс тяги двигателя

 (20)

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.

Параметры в выходном сечении сопла определяются с помощью газодинамических функций:

; (21)

Приведенная скорость λ определяется из решения нелинейного уравнения:

. (22)

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:

; (23)

момент вращения [41]:

, (24)

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

Доля тяги на вращательный момент связана с параметрами ребер на поверхности сопла следующим соотношением

, (25)

где  – площадь выходного сечения сопла, ;  – площадь ребер в выходном сечении, ; *d*в – диаметр выходного сечения сопла; *h* – высота ребер (рисунок 2.4).



***Рисунок 2.4 – Схема сопла РД с ребрами на поверхности:   
а – торцевое сечение; б – боковое сечение***

**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.

**4. Задача конструкции АРС, поиск его импульса и массы..**

Конструктивная схема АРС представлена на рисунке 2.5. В зависимости от массы топлива РД определяются массогабаритные характеристики снаряда.

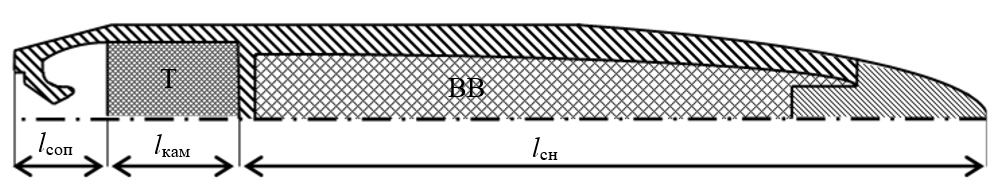


Рисунок 2.5Схема активно-реактивного снаряда:

Общая масса снаряда представляет собой сумму масс различных частей снаряда:

,

где – масса снарядной части (= 40 кг);  – масса камеры сгорания РД;  – масса топливного заряда;  – масса соплового блока;  – заглушка сопла (предотвращает попадание пороховых газов в сопло, отделяется при вылете снаряда из канала ствола).

Общая длина снаряда:

, (2.38)

где – длина снарядной части;  – длина камеры, подбирается под массу топливного заряда;  – длина соплового блока, определяется из условия:

, (26)

где – диаметр выходного сечения; – диаметр критического сечения; – длина выходной части сопла. Угол равный 12° выбран из соображения сохранения разности между диаметром критического и выходного сечения. Если угол будет больше 12 градусов, то расход энергии будет не оптимален.

Аксиальный момент инерции для осесимметричного снаряда вычисляется по следующей формуле:

, (27)

где – аксиальный момент инерции *i*-ой части снаряда.

Для вычисления экваториального момента различных частей снаряда воспользуемся теоремой Гюйгенса-Штейнера, которая гласит, что момент инерции тела *I* относительно произвольной оси равен

, (28)

где  – момента инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс;  – расстояния между осями.

Экваториальный момент вычисляется по следующей формуле:

, (29)

где  – экваториальный момент *i*-ой части снаряда относительно центра масс снаряда, вычисляемый по формуле (29);  – расстояние между центом масс *i*-ой части снаряда  и центром масс снаряда в сборе .

Положение центра масс снаряда определяется выражением:

, (30)

где  – масса *i*-ой части снаряда.

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

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

, (31)

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**

При решении задачи внутренней баллистики для получения максимальной скорости необходимо подбирать единичную скорость горения таким образом, чтобы во время горения пороха достигалась максимальное давление в стволе орудия, для штатного 152 – мм снаряда это давление равно 322 Мпа.

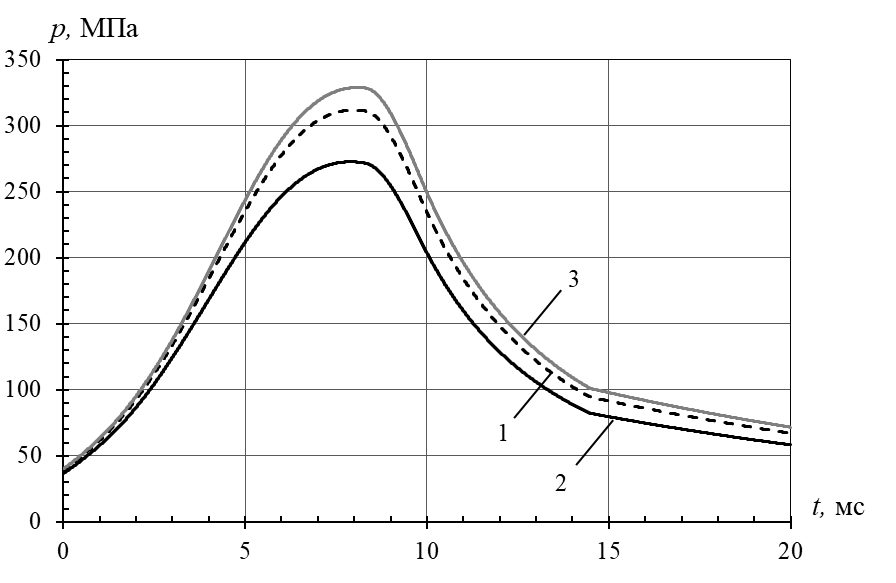


Рисунок 4.2 – Изменение давление в стволе орудия:

1 – среднее давление, 2 – давление на дно снаряда, 3 – давление на дно канала.



Рисунок 4.3 – Изменение скорости в стволе орудия:

1 – снаряд массой 55,6 кг, 2 – штатный снаряд массой 46 кг

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 1001,4 м/с до 777,1 м/с (рисунок 4.4). Для удобства дальнейших вычислений зависимость начальной скорости от массы была аппроксимирована в виде логарифмической функции .

При решении задачи внутренней баллистики были получены оптимальные параметры, приведенные в таблице 4.4:

Таблица 4.4 – Характеристики РДТТ.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозначение | Размерность | Значение |
| Давление в камере | *pk* | МПа | 4 |
| Время работы | *t* | с | 2,36 |
| Масса топлива | *m*Т | кг | 5 |
| Суммарный импульс | *I*Т | кПа | 11,56 |

Рассмотрим отличия снаряда с РДТТ и без него, для моделирования рассмотрим активно-реактивный снаряд с характеристиками, указанными в таблице 4.5 и штатный, осколочно – фугасный снаряд, с характеристиками, указанными в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – характеристики активно-реактивного снаряда.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозначение | Размерность | Значение |
| Масса | *m*Σ | кг | 55,6 |
| Дульная скорость | *v*д | м/с | 851 |
| Длина | *lΣ* | мм | 885 |

Таблица 4.6 – характеристики осколочно-фугасного снаряда.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметры | Обозначение | Размерность | Значение |
| Масса | *m*Σ | Кг | 46 |
| Дульная скорость | *v*д | м/с | 945 |
| Длина | *lΣ* | мм | 660 |

Разница между дальностью полёта осколочно-фугасного и активно-реактивного снарядов наглядно демонстрируется на следующем графике:

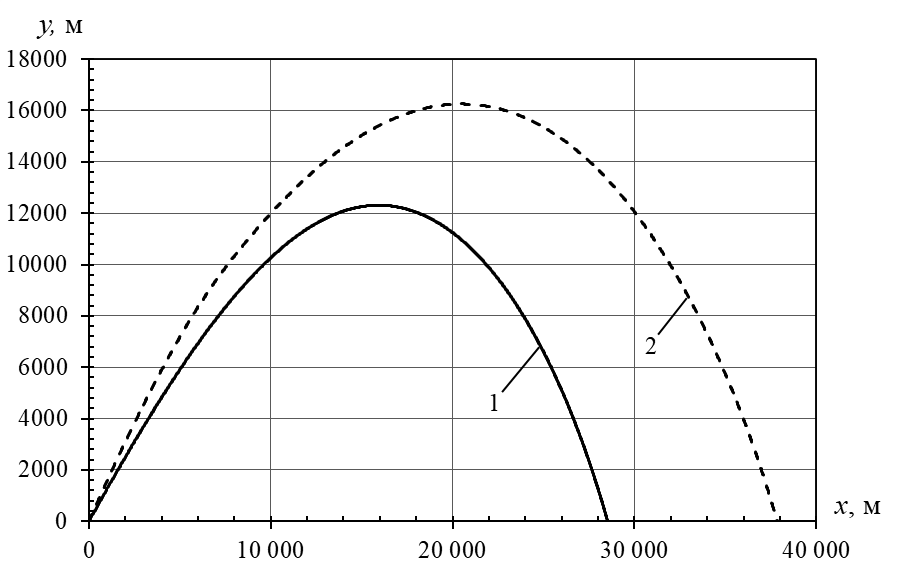


Рисунок 4.5 – Траектория полёта снаряда:

1 – осколочно-фугасный снаряд, 2 – активно-реактивный снаряд.

Аналогично рассмотрим изменение скорости снаряда во время полёта:

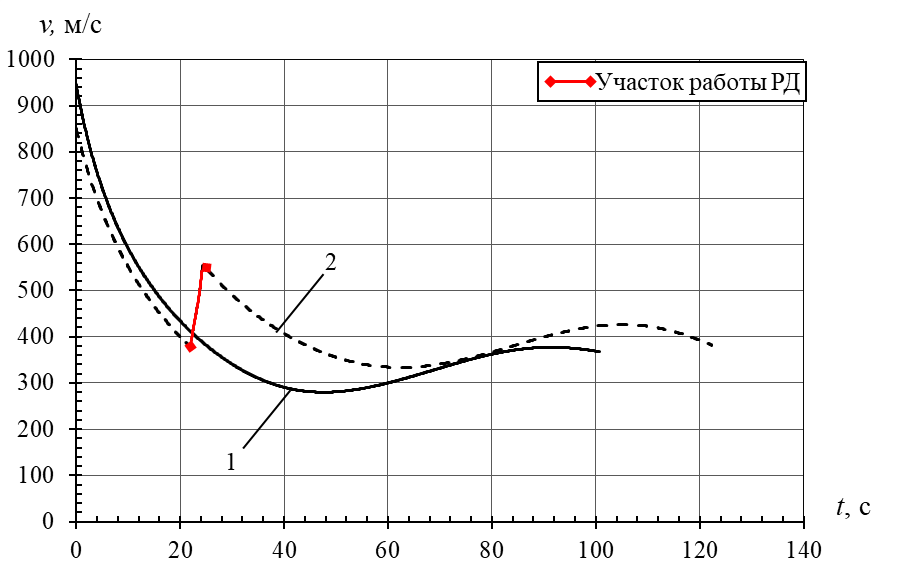


Рисунок 4.6 – Скорость снаряда на траектории:

1 – осколочно-фугасный снаряд, 2 – активно-реактивный снаряда.

Таблица 4.7 – Массогабаритные характеристики снаряда

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Масса топлива , кг | Масса снаряда, кг | Длина снаряда  , мм | Аксиальный момент инерции , кг·м² | Экваториальный момент инерции , кг·м² |
| 1,0 | 48,96 | 713 | 0,141 | 1,473 |
| 3,0 | 51,17 | 799 | 0,158 | 2,096 |
| 5,0 | 55,60 | 885 | 0,175 | 2,900 |
| 10,0 | 66,67 | 1100 | 0,218 | 5,821 |

Как видно из данных, представленных в таблице при увеличении массы реактивного топлива значительно возрастает общая длина снаряда (до 1100 мм) и экваториальный момент инерции (в 4 раза по сравнению со снарядом без реактивного двигателя). Такие изменения массогабаритных параметров активно-реактивного снаряда неизбежно сказываются на его устойчивость при движении по траектории.

Для сохранения устойчивости добавим в модель РДТТ ребра на внутренней поверхности сопла. Характеристики ребер указаны в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Параметрические характеристики ребер

|  |  |
| --- | --- |
| Характеристики | Значение |
| Высота ребер на внутренней поверхности сопла, *h* | 2,4 мм. |
| диаметр выходного сечения сопла, | 0,1 м. |
| Площадь выходного сечения сопла, | 0,00785 м² |
| Угол наклона ребер к оси снаряда, β | 15 градусов |
| Радиус расположения ребер сопла, | 0,05 м. |
| Доля тяги на вращательный момент, ν | 5% |

На рисунке 4.8 представлен график изменения критерия устойчивости активно-реактивного снаряда на траектории с вращательным моментом двигателя и без него. В литературе [41] указывают, что на практике снаряд является устойчивым при значении коэффициента устойчивости от 0,6 до 0,9. Горизонтальными красными линиями на рисунке 4.8 отмечены границы устойчивости полета снаряда: .



Рисунок 4.8 – 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 рисунке 4.4 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.



Рисунок 4.9 – Изменение угловой скорости вращения активно-реактивного снаряда

Рисунок 4.10 демонстрирует, что при моменте вращения равным 10 процентов, снаряд становится излишне стабилизированным уже на 22 секунде, что не является желательным эффектом.



Рисунок 4.10 – Изменение условия устойчивости при моменте вращения двигателя = 10%

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 4.14. На рис. 6 представлены расчетные траектории движения данного АРС.

Таблица 4.14 – Дальность полёта снаряда при различных начальных параметрах

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***t0, c*** | 5 | 41 | 20 | 22 |
| **θ0, град** | 48 | 58 | 63 | 58 |
| ***X,* м** | 35798 | 34813 | 36982 | 37923 |

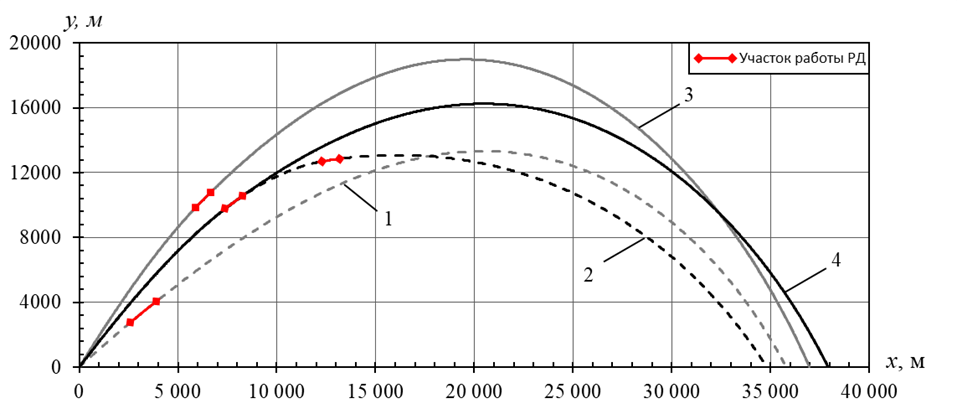


Рисунок 4.15 –Траектория полёта снаряда при различных параметрах:

1 - *t*0 = 5 с., 2 - *t*0 = 41 с., 3 - *t*0 = 20 с., 4 - *t*0 = 22 с.,

При оптимальном подборе параметров дальность стрельбы активно-реактивным снарядом удалось достичь дальности равной 37923 метров, что на 4923 метра больше, чем у штатного активно-реактивного снаряда 3ОФ30. При этом моделируемый активно-реактивный снаряд является устойчивым на всей траектории.

**Заключение**

В результате выполнения научно-исследовательской работы, выполнен следующий объем работ:

1. Изучены и представлены математические модели:

* внутренней баллистики на основе термодинамического подхода в нульмерной постановке;
* внешней баллистики активно-реактивного снаряда с учетом устойчивости на всей траектории;
* внутренней баллистики твердотопливного реактивного двигателя;
* математической постановки задачи оптимизации дальности полёта активно-реактивного снаряда;
* устойчивости снаряда за счёт вращения.

1. Представлены численные методы и разработаны алгоритмы решения задач:

* Внутренней и внешней баллистики в термодинамической постановке на основе явного метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности;
* Многомерной оптимизации на основе метода Хука-Дживса;
* Внутренней баллистики РДТТ;
* Изменения массогабаритных характеристик;
* Изменения моментов инерции в зависимости от длины и массы снаряда.

1. Создана программа для решения задачи внутренней и внешней баллистики активно-реактивного снаряда с учетом устойчивости на всей траектории.
2. Определены зависимости внутрибаллистических параметров от времени для 152 мм гаубицы. На выходе из ствола скорость снаряда составила 885 м/с. Максимальное давление на снаряд в стволе орудия составило 322 Мпа. Удалось выяснить, что при суммарной массы снаряда, за счёт увеличения массы топлива реактивного двигателя, от 40 кг до 70 кг начальная скорость изменяется от 1001,4 м/с до 777,1 м/с.
3. Решена задача внутренней баллистики РДТТ, время работы реактивного двигателя при массе топлива равной 5 кг составило 2,36 секунд, при этом суммарный импульс реактивного двигателя составил 11,56 кПа. Суммарный прирост скорости на участке работы РД составил 215 м/с. Удалось установить, что за счёт добавления в конструкцию реактивного двигателя дальность увеличилась на 31%, по сравнению со штатным осколочно-фугасным снарядом.
4. Определены моменты инерции, длина и масса снаряда в зависимости от массы топлива. Приведены оптимальных параметрические характеристики ребер на внутренней поверхности сопла, оптимальная доля тяги на вращательный момент составила 5%. При данном значении снаряд устойчив практически на всей траектории полёта;
5. Решена задача оптимизации дальности полёта осколочно-фугасного снаряда, получен оптимальный угол наклона 52°, при котором дальность будет составлять 28,5 км.
6. Решена задача оптимизации дальности полёта активно-реактивного снаряда. Найден оптимальный угол наклона орудия θ0 = 58° и время старта двигателя на траектории *t*0 = 22 с. При данных параметрах дальность полёта снаряда составила 37,9 км, что на 4,9 км больше штатного активно-реактивного снаряда 3ОФ30.

**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,*

1. *Вентцель, Д. А.* Внешняя баллистика / Д. А. Вентцель, Я. М. Шапиро. М.; Л.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1939. 251 с.
2. *Серебряков М.Е*. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз. 1962 г. 705 с.
3. *Шапиро, Я. М.* Внешняя баллистика: учебник. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1946. 408 с.
4. *Окунев, Б. Н.* Основная задача внешней баллистики и аналитические методы ее решения: монография. Л.; М.: Объединенное научно-техническое издательство (ОНТИ) ; Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. 524 с.
5. *Коновалов, А. А*. Внешняя баллистика / А. А. Коновалов, Ю. В. Николаев. М.: ЦНИИ информации, 1979. 228 с.
6. Основы экспериментальной внешней баллистики: учеб. пособие / *В. И. Биматов, Н. В. Савкина, С. В. Тимченко, В. В. Фарапонов*. Томск: STT, 2017. 122 с.
7. *Бурлов В.В*. и др. Баллистика ствольных систем. М.: Машиностроение. 2006. 461 с.
8. *Кэрт, Б. Э.* Математическое моделирование и экспериментальная отработка систем разделения реактивных снарядов / Б. Э. Кэрт, В. И. Козлов, Н. А. Макаровец ; под ред. Н. А. Макаровца. Тула; СПб.: Сплав, 2006. 652 с.
9. *Майевский, Н. В.* Курс внешней баллистики. СПб.: Тип-я импер. акад. наук., 1870. 772 с.
10. *Дмитриевский, А.А., Лысенко, Л.Н.* Внешняя баллистика, – Москва: издательство «Машиностроение». 1972. С. 584.
11. Mvuisi Humphrey Tshokotsha, Internal Ballistic Modelling of Solid Rocket Motors Using Level Set Methods for Simulating Grain Burnback, Serbia, Stellenbosch University, 125 p.
12. Modeling and Numerical Simulation of Solid Rocket Motors Internal Ballistics, Ing Enrico Cavallini, degree of doctor of Philosophy, Sapienza Universita di Roma, 203 p.
13. Расчет процессов внутренней баллистики РДТТ с учетом поля ускорений / *В. А. Дунаев, И. В. Дунаева, О. А. Евланова* [и др.] // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC-2011) – Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2011. – С. 123-127.
14. *Липанов, А. М.* Одномерные уравнения внутренней баллистики РДТТ в полных производных и граничные условия для них / *А. М. Липанов* // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 557-568.
15. Совершенствование метода прогнозирования внутрибаллистических параметров РДТТ / *Ю. М. Милехин, С. А. Гусев, В. Н. Эйхенвальд, Н. П. Гордиенко* // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (icoc'2014), Москва, 24–26 сентября 2014 года. – Москва: Институт механики Уральского отделения РАН, 2014. – С. 237-239.
16. *Кирюшкин, А. Е*. Численный алгоритм решения задачи внутренней баллистики РДТТ с учетом подвижной поверхности горящего топлива / А. Е. Кирюшкин, Л. Л. Миньков // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2017): Сборник трудов Девятой Всероссийской конференции, Москва, 10–12 октября 2017 года. – Москва: Институт механики Уральского отделения РАН, 2017. – С. 92-106.
17. Внутренняя баллистика РДТТ / А. В. Алиев, Г. Н. Амарантов, В. Ф. Ахмадеев [и др.]. – Москва: Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2007. – 504 с.
18. *Мищенкова О.В.* Выбор параметров твердотопливного двигателя при оптимизации траектории полета ракеты // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. №3(71). 2016. С. 74-77.
19. *Липанов А.М., Алиев А.В*. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива: Учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1995. – 400 с.: ил.
20. Rocki-motor // – URL: http://kia-soft.narod.ru/soft/rpro/rpro.htm (дата обращения: 29.05.2023).
21. *Мищенкова О.В.* Выбор параметров твердотопливного двигателя при оптимизации траектории полета ракеты // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. №3(71). 2016. С. 74-77.
22. Arkhipov V., Perfilieva K. Optimization of construction of the rocket-assisted projectile // MATEC Web of Conferences Сер. "International Youth Scientific Conference "Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment", HMTTSC 2017". 2017. С. 01003.
23. *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.
24. Новый рекорд дальности стрельбы ствольной артиллерии // Военное обозрение – URL: https://topwar.ru/164952.html (дата обращения 31.10.2022)
25. *Розанов, Л. А.* Концепция 152-мм дальнобойного управляемого артиллерийского снаряда (ДУАС) / Л. А. Розанов, В. Е. Смирнов // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. – 2015. – № 1(6). – С. 83-95.
26. *Кэрт, Б. Э*. Расчет баллистического функционирования кассетного снаряда повышенной дальности с устройством доразгона на траектории / Б. Э. Кэрт, А. В. Панченко // Наука Промышленность Оборона: Труды XX Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения с. А. Чаплыгина: в 4 томах, Новосибирск, 17–19 апреля 2019 года / Редактор С.Д. Саленко. Том 2. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. – С. 152-156.
27. *Розанов, Л. А.* Сравнительный анализ методик расчета характеристик рассеивания активно-реактивного снаряда / Л. А. Розанов, А. В. Фомичев, В. Е. Смирнов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2018. – № 3(103). – С. 103-109.
28. Способы увеличения дальности боевого применения снарядов / *Е. Я. Брагунцов, И. И. Жаровцев, В. И. Звегинцев, А. А. Нестерова* // Наука Промышленность Оборона: Труды XXII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию со дня первого полёта человека в космос. В 4-х томах, Новосибирск, 21–23 апреля 2021 года / Под редакцией С.Д. Саленко. Том 2. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 176-182.
29. Siva Krishna Reddy, Computing the Trajectory of an artillery shell using six degrees of freedom model, SRM Institute of Science and Technology, India, 2019, 42 p.
30. Marcus Thuresson, Development and evalition of a six degrees of freedom model of a 155 mm artillery projectile, Sweden, Royal Institute of Technology, 2015, 56 p,
31. *Шалыгин, А. С.* Прикладные методы статистического моделирования / А. С. Шалыгин, Ю. И. Палагин. Л. : Машиностроение, 1986. 320 с. 177.
32. *Ермаков, С. М.* Статистическое моделирование / С. М. Ермаков, Г. А. Михайлов. М. : Наука, 1982. 296 с.
33. Способ Увеличения Дальности Полета Артиллерийского Снаряда *Ветров В.В., Костяной Е.М., Дикшев А.И*. Патент на изобретение RU 2522699 C1, 20.07.2014. Заявка № 2012152897/11 от 10.12.2012.
34. Баллистика ракетного и ствольного оружия: учебник для вузов / под ред. *А. А. Королева, В. А. Комочкова*; науч. конс. *В. А. Шурыгин*. – Волгоград, 2010.472 с.
35. *Королев С.А., Карсканов С.А*. Математическое моделирование обтекания тела вращения сверхзвуковым потоком газа // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2014. № 3. С. 123-133.
36. *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. 456 с.
37. *Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В.З.* Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. – 256 с.
38. *А.Н. Ищенко, В.З. Касимов, А.С. Дьячковский, А.И. Зыкова, Н.М. Саморокова*. О Влиянии начальной температуры заряда на баллистические характеристики выстрела // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики, сборник трудов Х всероссийской научной конференции, посвященной 140-летию ТГУ и 50-летию НИИ ПММ ТГУ. 2018. С 41-43.
39. *Липанов А.М., Вагин А.В., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г*. Моделирование различных стадий процесса выстрела и полигонных испытаний артиллерийских систем // В сборнике: Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2014). 2014. С. 194-212.
40. *Королев С.А., Мансуров Р.Р.* Исследование дальности стрельбы активно-реактивным снарядом // В сборнике: I Липановские научные чтения. Материалы региональной научной конференции. Ижевск, 2021. С. 71-77.
41. *Балаганский И.А.* Основы баллистики и аэродинамики: учебное пособие / И.А. Балаганский. *–* Новосибирск *:* Изд-во НГТУ, 2017. – 200с.