

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАЕКТОРИИ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ БОЕПРИПАСОВ С ГЕРОНТОЛОГИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПОРОХА ПРИ СТРЕЛЬБЕ ИЗ СТВОЛА С ИЗНОСОМ

Значительные сроки хранения артиллерийских боеприпасов в условиях арсеналов и баз приводят к постепенному изменению физико-химических свойств их пороховых метательных зарядов, что обуславливает трансформацию баллистических характеристик, в частности начальной скорости снаряда [1].

Анализ результатов исследования живучести нарезных и гладких стволов при использовании боеприпасов послегарантийных сроков хранения [2] показал, что при снижении начальной скорости артиллерийского снаряда, обусловленной взаимным действием износа орудийного ствола и геронтологическими изменениями порохового метательного заряда, при отсутствии радиолокационных средств измерения начальной скорости снаряда, в приборы управления стрельбой артиллерийского комплекса рекомендуется вводить дополнительную поправку, которая названа «интегральной». Ее значение предложено находить с использованием аппарата поправочных формул [1] внешней баллистики. В работах [2, 3] нет оценок изменения элементов траекторий боеприпаса с геронтологическими изменениями без введения «интегральной» поправки и не формализована операция ее нахождения.

Целью исследования является разработка методики оценки элементов траектории артиллерийских боеприпасов с геронтологическими изменениями порохового метательного заряда при стрельбе из ствола с заданной степенью износа для введения поправки в исходные данные при стрельбе. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд взаимосвязанных задач:

- оценить элементы траектории полета снаряда при снижении его начальной скорости;
- последовательность анализа траекторий и разработать способ интерполирования точек траектории полета по найденным характеристическим точкам;
- формализовать процедуру выработки «корректирующей» поправки в угол вертикального и горизонтального наведения орудия.

Оценка элементов траектории. При оценках внешнебаллистической траекторий снаряда в качестве ее элементов будем понимать следующие восемь величин разделенных по двум группам:

элементы точки падения

- полная горизонтальная дальность (ПГД, X_{np});
- угол падения снаряда (θ_c);
- время полета (τ);
- скорость снаряда в точке падения (v_c);
- деривация (Z);
- угол деривации (β_0);

элементы вершины

- абсцисса вершины траектории (x_s);
- высота траектории (Y).

Оценку элементов траектории следует начать с определения исходных данных, характеризующих орудие, снаряд и метеорологические условия стрельбы.

При решении основной задачи баллистики артиллерийская установка формально описывается двумя переменными:

- калибром орудия (d);
 - углом бросания снаряда (θ_0).
- Совокупность параметров выстреливаемого снаряда объединяет три переменные:
- массу артиллерийского снаряда (q);
 - коэффициент формы снаряда (i);
 - начальную скорость снаряда (v_0).

Метеорологические условия при стрельбе задаются в виде отношения:

- нормальной плотности воздуха (P_{ON}) равной $1,206 \text{ кг/м}^3$;
- плотности воздуха (P_O) в плоскости горизонта орудия, кг/м^3 .

На первом этапе определим баллистический коэффициент (c) артиллерийского снаряда. Эту оценку выполним на основе соотношения:

$$c = 1000 i \frac{d^2}{q} \cdot \frac{\Pi_O}{\Pi_{ON}},$$

где i – коэффициент аэродинамической формы артиллерийского снаряда; d – калибр снаряда; q – масса снаряда; $\frac{\Pi_O}{\Pi_{ON}}$ – метеорологические условия при стрельбе.

Следует отметить, что понятие баллистического коэффициента (ballistic coefficient – BC) в «западном» понимании отлично от понятия, используемого в русской (советской) школах внешней баллистики:

$$BC = \frac{q}{i \cdot d^2}.$$

Однако как для баллистического коэффициента, выраженного в форме c , так и для коэффициента BC , могут использоваться два подхода в его определении. Для первого характерно принятие допущения о постоянстве их значений с учетом всех возможных вариантов стрельбы. Второй подход к его рассмотрению предполагает, что в первом приближении он является сложной функцией скорости снаряда, угла бросания снаряда. Такое поведение баллистического коэффициента обусловлено тем, что в его состав входит коэффициент аэродинамической формы снаряда (i) (в англоязычной литературе «форм-фактор»), который кроме перечисленных факторов еще зависит от вида закона изменения лобового сопротивления эталонного снаряда. В общем виде коэффициент аэродинамической формы снаряда определяется как

$$i = \frac{C_x \left(\frac{v}{a} \right)}{C_{x \text{ эт}} \left(\frac{v}{a} \right)},$$

где $C_x \left(\frac{v}{a} \right)$ – коэффициенты лобового сопротивления исследуемого и эталонного снарядов; v – скорость снаряда относительно воздуха в рассматриваемой точке траектории полета; a – скорость звука.

Для закона сопротивления Ф. Сиаччи коэффициент аэродинамической формы снаряда (i) может быть приближенно определен по графику зависимости $i = f \left(H d^{-1} \right)$ [4], H – длина оживальной части снаряда, d – его диаметр (калибр). Аппроксимируя эту зависимость полиномом пятого порядка, получим выражение следующего вида:

$$i = c_1 \left(\frac{H}{d} \right)^5 + c_2 \left(\frac{H}{d} \right)^4 + c_3 \left(\frac{H}{d} \right)^3 + c_4 \left(\frac{H}{d} \right)^2 + c_5 \left(\frac{H}{d} \right) + c_6.$$

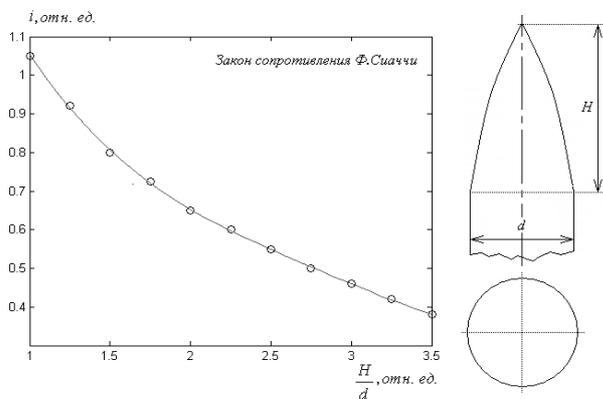


Рисунок 1 – Определение коэффициента аэродинамической формы снаряда

$$c_1 = 0,0049231; c_2 = -0,043823; \\ c_3 = 0,097576; c_4 = 0,16973; c_5 = -1,0858; \\ c_6 = 1,9086.$$

Графическая интерпретация приближенно определения коэффициента (i) приведена на рис. 1.

В действительности коэффициент (i) находится в нелинейной зависимости от угла бросания. Так, например, для начальной скорости $v_o = 792,5$ м/с 120-мм фугасный снаряд обр. 1911 г. имеет зависимость $i = f(\theta_o)$, представленную на рис. 2 [5].

$$i = k_1 \theta_o^3 + k_2 \theta_o^2 + k_3 \theta_o + k_4,$$

$$k_1 = -6,25 \cdot 10^{-7}; k_2 = 8,6384 \cdot 10^{-5}; k_3 = -0,0028147; k_4 = 0,69215$$

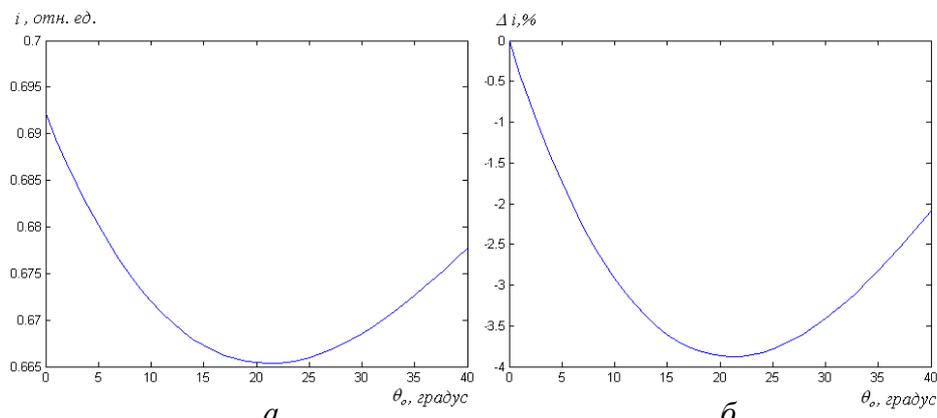


Рисунок 2 – Изменение коэффициента аэродинамической формы артиллерийского снаряда в зависимости от θ_o в диапазоне изменения 0–40 градусов:

a – изменение в абсолютных единицах; *б* – изменение в процентах от максимального значения

Графики рис. 2 *a*, *б* показывают, что с увеличением θ_o в диапазоне 0–22 градуса коэффициент аэродинамической формы артиллерийского снаряда уменьшается от его максимального значения для рассматриваемого изделия 0,693 до 0,666, т.е. фиксируется снижение приблизительно на 3,7 %. Далее по мере увеличения θ_o наблюдается обратный процесс увеличения коэффициента (*i*). Анализ динамики изменения коэффициента (*i*) показывает, что его снижение в диапазоне 0–22 градуса более происходит более интенсивно, чем увеличение в диапазоне 22–40 градусов.

Далее будем предполагать, что в результате проведения опытных стрельб коэффициент формы исследуемого артиллерийского снаряда известен, а его зависимостью от угла бросания незначительна и ею можно пренебречь.

Оценка элементов точки падения. Основным элементом траектории снаряда является ПГД *X*. При ее приближенном определении полагаем, что главный коэффициент Ф. Сиаиччи β равен 1, а приведенный баллистический коэффициент $c' = c$. При этих условиях вычислим значение вспомогательной функции

$$f_o \text{ расч} = c \sin(2\theta_o).$$

По величинам $f_o \text{ расч}$ и v_o на основе таблиц $f_o(v_o, c'x)$ оценим значение $c'x$ путем последовательного выполнения операции интерполирования.

Вспомогательная функция $f_o(v_o, c'x)$ представляет собой таблично заданные значения (матрицу) от аргумента v_o в промежутке $v_{o \min} - v_{o \max}$ и $c'x$ в промежутке $c'x_{\min} - c'x_{\max}$. В общем случае дискретность их изменений в таблице не одинаковы, то есть $\Delta v_o \neq \Delta c'x$.

На первом шаге таблично заданную функцию $f_o(v_o, c'x)$ интерполируем в промежутке $c'x_{\min} - c'x_{\max}$ при заданном значении $v_o = \text{const}$. На втором шаге производим поиск значения $c'x$ функции $f_o(v_o, c'x)$ при котором функционал

$$\left[f_o \text{ расч} - f_o(v_o, c'x) \Big|_{v_o = \text{const}} \right]^2 \rightarrow \min.$$

достигает минимального значения. В результате оптимизации находим значение $c'x$, на основе которого приближенное значение ПГД равно

$$X_{np} = \frac{c'x}{c}.$$

Далее на основе найденного значения X_{np} и по величине угла бросания (θ_0) оцениваем главный коэффициент Φ . Сиаичи (β). Эту операцию выполняем с использованием таблицы $\beta(x, \theta_0)$. В случае выполнения равенства $\beta=1$ имеем $c' = c$ и $x = X_{np}$. Если $\beta \neq 1$, то производим определение приведенного баллистического коэффициента $c' = c\beta$.

Установив значение $c'x$ по таблице вспомогательной функции Φ . Сиаичи $\lg f_2(v_0, c'x)$, находим величину угла падения снаряда

$$f_2(v_0, c'x) = -\frac{\operatorname{tg}(\theta_c)}{\operatorname{tg}(\theta_0)} \quad \text{или} \quad f_2(v_0, c'x) = \left| \frac{\operatorname{tg}(\theta_c)}{\operatorname{tg}(\theta_0)} \right|,$$

$$\theta_c = \operatorname{arctg}(f_2(v_0, c'x) \cdot \operatorname{tg}(\theta_0)).$$

Аналогично операциям, описанным выше, таблично определим значения еще четырех вспомогательных функций Φ . Сиаичи $\lg f_3(v_0, c'x)$, $\lg f_4(v_0, c'x)$, $\lg f_5(v_0, c'x)$, $\lg f_6(v_0, c'x)$ и далее, преобразуем их значения

$$f_n(v_0, c'x) = 10^{\lg f_n(v_0, c'x)},$$

найдя $f_3(v_0, c'x)$, $f_4(v_0, c'x)$, $f_5(v_0, c'x)$, $f_6(v_0, c'x)$. Переменная n в приведенной зависимости определяет номер функции Φ . Сиаичи. Ее значение является целым числом, варьируемым в интервале от 3 до 6.

На основе определенных с использованием вспомогательных функций значений f_3 , f_4 , f_5 , f_6 определим четыре оставшихся элемента траектории снаряда. Время полета оценим по формуле

$$\tau = \frac{1}{f_3} v_0 \sin \theta_0.$$

Скорость снаряда в точке падения

$$v_c = \frac{1}{f_4} v_0 \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta_c}.$$

Вращательное движение снаряда, использующееся для стабилизации положения его оси относительно касательной к траектории центра масс, вызывает боковое отклонение центра масс, величина которого Z называется деривацией. При правой нарезке деривация положительна. В точке падения деривация, измеряемая в метрах, может быть оценена по формуле В.Н. Першина и по приближенной зависимости.

Формула В.Н. Першина имеет вид

$$Z = 5,18 \cdot 4,975 \cdot \frac{\mu}{\eta} \frac{v_0 d^{1,2}}{l} \frac{1}{v_0} f(v_0) \tau^2,$$

где μ – коэффициент инерции снаряда, характеризующий распределение массы снаряда относительно оси; d – калибр снаряда, м; η – длина хода нарезов ствола в калибрах; l – длина снаряда в калибрах.

Табулированные значения функции $f(v_0)$ приведены в [4]. В табл. 1. собраны значения функции $f(v_0)$ в диапазоне начальных скоростей 500–1500 м/с, которые могут быть аппроксимированы следующим полиномом:

$$f(v_0) = c_1(v_0)^5 + c_2(v_0)^4 + c_3(v_0)^3 + c_4(v_0)^2 + c_5(v_0) + c_6,$$

$$c_1 = -3,2051 \cdot 10^{-16}, c_2 = 2,9138 \cdot 10^{-12}, c_3 = -8,428 \cdot 10^{-9}, c_4 = 9,8689 \cdot 10^{-6}, c_5 = -0,0036808, c_6 = 1,3944$$

Таблиця 1 – Значение функции $f(v_o)$ для формулы оценки величины деривации В.Н. Першина

v_o	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$f(v_o)$	1,14	1,27	1,41	1,54	1,65	1,75	1,82	1,87	1,9	1,93	1,95

Приближенная зависимость формульно выражается следующим образом

$$Z = A \frac{v_o}{\eta} \tau^2 \cos \theta_o,$$

где A – опытный коэффициент для артиллерийского снаряда определенной формы, среднее значение A для снарядов морской артиллерии равно 0,0045; η – длина хода нарезов ствола в калибрах.

Угол деривации, рассчитывается по формуле

$$\beta_o = \arctg\left(\frac{Z}{X}\right).$$

Оценка элементов вершины траектории. Абсцисса вершины траектории находим из соотношения

$$x_s = f_5 X.$$

Высота траектории находим из соотношения

$$Y = f_6 X \operatorname{tg} \theta_o.$$

В результате для сформулированных ранее исходных данных имеем координаты трех характеристических точек траектории полета снаряда (OX – ось горизонтальной дальности, OY – ось высоты траектории):

- точки вылета снаряда с координатами (0; 0);
- точки с максимальной высотой траектории (x_s ; Y);
- точки падения снаряда (X ; 0).

Знание величины деривации позволяет перейти от двумерных координат к трехмерным (OX – ось горизонтальной дальности, OY – ось высоты траектории, OZ – ось боковых отклонений за счет деривации артиллерийского снаряда):

- точки вылета снаряда с координатами (0; 0; 0);
- точки с максимальной высотой траектории (x_s ; Y ; $\operatorname{tg}(\beta_o) x_s$);
- точки падения снаряда (X ; 0; Z).

Выработка «корректирующей» поправки в угол вертикального наведения орудия. Угол вертикального наведения орудия ($\theta_{\text{комп}}$) компенсирующий уменьшение начальной скорости снаряда $v_\phi < v_o$

определяется из соотношения

$$\theta_{\text{комп}} = \frac{1}{2} \left| \arcsin \left(\frac{f_o(v_\phi, c'x_{\text{расч}})}{1000 i \frac{d^2}{q} \frac{\Pi_O}{\Pi_{ON}}} \right) \right|,$$

где $c'x_{\text{расч}}$ – значение $c'x$, используемый при уравнивании $f_o_{\text{расч}} = f_o(v_o, c'x)$.

«Корректирующая» поправка в угол вертикального наведения орудия

$$\Delta \theta_{\text{вн}} = \theta_{\text{комп}} - \theta_o,$$

где θ_0 – угол бросания снаряда, соответствующий стрельбе боеприпасом с уменьшенной начальной скоростью снаряда $v_\phi < v_0$.

Выработка «корректирующей» поправки в угол горизонтального наведения орудия. Выработка «корректирующей» поправки в угол горизонтального наведения орудия учитывает явление деривации артиллерийского снаряда стабилизируемого в полете вращением.

Корректирующий угол горизонтального наведения на деривацию может быть рассчитан по формуле

$$\beta_0 = \arctg \left(\frac{Z_\phi}{X_\phi} \right),$$

где Z_ϕ – величина фактической деривации в точке падения снаряда; X_ϕ – величина фактической ПГД.

В этих условиях корректирующая поправка в угол горизонтального наведения учитывает разницу между табличной и уменьшившейся фактической скоростями снаряда.

Анализ траектории полета артиллерийского снаряда при геронтологических изменениях пороха и износе ствола и их визуализация. С целью проверки работоспособности разработанной методики и последовательности проведения анализа траекторий снаряда с учетом физико-химических изменений в порохе и с учетом износа ствола произведем оценку элементов траектории стрельбы артиллерийской установкой со следующими исходными данными:

- калибр орудия $76,2 \cdot 10^{-3}$ м;
- масса артиллерийского снаряда 5,9 кг;
- коэффициент формы снаряда для эталонного снаряда Φ . Сиаччи с использованием закона сопротивления Φ . Сиаччи 0,6;
- начальная скорость снаряда 980 м/с;
- угол бросания 20° .

Оценочные данные о величинах элементов точки падения и вершины траектории сведены в табл. 2. Изменение, вызванные геронтологией пороха и износом ствола учитываются за счет снижения начальной скорости боеприпаса на 0, 2, 4, 6, 8, 10 процентов от начальной скорости 980 м/с, которая принята за 100 % (табл. 3).

Таблица 2 – Оценка элементов точки падения и вершины траектории

v_0 , м/с	Δv_0 , %	X_{np} , м	θ_c , °	τ , с	v_c , м/с	Z , м	β_0 , °	x_s , м	Y , м
980,0	0	11316	40,52	34,85	256,3	179,76	0,91	6852,5	1717,9

Таблица 3 – Оценка значений элементов точки падения и вершины траектории при уменьшении v_0

v_0 , м/с	Δv_0 , %	X_{np} , %	θ_c , %	τ , %	v_c , %	Z , %	β_0 , %	x_s , %	Y , %
980,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
960,4	-2	-1,51	-0,84	-0,98	-0,27	-3,93	-2,20	-1,62	-2,01
940,8	-4	-3,03	-1,70	-1,95	-0,55	-7,70	-4,40	-3,26	-4,03
921,2	-6	-4,55	-2,57	-2,75	-0,78	-11,07	-6,59	-4,97	-6,14
901,6	-8	-6,01	-3,48	-3,59	-1,01	-14,54	-8,79	-6,67	-8,23
882,0	-10	-7,48	-4,37	-4,50	-1,26	-17,93	-10,99	-8,39	-10,27

Примечание: знак минус свидетельствует об уменьшении абсолютного значения

Графическое представление данных табл. 3 представлено на рис. 3. При падении начальной скорости снаряда, являющегося следствием старения пороха и износа канала ствола имеет место уменьшение абсолютных значений всех элементов траектории (рис. 3а). В наименьшей мере эти изменения затрагивают скорость снаряда в точке падения, в наибольшей – величину деривации. Максимальные по модулю значения элементов траектории ранжированные по их возрастанию представлены в рис. 3б изменения

Сравнительный анализ таких элементов траектории как ПГД, деривация, вершина траектории и абсцисса вершины траектории при уменьшении начальной скорости боеприпаса приведены в табл. 4.

Анализ данных таблицы позволяет утверждать, что для принятых исходных данных соотношение деривации к ПГД составляет 1,41–1,59 %, высота траектории к ПГД – 14,7–15,2 %.

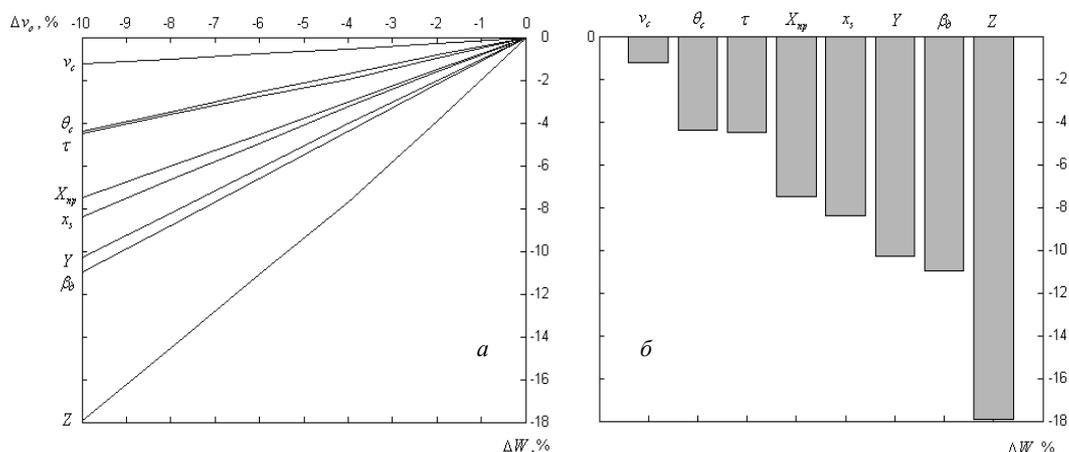


Рисунок 3 – Изменение значений элементов траектории при уменьшении начальной скорости снаряда

Визуализация результатов. С использованием трех характеристических точек траектории (на плоскости или в пространстве) получим две кусочные полинома, которые интерполируем кубическими сплайнами (кубическими полиномами Ш. Эрмита).

Выбор кусочных полиномов определен тем, что они строятся с соблюдением двух условий:

- значения кусочных полиномов совпадают со значениями интерполируемой ими функции в узлах;
- значения первых производных полиномов в узлах совпадают со значениями первых производных в узлах интерполируемой функции.

Практическая реализация такого подхода показала, что кусочные кубические полиномы Ш. Эрмита дают большее приближение к параболическим кривым (для трех рассчитанных характеристических точек) по сравнению с гладким кубическим сплайном. Результаты расчета характеристических точек траектории и их интерполяция приведены на рис. 4.

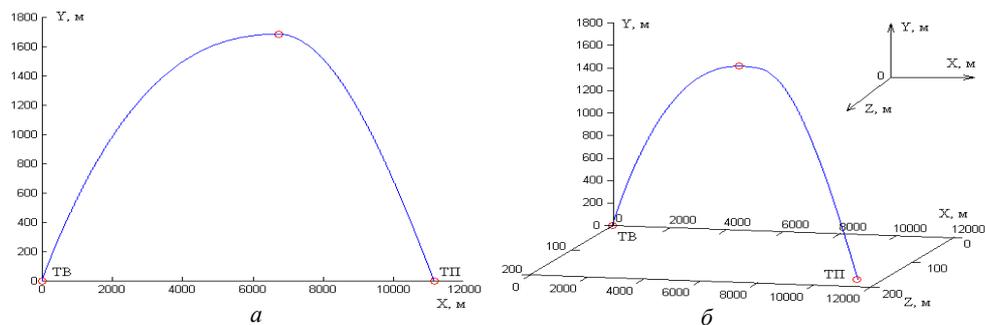


Рисунок 4 – Визуализация результатов расчета траекторий полета артиллерийского снаряда по характеристическим точкам с использованием интерполяции промежуточных значений кубическими полиномами Ш. Эрмита

a – траектория полета снаряда на плоскости; *b* – траектория полета снаряда в пространстве; ТВ – точка вылета; ТП – точка падения

Выводы

1. Разработана методика оценки элементов траектории артиллерийских боеприпасов с геронтологическими изменениями пороха при стрельбе из ствола с износом.
2. Формализованы алгоритмы выработки «корректирующей» поправки в углы вертикального (горизонтального) наведения орудия, учитывающие падение начальной скорости снаряда.
3. Для визуализации траектории артиллерийского снаряда (на плоскости, в пространстве) предложено использовать кубические сплайны (кубические полиномы Ш. Эрмита).

Литература

1. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. – Харьков.: Изд-во академии внутр. войск МВД Украины, 2010. – 130 с.
2. Анипко О.Б., Гончаренко П.Д., Хайков В.Л. Живучесть нарезных и гладких стволов при использовании боеприпасов послегарантийных сроков хранения. Учебное пособие. – Севастополь: Изд-во академии военно-морских сил им. П.С. Нахимова, 2012. – 208 с.
3. Гончаренко П.Д. Интегральная поправка в начальную скорость на износ ствола и геронтологические изменения порохового заряда// Збірник наукових праць Академії військово-морських сил ім. П.С. Нахімова, Випуск 1(5), 2011. с 11–14.
4. Справочник по стрельбе береговой артиллерии ВМФ. – М.: Воениздат, 1977. – 351 с.
5. Юркевич Б.И. Теория стрельбы береговой артиллерии. Часть 1. –М.: Воениздат, 1955. – 372 с.

Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Busyak Yu.M. Vnutrennyaya ballistika stvolnykh sistem pri primeneniі boeprіpasov dlіtelnykh strokov hraneniya. – Harkov.: Izd-vo akademii vnutr. voysk MVD Ukrainyi, 2010. – 130 p.
2. Anipko O.B., Goncharenko P.D., Khaikov V.L. Zhivuchest nareznykh i gladkiy stvolov pri ispolzovanii boeprіpasov poslegarantiynykh strokov hraneniya. Uchebnoe posobie. – Sevastopol: Izd-vo akademii voennomorskikh sil im. P.S. Nahimova, 2012. – 208 p.
3. Goncharenko P.D. Integralnaya popravka v nachalnuyu skorost na iznos stvola i gerontologicheskie izmeneniya porohovogo zaryada Zbirnik naukovih prats Akademiі viyskovo-morskikh sil im. P.S. Nahimova, Vipusk 1(5), 2011. p 11–14.
4. Spravochnik po strelbe beregovoy artillerii VMF. – M.: Voenizdat, 1977. – 351 p.
5. Yurkevich B.I. Teoriya strelby beregovoy artillerii. Chast 1. –M.: Voenizdat, 1955. – 372 p.

УДК 623.451.4

Аніпко О.Б., Хайков В.Л.

**МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕЛЕМЕНТІВ ТРАЄКТОРІЇ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ З
ГЕРОНТОЛОГІЧНИМИ ЗМІНАМИ ПОРОХУ ПРИ СТРІЛЬБІ З СТВОЛА З ІЗНОСОМ**

Розроблено методика оцінки елементів траєкторії артилерійських боеприпасів тривалих термінів зберігання з урахуванням процесів фізичного старіння вибухових речовин та зносу ствола артилерійської установки

Anipko O.B., Khaikov V.L.

**METHOD TRAJECTORY ELEMENTS ASSESSMENT FOR ARTILLERY AMMUNITION WITH
AGED GUNPOWDER FIRED FROM A WEAR GUN BARREL**

The technique trajectory elements assessment for artillery ammunition with aged gunpowder and gun barrel wear was developed.