

УДК 623.451.4

Анипко О.Б., Хайков В.Л.

**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 formalизована 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 траектории 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 ( $\theta_c$ );
- время полета ( $\tau$ );
- скорость снаряда в точке падения ( $v_c$ );
- деривация ( $Z$ );
- угол деривации ( $\beta_0$ );

*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 ( $\theta_o$ ).

Совокупность параметров выстреливаемого снаряда объединяет три переменные:

- массу артиллерийского снаряда ( $q$ );
- коэффициент формы снаряда ( $i$ );
- начальную скорость снаряда ( $v_o$ ).

Метеорологические условия при стрельбе задаются в виде отношения:

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

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

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

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

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

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  $i = f(H/d)$  [4],  $H$  – длина оживальной части снаряда,  $d$  – его диаметр (калибр). Аппроксимируя эту зависимость полиномом пятого порядка, получим выражение следующего вида:

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

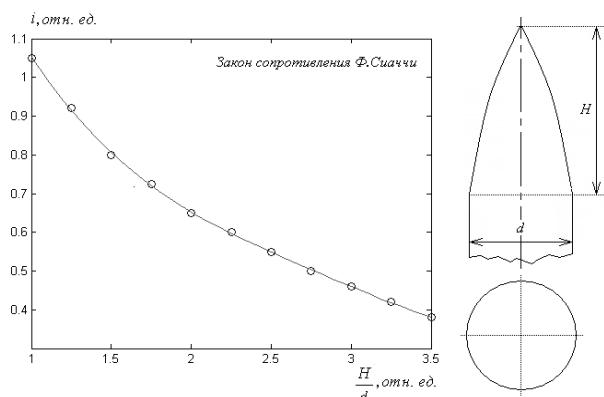


Рисунок 1 – Определение коэффициента аэродинамической формы снаряда

$$\begin{aligned} c_1 &= 0,0049231; c_2 = -0,043823; \\ c_3 &= 0,097576; c_4 = 0,16973; c_5 = -1,0858; \\ c_6 &= 1,9086. \end{aligned}$$

Графическая интерпретация приближенного 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].

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

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

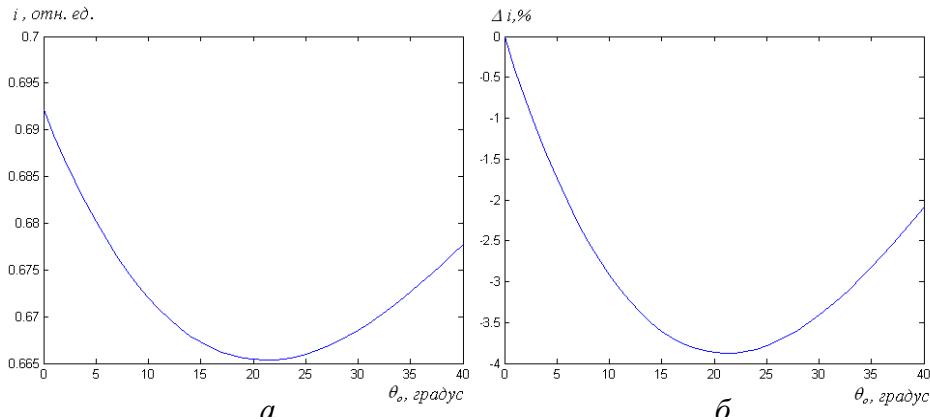


Рисунок 2 – Изменение коэффициента аэродинамической формы артиллерийского

снаряда в зависимости от  $\theta_o$  в диапазоне изменения 0–40 градусов:

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

Графики рис. 2 *а*, *б* показывают, что с увеличением  $\theta_o$  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  $\theta_o$  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  $\Phi$ . Сиаччи  $\beta$  равен 1, а приведенный баллистический коэффициент  $c' = c$ . При этих условиях вычислим значение вспомогательной функции

$$f_{o\,расч} = c \sin(2\theta_o).$$

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

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  $v_o = const$ . На втором шаге производим поиск значения  $c'x$  функции  $f_o(v_o, c'x)$  при котором функционал

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

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 ( $\theta_o$ ) оцениваем главный коэффициент  $\Phi$ . Сиаччи ( $\beta$ ). Этую операцию выполняем с использованием таблицы  $\beta(x, \theta_o)$ . 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  $\Phi$ . Сиаччи  $\lg f_2(v_o, c'x)$ , находим величину угла падения снаряда

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

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

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

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

найдя  $f_3(v_o, c'x)$ ,  $f_4(v_o, c'x)$ ,  $f_5(v_o, c'x)$ ,  $f_6(v_o, c'x)$ . Переменная  $n$  в приведенной зависимости определяет номер функции  $\Phi$ . Сиаччи. 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

$$\tau = \frac{1}{f_3} v_o \sin \theta_o .$$

Скорость снаряда в точке падения

$$v_c = \frac{1}{f_4} v_o \frac{\cos \theta_o}{\cos \theta_c} .$$

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

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

где  $\mu$  – коэффициент инерции снаряда, характеризующий распределение массы снаряда относительно оси;  $d$  – калибр снаряда, м;  $\eta$  – длина хода нарезов ствола в калибрах;  $l$  – длина снаряда в калибрах.

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

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

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

Таблица 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;  $\eta$  – длина хода нарезов ствола в калибрах.

Угол деривации, рассчитывается по формуле

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

**Оценка элементов вершины траектории.** Абсцисса вершины траектории находим из соотношения

$$x_s = f_5 \cdot X.$$

Высота траектории находим из соотношения

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

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 ( $\theta_{комп}$ ) компенсирующий уменьшение начальной скорости снаряда  $v_\phi < v_o$

определяется из соотношения

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

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

«Корректирующая» поправка в угол вертикального наведения орудия

$$\Delta \theta_{bh} = \theta_{комп} - \theta_o,$$

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

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

**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

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

где  $Z_\phi$  – величина фактической деривации в точке падения снаряда;  $X_\phi$  – 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 Ф. Сиаччи с использованием закона сопротивления Ф. Сиаччи 0,6;
- начальная скорость снаряда 980 м/с;
- угол бросания  $20^\circ$ .

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

$v_o$ , м/с	$\Delta v_o$ , %	$X_{np}$ , м	$\theta_c$ , °	$\tau$ , с	$v_c$ , м/с	$Z$ , м	$\beta_o$ , °	$x_s$ , 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  $v_o$

$v_o$ , м/с	$\Delta v_o$ , %	$X_{np}$ , %	$\theta_c$ , %	$\tau$ , %	$v_c$ , %	$Z$ , %	$\beta_o$ , %	$x_s$ , %	$Y$ , %
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. 3a). 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 %.

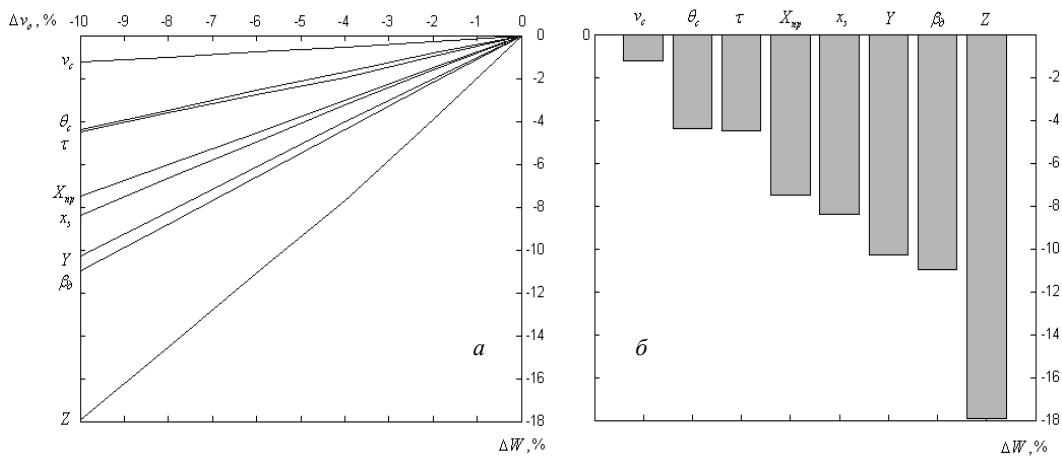


Рисунок 3 – Изменение значений элементов траектории при уменьшении начальной скорости снаряда

**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.

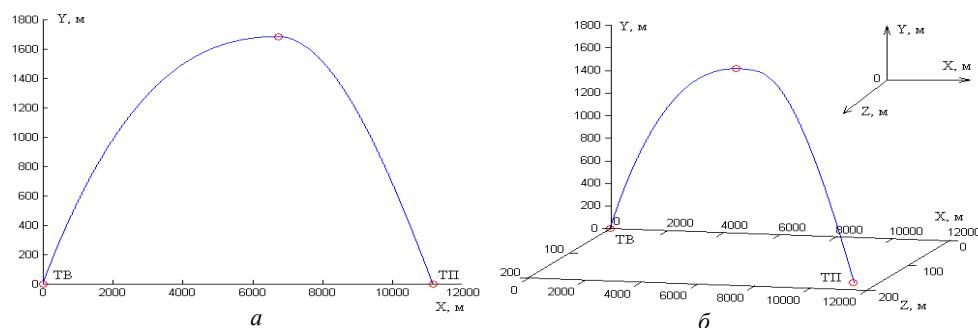


Рисунок 4 – Визуализация результатов расчета траекторий полета артиллерийского снаряда по характеристическим точкам с использованием интерполяции промежуточных значений кубическими полиномами Ш. Эрмита

*a* – траектория полета снаряда на плоскости; *б* – 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).

**Література**

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 артиллерией ВМФ. – М.: Воениздат, 1977. – 351 с.
5. Юркевич Б.И. Теория стрельбы береговой артиллерией. Часть 1. –М.: Воениздат, 1955. – 372 с.

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.