

УДК 629.072.19 (075.8)

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОПРАВОК ПРИ СТРЕЛЬБЕ АКТИВНО-РЕАКТИВНЫМИ СНАРЯДАМИ (МИНАМИ)

В.И. ГРАБЧАК, канд. техн. наук (Акад. сухопутных войск, г. Львов), **В.И. МАКЕЕВ**, канд. техн. наук, **П.Е. ТРОФИМЕНКО**, **Ю.И. ПУШКАРЁВ** кандидаты воен. наук (Сум. гос. ун-т)

Проведен анализ влияния возмущающих факторов на полет активно-реактивных снарядов (мин). Предложена и обоснована рациональная система поправок, которые необходимо учитывать при подготовке данных для стрельбы активно-реактивными снарядами и активно-реактивными минами.

Проведено аналіз впливу збурюючих факторів на політ активно-реактивних снарядів (мін). Запропоновано і обґрунтовано раціональну систему поправок, які необхідно враховувати при підготовці даних для стрільби активно-реактивними снарядами і активно-реактивними мінами.

The analysis of influence of disturbing factors on the flight of active missiles (mortar shells) is carried out. The rational system of corrections which should be taken into account in preparation of data for shooting with active missiles and mortar shells is offered and grounded.

Траектория движения активно-реактивных снарядов (АРС), активно-реактивных мин (АРМ) зависит от множества параметров, определяемых их конструкцией, применяемыми материалами, видом заряда (топлива), пусковым устройством, состоянием атмосферы. Различные параметры по-разному влияют на траекторию: одни вызывают изменение траектории только в плоскости стрельбы и почти не влияют на боковое отклонение; другие, практически не влияя на дальность, в основном вызывают боковое отклонение АРС (АРМ); третьи влияют на всю траекторию. Малые отклонения одних параметров вызывают существенное изменение элементов траектории, малые отклонения других параметров практически не приводят к изменениям отдельных элементов траектории. Оценку влияния того или иного параметра на данный элемент траектории производят с помощью поправок (поправочных коэффициентов) [1, 2].

На основе анализа влияния возмущающих факторов на полет АРС (АРМ) выделим факторы, оказывающие решающее влияние на полет снарядов (мин), и на основе этого предложим рациональную систему поправок, ко-

торые необходимо учитывать при подготовке данных для стрельбы этим классом боеприпасов. Под рациональной системой поправок понимаем систему с наименьшим количеством отклонений условий стрельбы от табличных, которые следует учитывать при определении установок для стрельбы на поражение на основе полной подготовки [1–3].

При установлении возможных пределов изменения возмущающих факторов учитываем систематическое отклонение среднего значения от нормального (табличного) и случайную величину при уровне вероятности 0,993 [4]. Перечень факторов, влияющих на отклонение АРС (АРМ) от цели, их среднее значение и характеристики точности срединных значений, а также предельные отклонения факторов от нормальных, приведены в работе [5].

Известно, что отклонение в дальности (направлении) стрельбы зависит не только от изменения фактора, но и от чувствительности дальности (направления) к изменению данного фактора [1]. Результаты расчетов максимальной и минимальной дальности стрельбы для некоторых типов АРС (АРМ), полученные интегрированием системы дифференциаль-

© В.И. ГРАБЧАК, В.И. МАКЕЕВ, П.Е. ТРОФИМЕНКО, Ю.И. ПУШКАРЁВ, 2009

ных уравнений пространственного движения снарядов (мин) [6], сведены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные отклонения АРС (АРМ) от цели из-за отличия условий стрельбы от табличных

Фактор	Тип АРС (АРМ)			
	152-мм СП 2С5	203-мм СП 2С7	240-мм СМ 3Ф2	РС М21- ОФ
	Дальность стрельбы, м			
Начальная скорость	$\frac{1487}{3071}$	$\frac{1910}{5260}$	$\frac{130}{390}$	$\frac{1320}{1961}$
Масса АРС (АРМ)	$\frac{233}{458}$	$\frac{193}{277}$	$\frac{165}{275}$	$\frac{705}{1648}$
Масса реактивного заряда	$\frac{22}{65}$	$\frac{45}{154}$	$\frac{108}{176}$	$\frac{365}{815}$
Время включения двигателя	$\frac{26}{34}$	$\frac{30}{47}$	$\frac{27}{96}$	$\frac{15}{162}$
Время работы двигателя	$\frac{13}{21}$	$\frac{9}{26}$	$\frac{10}{14}$	$\frac{136}{164}$
Единичный импульс	$\frac{26}{96}$	$\frac{71}{219}$	$\frac{115}{201}$	$\frac{570}{1348}$
Температура метательного заряда	$\frac{751}{1671}$	$\frac{861}{2391}$	$\frac{58}{156}$	$\frac{436}{712}$
Температура реактивного заряда	$\frac{416}{1227}$	$\frac{762}{2651}$	$\frac{47}{136}$	$\frac{496}{791}$
Температура воздуха	$\frac{341}{1191}$	$\frac{204}{1154}$	$\frac{217}{593}$	$\frac{711}{726}$
Давление воздуха	$\frac{541}{1127}$	$\frac{696}{1621}$	$\frac{212}{396}$	$\frac{831}{1347}$
	Вращающиеся АРС		Оперенные снаряды (мины)	
Продольный ветер на АУТ	$\frac{5}{15}$	$\frac{8}{23}$	$\frac{571}{2978}$	$\frac{402}{2416}$
Продольный ветер на ПУТ	$\frac{804}{2587}$	$\frac{1018}{2782}$	$\frac{1311}{1429}$	$\frac{1027}{1487}$
	Вращающиеся АРС		Оперенные снаряды (мины)	
Боковой ветер на АУТ	$\frac{7,5}{17}$	$\frac{9}{25}$	$\frac{2478}{3361}$	$\frac{3672}{6421}$
Боковой ветер на ПУТ	$\frac{862}{1812}$	$\frac{602}{2711}$	$\frac{987}{1127}$	$\frac{912}{1107}$

Примечания. 1. В числителе здесь и далее приведены минимальные значения дальности стрельбы, в знаменателе — максимальные. 2. АУТ — активный участок траектории; ПУТ — пассивный участок траектории; СП — самоходная пушка; СМ — самоходный миномет; РС — реактивный снаряд.

Для определения основных возмущающих факторов, которые должны подлежать учету при стрельбе АРС (АРМ), проведем ранжирование возмущающих факторов по степени

влияния их на дальность. Ранжирование возмущающих факторов производим по значениям вероятных отклонений АРС (АРМ) от цели. Определение вероятных отклонений АРС (АРМ) от цели при уровне возмущающих факторов, равных их средним отклонениям, может быть осуществлено путем планирования эксперимента [7].

В задачах с большим количеством возмущений на входе эксперимент ставится так, что варьируются сразу все возмущения; при традиционном же порядке последовательно изучается действие каждого фактора отдельно при фиксированных значениях остальных факторов. Характерная особенность математического планирования эксперимента состоит в том, что эффективность метода тем выше, чем большему количеству возмущений подвергается исследуемая система.

Математическая модель в этих условиях должна быть получена в виде уравнения связи выходной зависимости Y и входных переменных $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$. Здесь под Y подразумевается разность между дальностью при наличии возмущений и дальностью при табличных условиях. В пространстве $n + 1$ факторов уравнение связи является описанием некоторой поверхности отклика и может быть задано функцией отклика

$$Y = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n),$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ — возмущающие факторы.

При использовании методов планирования эксперимента [7] функция отклика отыскивается в виде уравнения

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{n+1} X_1^2 + \dots + \beta_{2n} X_n^2 + \beta_{2n+1} X_1 X_2 + \dots + \beta_k X_{n-1} X_n, \quad (1)$$

где $\beta_0, \beta_1, \beta_n, \dots, \beta_k$ — коэффициенты регрессии; X_1, X_2, \dots, X_n — переменные в натуральном виде.

При решении данной задачи диапазон изменения возмущающих факторов незначителен, в этом случае справедлива гипотеза о линейности полинома (1), тогда функция отклика, полученная на основе опыта, запишется, как

$$Y = \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i x_i, \quad (2)$$

где n — количество варьируемых факторов.

Если зависимость между функцией отклика и факторами постулируется в виде линейной модели, то целесообразно использовать насыщенные планы, которыми является и симплексная матрица планирования [8].

Коэффициенты регрессии (веса факторов) определяются по зависимости

$$b_j = 2 \sum_{i=1}^n (A_j Y_i - B_j Y_{i+1}), \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} A_j = 0 + I_i K_{A_j}; \\ B_j = 0 - I_i K_{B_j}; \\ K_{A_j} = \frac{1}{\sqrt{2j(j+1)}}; \\ K_{B_j} = \sqrt{\frac{j}{2(j+1)}}; \end{cases}$$

0 — основной уровень варьируемых факторов; I_i — интервал варьирования фактора; j — номер столбца матрицы; i — номер строки матрицы; Y_i — функция отклика, которая определяется как разность между возмущенной и табличной дальностью.

Необходимо отметить, что использование симплексных планов позволяет решить данную задачу (ранжирование и отсеивание факторов) при проведении минимально возможного количества опытов. План эксперимента образуется путем варьирования каждого из факторов a_i на нескольких уровнях относительно базовой точки, представляющей центр эксперимента. Основной (нулевой) уровень рассматривается как исходная точка эксперимента, задаваемая комбинацией табличных уровней факторов.

В план эксперимента включим двенадцать факторов ($n = 12$):

1) $a_1(V_0)$ — начальная скорость АРС (АРМ);

2) $a_2(T_{м.з.})$ — температура метательного заряда;

3) $a_3(q)$ — масса АРС (АРМ);

4) $a_4(I_1)$ — единичный импульс силы тяги;

5) $a_5(\tau_a)$ — время работы реактивного двигателя;

6) $a_6(i_n)$ — время включения двигателя;

7) $a_7(\omega)$ — масса реактивного заряда;

8) $a_8(T_{р.з.})$ — температура реактивного заряда;

9) $a_9(W_{nx})$ — продольная слагающая баллистического ветра в пределах ПУТ;

10) $a_{10}(W_{ax})$ — продольная слагающая баллистического ветра в пределах АУТ (только для АРМ и РС);

11) $a_{11}(h)$ — наземное давление атмосферы;

12) $a_{12}(\tau_0)$ — температура воздуха.

В силу ортогональности планирования все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга по формулам

$$\sigma_0 = \frac{1}{n} + 1 \sum_{i=1}^{n+1} Y_i, \quad (4)$$

$$\sigma_i = 2 \sum_{i=1}^{n+1} x_{ij} Y_i, \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, n+1$; $j = 1, 2, \dots, n$.

Значения функции отклика Y определяли как разность между возмущенной и табличной дальностью, а также численным интегрированием системы дифференциальных уравнений [6].

Возмущения при интегрировании системы дифференциальных уравнений [6] принимали в соответствии с работой [5]. Значения коэффициентов регрессии, рассчитанные по формулам (4), (5), приведены в табл. 2.

По данным таблицы ранжируем действующие факторы по отклонениям АРС (АРМ) от цели путем изменения фактора на величину $4E a_i$, где E — среднее отклонение a_i фактора. Для наглядности построим гистограммы значимости факторов для 203-мм СП 2С7 АРС (рис. 1) и 240-мм СМ АРМ (рис. 2) для максимальной и минимальной дальностей стрельбы. На гистограммах для максимальной дальности стрельбы отклонения расположены в порядке убывания значимости.

Таблица 2. Значения коэффициентов регрессии $|e_i|$ (м) при предельных срединных отклонениях a_i фактора от табличного значения

Тип АРС (АРМ)	$e_1 (\Delta V_0)$	$e_2 (\Delta T_{м.з})$	$e_3 (\Delta q)$	$e_4 (\Delta I_1)$	$e_5 (\Delta \tau_a)$	$e_6 (\Delta t_H)$	$e_7 (\Delta \omega)$	$e_8 (\Delta T_{р.з})$	$e_9 (W_{лх})$	$e_{10} (W_{ax})$	$e_{11} (\Delta h)$	$e_{12} (\Delta \tau)$
152-мм СП 2С5	$\frac{371}{765}$	$\frac{187}{415}$	$\frac{52}{102}$	$\frac{6}{23}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{103}{306}$	$\frac{206}{660}$	–	$\frac{133}{279}$	$\frac{69}{225}$
203-мм СП 2С7 АРС	$\frac{474}{1322}$	$\frac{214}{595}$	$\frac{48}{69}$	$\frac{17}{53}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{7}{11}$	$\frac{10}{38}$	$\frac{190}{662}$	$\frac{271}{703}$	–	$\frac{171}{401}$	$\frac{42}{225}$
240-мм СМ АРМ	$\frac{33}{98}$	$\frac{13}{38}$	$\frac{40}{67}$	$\frac{28}{49}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{6}{24}$	$\frac{26}{42}$	$\frac{11}{33}$	$\frac{347}{373}$	$\frac{149}{767}$	$\frac{50}{93}$	$\frac{44}{117}$
РС М21- ОФ	$\frac{331}{492}$	$\frac{108}{177}$	$\frac{175}{410}$	$\frac{142}{334}$	$\frac{34}{41}$	$\frac{3}{40}$	$\frac{90}{202}$	$\frac{123}{197}$	$\frac{271}{378}$	$\frac{108}{639}$	$\frac{207}{329}$	$\frac{143}{145}$

Примечание. Δ – отклонение a_i фактора от его табличного значения.

Из данных табл. 2 и приведенных гистограмм (рис. 1, 2) видно, что значимость факторов с дальностью стрельбы неодинакова. Поэтому решение об учете или неучете того или иного фактора при стрельбе необходимо принимать, имея данные, хотя бы для двух дальностей стрельбы: минимальной и максимальной.

Наиболее значимыми возмущающими факторами, вызывающими отклонения АРС от цели, являются начальная скорость снаряда, отклонение температуры реактивного и метательного зарядов, продольный ветер; для АРМ и РС – ветер, действующий в пределах активного участка траектории, поэтому их необходимо учитывать с наибольшей точностью.

Из приведенных данных следует, что отклонение большинства факторов от табличных, формирующих общее отклонение, необходимо учитывать при стрельбе. Остается решить вопрос, какие факторы и с какой точностью учитывать, а какие вообще не учитывать, т. е. выделить из всех факторов основные возмущающие факторы.

При стрельбе отклонение центра группы разрывов от цели определяется точностью способа определения установок, а следовательно, точностью измерения отклонений факторов от табличных.

Срединные ошибки, характеризующие точность измерения отклонения некоторых факторов от табличных значений, приняты в соответствии с работой [9]: $E_{\delta \Delta V_0} = 0,25 \% V_0$ с

АБС-1; $E_{\delta \Delta q} = 0,3 \% \text{ в/зн.}$; $E_{\delta W_{лх}} = E_{\delta W_{лз}} = 1,5 \text{ м/с}$; $E_{\delta W_{ax}} = E_{\delta W_{az}} = 0,7 \text{ м/с}$; $E_{\delta \Delta h} = 2 \text{ мм рт.ст.}$; $E_{\delta \Delta \tau_6} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Срединные ошибки измерения отклонений I_1 , τ_a , t_H , ω принимались в соответствии с работой [10].

Как показали исследования [11], температура реактивного заряда оказывает существенное влияние на единичный импульс тяги и время работы двигателя и как результат – на дальность полета снарядов (мин).

В настоящее время для АРС (АРМ) температуру реактивного заряда принимают равной температуре метательного заряда, которая определяется с помощью батарейного термометра ТБ-15. Метательные заряды имеют мелкозернистую структуру, размещаются снаружи, поэтому сравнительно быстро принимают температуру окружающего воздуха (за несколько часов). Реактивный заряд находится в камере двигателя, имеет значительную толщину и покрыт слоем бронировки. Он принимает температуру окружающего воздуха значительно дольше, т. е. тепловая инерционность реактивного заряда будет значительно отличаться от тепловой инерционности метательного заряда. Отсюда следует, что в большинстве случаев температура метательного и реактивного зарядов будет различной.

Боеприпасы на огневой позиции могут храниться в нишах, открытых ровиках, штабелях и т. д. Срединная ошибка, вызванная неучетом отклонения температуры данного заряда

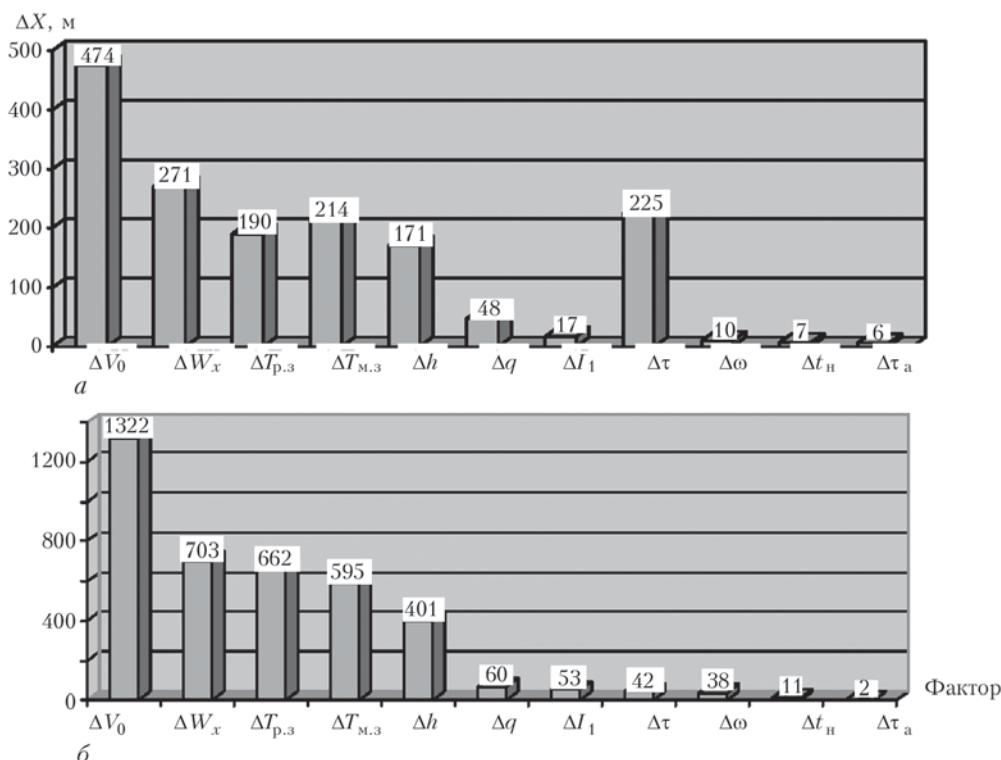


Рис. 1. Гистограмма значимости возмущающих факторов для минимальной (а) и максимальной (б) дальности стрельбы 203-мм СП 2С7 АРС

от средней, характеризуется значением порядка 2...3 °С [5].

Расчеты проведены по зависимости

$$E_{\delta T_3}^2 = E_{\delta T_3}^{\prime 2} + 0,038(2L)^2, \quad (6)$$

где $E_{\delta T_3}^2$ — срединная ошибка измерения температуры заряда существующим методом; $E_{\delta T_3}^{\prime 2}$ — инструментальная ошибка измерения прибором температуры заряда; L — параметр закона равной вероятности. С использованием изложенных выше данных показано, что суммарная срединная ошибка в определении температуры зарядов существующим методом составит: метательного 2...3, реактивного 4...5 °С. Применяемый в настоящее время метод определения температуры заряда для реактивного снаряда по температуре окружающего воздуха характеризуется срединной ошибкой $E_{\delta T_3} = 4...5$ °С и более [5].

Используя приведенные выше данные, характеризующие точность контроля условий стрельбы АРС (АРМ), проведем отсеиваю-

щий эксперимент в целях определения основных возмущающих факторов.

Практика показывает, что увеличение значения суммарной срединной ошибки E_x до 5 % не приводит к существенному изменению эффективности поражения, к тому же это допущение соизмеримо с точностью определения самой величины E_x [4]. Поэтому отсеивание незначимых факторов проведено при условии увеличения суммарной срединной ошибки, при их неучете, не более чем на 5 %.

В результате проведения эксперимента по формулам (5), (6) рассчитаны коэффициенты регрессии, значения которых приведены в табл. 3.

Полученные результаты позволяют определить вес каждого из возмущающих факторов в суммарном влиянии и отсеять незначимые факторы. Так, результаты эксперимента показали, что при стрельбе АРС с гироскопической стабилизацией неучет отклонения массы реактивного заряда приводит к увеличению суммарной срединной ошибки E_x на 0,5...1 %, неучет отклонения единичного импульса тяги — на 0,5...1,5 %. Неучет отклонения вре-

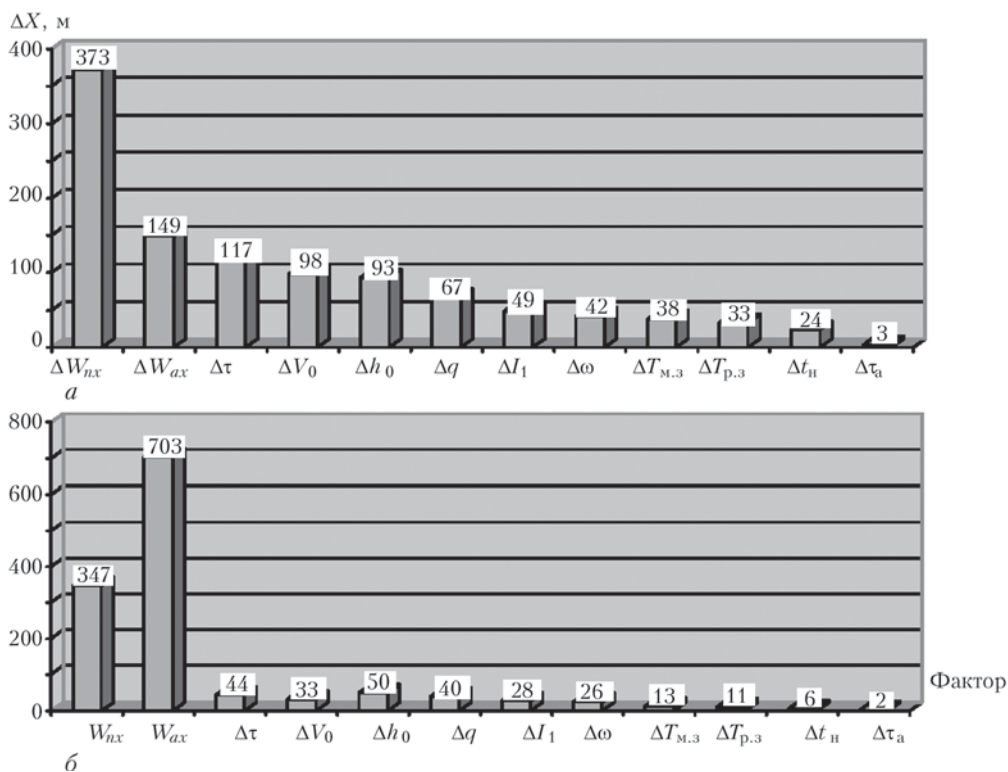


Рис. 2. Гистограмма значимости возмущающих факторов для минимальной (а) и максимальной (б) дальности стрельбы 240-мм СМ АРМ

мени работы и времени включения двигателя увеличивает среднюю ошибку E_x не более чем на 0,8 %.

Следовательно, при стрельбе АРС с гироскопической стабилизацией отклонения единичного импульса тяги, времени работы и времени включения двигателя и отклонения массы реактивного заряда можно не учитывать, при этом суммарная средняя ошибка E_x увеличивается не более чем на 3 %.

При стрельбе АРМ неучет отклонения массы реактивного заряда приводит к увеличению средней ошибки E_x на 4...13 %, при

стрельбе реактивных снарядов и АРС с аэродинамической стабилизацией — на 10...15 %. Ошибка неучета отклонения единичного импульса тяги для АРМ составляет 4...18 %, для реактивных снарядов и АРС с аэродинамической стабилизацией — 20...37 %. Неучет отклонения времени работы и времени включения двигателя для этих типов АРС (АРМ) приводит к увеличению суммарной средней ошибки E_x не более чем на 2...3 %.

Таким образом, при стрельбе АРМ, АРС с аэродинамической стабилизацией и реактивного снаряда необходимо учитывать откло-

Таблица 3. Значения коэффициентов регрессии $|\epsilon_i|$ (м) с учетом значения средней ошибки, характеризующей точность измерения a_i фактора

Тип АРС (АРМ)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6	ϵ_7	ϵ_8	ϵ_9	ϵ_{10}	ϵ_{11}	ϵ_{12}
152-мм СП 2С5	$\frac{49}{102}$	$\frac{47}{106}$	$\frac{16}{31}$	$\frac{6}{23}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{47}{140}$	$\frac{57}{120}$	—	$\frac{38}{80}$	$\frac{18}{33}$
203-мм СП 2С7	$\frac{63}{176}$	$\frac{54}{152}$	$\frac{14}{21}$	$\frac{17}{53}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{7}{11}$	$\frac{10}{38}$	$\frac{87}{304}$	$\frac{65}{130}$	—	$\frac{49}{114}$	$\frac{11}{36}$
240-мм СМ	$\frac{5}{16}$	$\frac{3}{10}$	$\frac{12}{20}$	$\frac{28}{49}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{6}{24}$	$\frac{26}{42}$	$\frac{5}{15}$	$\frac{72}{80}$	$\frac{21}{103}$	$\frac{14}{27}$	$\frac{8}{20}$
РС М21-ОФ	$\frac{44}{65}$	$\frac{28}{45}$	$\frac{52}{123}$	$\frac{142}{334}$	$\frac{34}{41}$	$\frac{3}{40}$	$\frac{90}{202}$	$\frac{56}{90}$	$\frac{56}{81}$	$\frac{15}{86}$	$\frac{59}{94}$	$\frac{23}{37}$

нения массы реактивного заряда и единичного импульса реактивной силы от номинальных значений.

Определим, с какой точностью должны учитываться данные параметры $E_{\delta\Delta I_1}$ и $E_{\delta\Delta\omega}$. С помощью функции (2) и использованием симплекс-плана [7] можно назначать допуски на входные ошибки параметров δa_i , при которых выходная величина ошибки δY не выходит за поставленные пределы.

Задача состоит в следующем: определить ошибки входных параметров $E_{\delta\Delta I_1}$, $E_{\delta\Delta\omega}$ при постоянстве всех остальных параметров при условии, что из-за этой ошибки суммарная срединная ошибка выходной функции E_x увеличится не более чем на 5 % ее значения. Данная задача решалась последовательно для I_1 и ω с помощью симплекс-плана [7].

Значения ошибок в определении $\delta_{\Delta I_1}$, $\delta_{\Delta\omega}$ варьировались от нуля до того значения, пока будет выполнено условие:

$$E_{\delta\Delta I_1}(E_{\delta\Delta\omega}) \leq 5 \% E_x.$$

В результате проведенных расчетов срединная ошибка определения отклонения единичного импульса $E_{\delta\Delta I_1}$ для АРМ должна быть не более 0,37 кгс/кг, для АРС с аэродинамической стабилизацией и $E_{\delta\Delta I_1}$ реактивного снаряда — 0,45 кгс/кг, а срединная ошибка в определении отклонения массы реактивного заряда $E_{\delta\Delta\omega}$ для АРМ реактивного снаряда не должна превышать 0,01 кг.

Таким образом, проведенные расчеты позволили предложить следующие рекомендации по рациональной системе поправок:

1) для АРС с гироскопической стабилизацией система поправок должна предусматривать учет отклонений условий стрельбы от табличных для начальной скорости снаряда; температуры метательного и реактивного зарядов; пассивной массы снаряда; баллистической температуры воздуха; продольной и боковой слагающей баллистического ветра; наземного давления атмосферы;

2) для АРМ, реактивных снарядов и АРС с аэродинамической стабилизацией система поправок должна предусматривать учет отклонений условий стрельбы от табличных для начальной скорости снаряда (мины); температуры метательного заряда; температуры реактивного заряда; пассивной массы снаряда (мины); массы реактивного заряда; единичного импульса тяги; продольной и боковой слагающей баллистического ветра на активном участке траектории; продольной и боковой слагающей баллистического ветра на пассивном участке траектории; баллистической температуры воздуха; наземного давления атмосферы.

На основе разработанной методики определения основных возмущающих факторов, влияющих на полет активно-реактивных снарядов (мин), можно обосновать рациональную систему поправок для данного вида боеприпасов, которые могут лечь в основу составления Таблиц стрельбы как существующих, так и перспективных снарядов (мин). 🐾

1. Равдин И.Ф. Внешняя баллистика неуправляемых ракет и снарядов. — М.: Воениздат, 1973. — 184 с.
2. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н., Богодистов С.С. Внешняя баллистика. — М.: Машиностроение, 1991. — 640 с.
3. Подготовка стрельбы и управления огнем артиллерии / Под ред. В.И. Волобуева. — М.: Воениздат, 1987. — 376 с.
4. Червоный А.А. Вероятностные методы оценки эффективности вооружения. — М.: Воениздат, 1979. — 93 с.
5. Орлов Б.В. Внешняя и внутренняя баллистика активно-реактивных снарядов. — М.: Изд. ЦНИИ информации, 1978. — 134 с.
6. Макеев В.И., Ляпа М.М., Назаренко Л.Д. Математична модель просторового руху літального апарату на твердому паливі в атмосфері // Вісн. СумДУ. — 2008. — № 2. — С. 5–12.
7. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965. — 340 с.
8. Харрман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. — М.: Мир, 1977. — 522 с.
9. Посібник з вивчення правил стрільби і управління вогнем наземної артилерії. Група, дивізіон, батарея, взвод, гармата: Навчал. посібник. — Львів: ЛІСВ, 2009. — 365 с.
10. Сборник таблиц для решения задач по внешней баллистике. — М.: Воениздат, 1989. — 128 с.
11. Исследование влияния параметров работы реактивного двигателя на дальность и кучность стрельбы реактивных снарядов / В.И. Макеев, В.И. Грабчак, П.Е. Трофименко, Ю.И. Пушкарев // Системи обробки інформації. — 2008. — № 6 (73). — С. 77–81.