

УДК 623.546

В.І. Макеєв, В.М. Петренко, В.Є. Житник

Сумський державний університет, Суми

ВПЛИВ ПОПРАВОК НА НЕЛІНІЙНІСТЬ ТА ВЗАЄМОВПЛИВ ОСНОВНИХ ЗБУРЮЮЧИХ ЧИННИКІВ НА ТРАЕКТОРІЮ ПОЛЬОТУ СНАРЯДА (МІНИ)

В статті визначені помилки в дальності внаслідок неврахування поправок на нелінійність і взаємозалежність збурюючих чинників під час стрільби снарядами (мінами) за умови, що граничні значення збурюючих чинників можуть досягати вагомих значень та розроблені рекомендації щодо раціональної системи поправок на відхилення умов стрільби від табличних значень.

Ключові слова: поправка на нелінійність, збурюючий чинник, система поправок.

Постановка проблеми та аналіз літератури

Таблиці стрільби складені для кожної системи (гармата-снаряд-заряд) та містять всі дані необхідні для підготовки даних для стрільби. Вони складені для стандартних умов стрільби, які називали табличними, або нормальними, а вплив відхилень від цих стандартних умов ураховують шляхом введення необхідних поправок.

В роботах, де розглядаються питання зовнішньої балістики і теорії поправок [1, 2, 3, 4], наведено вплив поправок на нелінійність і взаємозалежність збурюючих чинників. Але в них не розроблені рекомендації щодо раціональної системи поправок, які використовуються для складання і відстрілювання Таблиць стрільби.

Одним з допущень зовнішньої балістики є те, що всі поправки змінюються пропорційно величині відхилення чинника і незалежні один від одного.

Зміна $(\delta X)_\alpha$ на підставі диференціальної теорії поправок обчислюється за формулою [1]:

$$(\delta X)_\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i \quad (1)$$

де n – число збурюючих чинників;

α_i – чинники, що розглядаються.

Якщо відхилення збурюючих чинників α_i приймають великі значення, то залежність змін елементів траєкторії від їх змін не можна вважати лінійною. Крім того, за умови одночасної зміни двох або декількох збурюючих чинників їх вплив на зміну елементів траєкторії стає взаємозалежним.

Мета статті – розробка рекомендацій щодо раціональної системи поправок снарядів (мін) на відхилення умов стрільби від табличних значень.

Викладення матеріалів дослідження

Розглянемо помилки у величинах змін елементів траєкторії, що виникають внаслідок нелінійності і взаємозалежності поправок у тих випадках, коли зміна збурюючих чинників вагома.

Якщо змінюється тільки один із збурюючих чинників α_i на величину $\delta \alpha_i$, відповідна зміна будь-якого елементу траєкторії, наприклад δx_i дальності стрільби X , може бути представлена наступним розкладанням в ряд Тейлора за ступенями $\delta \alpha_i$ [2]:

$$\delta x_i = \frac{\partial x}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i + \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\delta \alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i^3} \cdot \frac{\delta \alpha_i^3}{3!} + \dots \quad (2)$$

У диференціальній теорії поправок враховується тільки член, що містить першу похідну $\frac{\partial x}{\partial \alpha_i}$. Анало-

гічний вираз отримаємо у тому випадку, коли змінюється тільки збурюючий чинник α_j на величину $\delta \alpha_j$. Суму членів, що містять однорідні похідні другого і вищих порядків, називатимемо помилкою за рахунок нелінійності поправок і позначатимемо $\delta_H(\delta X)$.

Якщо одночасно змінюється декілька збурюючих чинників, то ця помилка обчислюється як

$$\delta_H(\delta x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\delta \alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i^3} \cdot \frac{\delta \alpha_i^3}{3!} + \dots \right), \quad (3)$$

де n – число збурюючих чинників, що одночасно змінюються.

Проте помилка за рахунок нелінійності поправок не є єдиною помилкою диференціальної теорії поправок. У разі, коли змінюються одночасно два або декілька збурюючих чинників, наприклад α_i і α_j на величину $\delta \alpha_i$ і $\delta \alpha_j$ відповідно, зміна елемента траєкторії, наприклад X , яку позначимо δx , не буде дорівнювати сумі $\delta x_i + \delta x_j$.

Дійсно, розкладаючи δx у ряд Тейлора за ступенями величин $\delta \alpha_i$ і $\delta \alpha_j$ [2], отримаємо:

$$\begin{aligned} \delta X = & \frac{\partial x}{\partial \alpha_i} + \frac{\partial x}{\partial \alpha_j} \delta \alpha_j + \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2} \cdot \frac{\delta \alpha_i^2}{2!} + \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_j^2} \cdot \frac{\delta \alpha_j^2}{2!} + \dots + \\ & + \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \delta \alpha_i \delta \alpha_j + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i^2 \partial \alpha_j} \delta \alpha_i^2 \delta \alpha_j + \\ & + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j^2} \delta \alpha_i \delta \alpha_j^2 + \dots \end{aligned}$$

Розкладання цього виразу для δX відрізняється від розкладання, яке вийшло б під час підсумовування виразів для δx_i (2) і аналогічно йому δx_j , з членами, що містять змішані похідні і що враховують взаємний вплив збурюючих чинників на зміну елемента X .

Суму членів, які містять змішані похідні, називатимемо помилкою за рахунок взаємозалежності поправок і позначати $\delta_B(\delta X)$.

У разі, коли одночасно змінюється n збурюючих чинників, ця помилка обчислюється за формулою:

$$\delta_B(\delta x) = \sum_{i < j}^n \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \delta \alpha_i \delta \alpha_j + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i^2 \partial \alpha_j} \delta \alpha_i^2 \delta \alpha_j + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^3 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j^2} \delta \alpha_i \delta \alpha_j^2 + \dots \right) \quad (4)$$

Тоді помилка в дальності із-за нелінійності і взаємозалежності поправок знайдеться з виразу

$$\delta_{H,B}(\delta x) = \delta_H(\delta x) + \delta_B(\delta x). \quad (5)$$

Визначимо помилки в дальності із-за неврахування поправок на нелінійність і взаємозалежність збурюючих чинників $\delta_{H,B}(\delta x)$ під час стрільби снарядами (мінами) за умови, що граничні значення збурюючих чинників можуть досягати вагомих значень. Вказані помилки знайдемо як різницю відхилень у дальності, визначеною за допомогою системи диференційованих рівнянь [5] і за залежністю (1) для різних рівнів (Δ) відхилень збурюючих чинників від їх табличних значень.

Результати розрахунків для деяких варіантів снарядів (мін) наведені на рис. 1.

Аналіз проведених розрахунків для різних снарядів (мін) за різних умов (зима, літо), різних кутів кидання і рівнів відхилень збурюючих чинників показує:

1. Помилки внаслідок нелінійності і взаємозалежності поправок за умови середніх і великих від-

хилень умов стрільби від табличних можуть досягати істотних величин. Так, зимою їх значення можуть досягати 1,5% дальностей, влітку не більше 0,5%.

2. Із збільшенням калібру і дальності стрільби помилки $\delta_{H,B}(\delta x)$ за умови одного і того ж рівня збурюючих чинників збільшуються.

3. Неврахування поправок на нелінійність і взаємозалежність збурюючих чинників у напрямку робить незначний вплив і ними можна нехтувати.

Таким чином, можна зробити висновок, що в умовах, які суттєво відрізняються від табличних, особливо взимку, а під час стрільби снарядами (мінами) із дуже зношених стволів гармат (мінометів), поправки в дальності на нелінійність і взаємовплив чинників значні і їх необхідно урахувувати під час підготовки даних для стрільби.

Надалі, в ході обчислення поправок у дальність на відхилення умов стрільби від табличних, урахувуватимемо тільки члени, що містять похідні другого порядку. Тоді поправка в дальність визначиться із залежності [1]:

$$\Delta X = \sum_{i=1}^n \frac{\partial x}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i + \sum_{i < j}^n \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \Delta \alpha_i \Delta \alpha_j + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=2}^n \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2} \Delta \alpha_i^2,$$

де $\frac{\partial x}{\partial \alpha_i}$, $\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2}$ – перші і другі похідні, що відобра-

жають поправочні коефіцієнти дальності, розраховані на одиницю чинника, враховують лінійну і нелінійну зміну дальності:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \text{ – змішані похідні, що є поправочними}$$

коефіцієнтами дальності, розраховані на одиницю чинника, на сумісний вплив відхилень умов стрільби $\Delta \alpha_i$ і $\Delta \alpha_j$. Для розрахунку відхилень дальності ΔX за наведеною залежністю необхідно визначити

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha_i}, \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2}, \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j}.$$

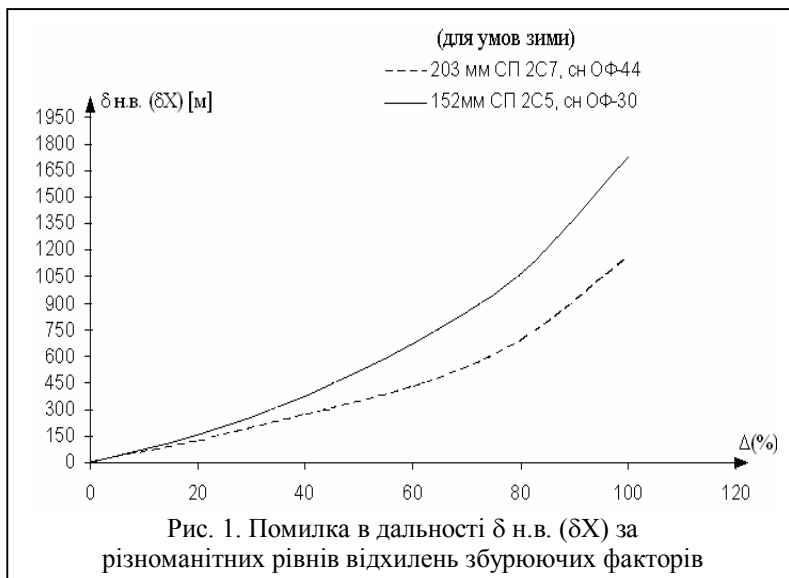
Незалежно один від одного ці коефіцієнти можуть бути знайдені тільки на основі математичного апарату планування експерименту [7, 8].

Основна перевага факторного експерименту полягає в тому, що тут досліди ставлять так, що одночасно ураховуються всі фактори. Тому кожен коефіцієнт регресії визначається за наслідками всіх експериментів.

Значення коефіцієнтів

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha_i}, \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2}, \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j},$$

розраховані за наведеною методикою для 203-мм пушки 2С7, наведені в табл. 1.



Таблиця 1

Значення коефіцієнтів $\frac{\partial x}{\partial \alpha_i}$, $\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i^2}$, $\frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j}$ для 203-мм пушки 2С7 ($\theta_0=0,8910$ рад)

Поправочні коефіцієнти	$\frac{\partial x}{\partial \tau_0}$	$\frac{\partial x}{\partial h_0}$	$\frac{\partial x}{\partial W_x}$	$\frac{\partial x}{\partial T_{3P}}$	$\frac{\partial x}{\partial T_{3M}}$	$\frac{\partial Z}{\partial W_z}$	$\frac{\partial x}{\partial q}$	$\frac{\partial x}{\partial V_0}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial h_0^2}$
Розмірність	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{10\text{мм рт ст}}$	$\frac{м}{10\text{м/с}}$	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{10\text{м/с}}$	$\frac{м}{1\text{в/зп}}$	$\frac{м}{1\%}$	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{10\text{мм рт ст}}$
Значення	-117,3	-586,4	904,5	+789,9	+587,7	-45,6	+72,1	+880,3	-0,76	-0,81

Продовження табл. 1

Поправочні коефіцієнти	$\frac{\partial^2 x}{\partial W_x^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial T_{3P}^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial T_{3M}^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial q^2}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0 \partial h_0}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0 \partial V_0}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0 \partial T_{3P}}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0 \partial T_{3M}}$
Розмірність	$\frac{м}{10\text{м/с}}$	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{10^0}$	$\frac{м}{1\%}$	$\frac{м}{1\text{в/зп}}$	$\frac{м}{10^0, 10\text{мм рт ст}}$	$\frac{м}{10^0, 1\%}$	$\frac{м}{10^0, 10^0}$	$\frac{м}{10^0, 10^0}$
Значення	-2,6	+4,5	-2,14	-8,25	-0,93	-0,62	-12,2	-9,4	-12,9

Продовження табл. 1

Поправочні коефіцієнти	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0 \partial h_0}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial h_0 \partial T_{3P}}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial h_0 \partial T_{3M}}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial h_0 \partial W_x}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial W_x \partial W_z}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0 \partial T_{3M}}$
Розмірність	$\frac{м}{1\%, 10\text{мм рт ст}}$	$\frac{м}{10\text{мм рт ст}, 10^0}$	$\frac{м}{10\text{мм рт ст}, 10^0}$	$\frac{м}{1\%, 10\text{м/с}}$	$\frac{м}{10\text{м/с}, 10\text{м/с}}$	$\frac{м}{1\%, 10^0}$
Значення	-13,1	-8,4	-9,5	+9,52	+0,016	+14,2

Закінчення табл. 1

Поправочні коефіцієнти	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0 \partial T_{3P}}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial h_0 \partial W_z}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial \tau_0 \partial W_z}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0 \partial q}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial T_{3P} \partial T_{3M}}$	$\frac{\partial^2 x}{\partial V_0 \partial W_z}$
Розмірність	$\frac{м}{1\%, 10^0}$	$\frac{м}{10\text{мм рт ст}, 10\text{м/с}}$	$\frac{м}{10^0, 10\text{м/с}}$	$\frac{м}{1\%, 1\text{в/зп}}$	$\frac{м}{10^0, 10^0}$	$\frac{м}{1\%, 10\text{м/с}}$
Значення	-0,12	-0,11	-0,09	+12,1	0,96	0,19

Аналіз даних табл. 1 та аналогічних розрахунків показує:

1 Помилки дальності із-за нелінійності і взаємозалежності поправок особливо великі для групи членів, залежних від зміни початкової швидкості снаряда. Так, під час стрільби взимку за умов: температура повітря $\tau_0=-20^\circ\text{C}$, відхилення початкової швидкості $\Delta V_0=-4\%V_0$, відхилення тиску повітря $\Delta h=-15$ мм рт. ст., помилки на нелінійність і взаємовплив $\delta_{н.в}(\delta x)$ складають 300 – 500 м.

Слід зазначити, що відхилення початкової швидкості від $-5,5$ до $8,2\% V_0$ є цілком реальним і в умовах низьких температур може бути навіть під час стрільби з нових гармат партією зарядів, що забезпечує табличну швидкість в нормальних умовах. Так, наприклад, під час стрільби на заряді повному ($t_{зар}=-25^\circ\text{C}$) зміна початкової швидкості снаряда внаслідок відхилення температури заряду складе $-5,2\% V_0$ для 203-мм пушки 2С7; для 152-мм пушки 2С5 $-4\% V_0$ [4, 6].

2 Помилки дальності із-за нелінійності впливу температури τ_0 і тиску h_0 повітря і взаємозалежності температури та тиску $\tau_0 h_0$, повздовжньої та бокової складових балістичного вітру $W_x W_z$, початкової

швидкості та бокової складової балістичного вітру $V_0 W_z$, температури зарядів реактивного та металюного $T_{3P} T_{3M}$, початкової швидкості та температури заряду реактивного $V_0 T_{3P}$, тиску повітря та повздовжньої складової балістичного вітру $h_0 W_x$, температури повітря та повздовжньої складової балістичного вітру $\tau_0 W_x$ для снарядів з гіроскопічною стабілізацією настільки малі, що ними можна нехтувати.

Необхідно відзначити, що основна частина помилки $\delta_{н.в}(\delta x)$ виникає унаслідок відкидання членів, що містять похідні другого порядку.

Таким чином, система поправок на відхилення умов стрільби від табличних значень повинна ураховувати поправки на нелінійність впливу: початкової швидкості V_0 , відхилення ваги снаряда q , температури заряду реактивного T_{3P} , температури заряду металюного T_{3M} , повздовжньої складової балістичного W_x і взаємовплив: початкової швидкості та температури повітря $V_0 \tau_0$, початкової швидкості та тиску повітря $V_0 h_0$, початкової швидкості та повздовжньої складової балістичного вітру $V_0 W_x$, початкової швидкості та температури заряду металюного $V_0 T_{3M}$, початкової швидкості та відхилення ваги снаряда $V_0 q$, температури повітря та температури заряду ме-

тального $\tau_0 T_{зм}$, температури повітря та температури заряду реактивного $\tau_0 T_{зр}$, тиску повітря та температури заряду металюного $h_0 T_{зм}$, тиску повітря та температури заряду реактивного $h_0 T_{зр}$.

Висновки

Таким чином, з проведеного дослідження та аналізу отриманих результатів можна запропонувати наступні рекомендації по раціональній системі поправок на відхилення умов стрільби від табличних значень:

1. Для активно-реактивних (АР) снарядів з гіроскопічною стабілізацією система поправок повинна передбачати урахування відхилень умов стрільби від табличних для:

- початкової швидкості снаряда;
- температури металюного і реактивного зарядів;
- пасивної ваги снаряда;
- балістичної температури повітря;
- повздовжньої і бокової складових балістичного вітру в межах повної траєкторії;
- наземного тиску атмосфери;
- деривації.

2. Для АР мін і АР снарядів з аеродинамічною стабілізацією і реактивних снарядів система поправок повинна передбачати урахування відхилень умов стрільби від табличних для:

- початкової швидкості;
- температури металюного і реактивного зарядів;
- пасивної ваги снаряда (міни);
- ваги реактивного заряду;
- одиничного імпульсу реактивної сили;
- повздовжньої і бокової складових балістичного вітру активної ділянки траєкторії;
- повздовжньої і бокової складових балістичного вітру пасивної ділянки траєкторії;

- балістичної температури повітря;
- наземного тиску атмосфери.

3. У таблицях стрільби АР снарядів та мін повинні бути рекомендації щодо врахування поправок на нелінійність і взаємовплив основних збурюючих чинників. Для цього в повних Таблицях стрільби необхідно мати значення поправочних коефіцієнтів розрахованих за розробленою методикою.

Список літератури

1. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лисенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 607 с.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 572 с.
3. Орлов В.Б. Внешняя и внутренняя баллистика активно-реактивных снарядов / В.Б. Орлов и др. – М.: Издательство ЦНИИ информации, 1978. – 134 с.
4. Лысенко Н.Н. Баллистика ствольных систем. Справочная библиотека разработчика-исследователя / Н.Н. Лысенко, В.В. Грабин. – М.: Машиностроение, 2006. – 461 с.
5. Макеев В.І. Математична модель просторового руху літального апарату на твердому паливі в атмосфері / В.І. Макеев та ін. – Суми: Вісник СумДУ, 2008. – № 2. – С. 45-51.
6. Кособрюхов Н.Н. Исследование движения НРС (АРМ) и методы отстрела и составления таблиц стрельбы: дисс. канд. ... техн. наук / Кособрюхов Н.Н. – Л.: ВАА, 1976. – 188 с.
7. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман и др. – М.: Мир, 1977. – 522 с.
8. Налимов В.В. Статистические методы планирования экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова – М.: Наука, 1965. – 340 с.

Надійшла до редколегії 26.05.2010

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, професор А.М. Черноус, Сумський державний університет, Суми.

ВЛИЯНИЕ ПОПРАВОК НА НЕЛИНЕЙНОСТЬ ТА ВЗАИМОВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТРАЕКТОРИЮ ПОЛЕТА СНАРЯДА (МИНЫ)

В.И. Макеев, В.Н. Петренко, В.Е. Житник

В статье определены ошибки в дальности вследствие неучета поправок на нелинейность и взаимовлияние возмущающих факторов при стрельбе снарядами (минами) при условии, что максимальные значения возмущающие факторы могут достигать существенных значений и разработаны рекомендации по рациональной системе поправок на отклонения условий стрельбы от табличных значений.

Ключевые слова: поправка на нелинейность, возмущающий фактор, система поправок.

AMENDMENT INFLUENCE ON NOT LINEARITY AND MUTUAL INFLUENCE OF THE BASIC REVOLTING FACTORS ON A TRAJECTORY OF FLIGHT OF A PROJECTILE (MINE)

V.I. Makeev, V.N. Petrenko, V.E. Zhytnyk

In the article are determined the range errors into the consequence not of the calculation of correction for not linearity and the interdependence of the disturbing factors during the shooting projectiles (mines) when the limiting values of the disturbing factors can reach influential values, also recommendations concerning rational system of amendments on deviations of conditions of shooting from tabular values.

Keywords: the amendment on not linearity, revolting factors, amendment system.