

В.І. Макеєв, В.М. Петренко, В.Є. Житник, А.Ф. Раскошний

Сумський державний університет, Суми

МЕТОДИКА СКЛАДАННЯ ТАБЛИЦЬ СТРІЛЬБИ МОДЕЛЮВАННЯМ НА ЕОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

У статті проаналізовані існуючі методи складання Таблиць стрільби для артилерійських систем та боєприпасів. Запропонована методика складання Таблиць стрільби для нових артилерійських боєприпасів дослідно-теоретичним методом. Дана методика заснована на моделюванні польоту снарядів (мін) на ЕОМ в реальних умовах з використанням дослідних даних та може застосовуватись на початкових етапах розробки нових боєприпасів для складання Таблиць стрільби. Її використання дозволяє зменшити витрату боєприпасів під час проведення дослідних стрільб на балістичних полігонах та скоротити час складання Таблиць стрільби.

Ключові слова: система диференціальних рівнянь; коефіцієнт форми снаряда (міни); дослідна дальність; коефіцієнт деривації; поправочні графи ТС; характеристики розсіювання.

Вступ

Постановка проблеми. Таблиці стрільби (ТС) використовуються у бойових умовах як під час стрільби з закритої вогневої позиції так і під час стрільби прямою наводкою.

В теперішній час в Україні відсутня методика відстрілу і складання ТС боєприпасів, які розробляються, з різними способами стабілізації, яка основана на моделюванні польоту снаряда (міни) в збуреному середовищі. Крім того відсутня комплексна система диференціальних рівнянь, яка використовується для активно-реактивних снарядів (мін) та яка враховує обертання землі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичні моделі руху снаряда (міни) [1–5] дозволяють теоретично вивчати вплив збурюючих факторів на їх політ, але на їх основі неможливо розробити комплексну методику складання ТС, яка б дозволяла розраховувати всі необхідні графи ТС і параметри зразків боєприпасів, які розробляються. Крім того, в цих методиках передбачалося, що снаряди досить схожі і що за допомогою одного коефіцієнта пропорційності (коефіцієнта форми), визначеного з досліду, можна забезпечити ідентифікацію всіх елементів траєкторії, розрахованих теоретично, з дослідними. Таким чином, описаний вище метод, який передбачає тільки один параметр узгодження (за дальністю, часом або координатами), має історичне коріння і до недавнього часу був достатнім [1–5].

В результаті досліджень з'ясувалося, що в якості погоджувальної величини найправильніше брати не коефіцієнт при $C_x(M)$, а саму функцію. Але для її визначення необхідно узгодити значення C_x при декількох значеннях числа M , тобто на одній траєкторії комплексно визначати (або узгоджувати) декілька значень $C_x(M)$ (замість цього можна узгоджувати коефіцієнти поліномів, апроксимуючих $C_x(M)$). Цей факт пояснюється просто. На значення

поправок впливає не тільки середня величина C_x , яка коректується введеним коефіцієнтом узгодження, але і реальні значення C_x вздовж траєкторії. А вони можуть бути в дійсності непропорційні еталонним значенням $C_{x\text{ет}}(M)$.

Таким чином, уточнення моделі системою диференціальних рівнянь (СДР) можливо шляхом введення декількох коефіцієнтів узгодження [7–8].

Мета статті – запропонувати математичну модель руху, яку можна використовувати для снаряда (міни) з різними способами стабілізації, як для звичайних так і активно-реактивних боєприпасів та на її основі розробити методику складання ТС моделюванням на ЕОМ.

Виклад основного матеріалу

Складання Таблиць стрільби на основі табличних стрільб

Визначальне положення на сьогодні займає **дослідно-теоретичний метод**, який полягає в тому, що на основі результатів порівняно обмеженої кількості пострілів підбирають спеціальні коефіцієнти (коефіцієнти форми і), що погоджують результати стрільби та розрахунків траєкторій в деяких інтервалах початкових швидкостей і кутів кидання. Надалі ці коефіцієнти використовують вже для чисто математичного розрахунку всіх необхідних залежностей для заповнення основних, поправочних і допоміжних граф ТС. Проведені перед цим за спеціальним, ретельно розробленим планом-програмою стрільби зводяться табличними. Для гармат і РСЗВ середніх калібрів обсяг стрільб зазвичай становить 600...700 пострілів.

Основні табличні стрільби поділяються на стрільби по місцевості, повітряні і по щитах. До складу табличних стрільб включають також стрільби на визначення кута вильоту і на підбір зарядів. Вони мають допоміжний характер [3–5; 10].

Як вже відмічалось, власне Таблиці стрільби (практично всіх різновидів) розраховуються шляхом інтегрування системи диференціальних рівнянь руху снаряда. До цієї пори вираховування коливальних рухів навколо центра мас виконується рідко. Тому використовуюваною СДР, як правило, є система (1), яка описує рух тільки центра мас [7–8].

Інші позначення, що використовуюються в статті прийняті згідно [1–3; 10].

Зрозуміло, що простий розрахунок за такою (або будь-якою іншою) системою диференціальних рівнянь буде давати результати, які помітно відрізняються від одержуваних під час реальної стрільби. На політ сна-

ряда впливають численні фактори (постійні і випадкові), врахувати які неможливо (в тому числі і рух щодо центру мас). Тому для узгодження СДР як математичної моделі руху у рівняння вводять спеціальний коефіцієнт, названий коефіцієнтом форми (і). Наведемо приклад. Одне з поширених видів динамічних диференціальних рівнянь, записаних в проекції на дотичну до траєкторії, виглядає таким чином:

$$\dot{V} = -\frac{\rho V^2}{2m} S_m C_x^p(M) - g \sin \theta.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = V \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi / \left(1 - \frac{2Y}{R_3} \right); \\ \dot{y} = V \cdot \sin \theta; \\ \dot{z} = V \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi; \\ \dot{V} = K_3 \cdot a_p - a_x \cos \gamma - 1.1g_0 \cdot \sin \theta \cdot \left(1 - \frac{2Y}{R_3} \right); \\ \dot{\theta} = -\frac{\cos \theta \cdot g_0 (1 - 2Y/R_3) - a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_x \cdot \sin \theta}{V} + \frac{K_v \cdot 0.08V \cdot \cos \theta}{R_3 + Y} - K_v \cdot 2.3\Omega_3 \cos B \cdot \sin(a_\Gamma - \psi); \\ \dot{\psi} = -\frac{a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_z}{\cos \theta \cdot V \cdot V_\Gamma} + K_v \cdot 2\Omega_3 (\sin B - \cos B \cdot \cos(a_\Gamma - \psi) \cdot \operatorname{tg} \theta); \\ \pi(y) = -\frac{\pi(y) \cdot \dot{y}}{R[\tau_y + \Delta\tau]}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\text{де } a_p = \frac{\omega_0 (I_{1N} + K_1 \cdot \Delta T_{3p})}{m_0 [\tau_{aN} - K_2 \cdot \Delta T_{3p}] \cdot (1 - \mu_y)};$$

$$\mu_y = \frac{\omega_0 (t - t_H)}{g_0 \cdot m_0 \cdot (\tau_{aN} + K_2 \cdot \Delta T_{3p})};$$

$$m_0 = \frac{Q_0}{g_0}; \quad \Delta T_{3p} = T_{3p} - 15^\circ C;$$

$$a_x = 0.474 \cdot \frac{i \cdot d^2}{Q_0 + \Delta q} \cdot \pi(y) \cdot V_{\Gamma}^2 \cdot C_x(V_{\Gamma});$$

$$\cos \gamma = \frac{V - W_x \cdot \cos \theta}{V_\Gamma};$$

$$V_\Gamma = V \times$$

$$\times \sqrt{1 - \frac{2 \cdot (W_x \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + W_z \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta)}{V} + \frac{W^2}{V^2}};$$

$$w^2 = w_x^2 + w_z^2; \quad v_{\Gamma} = v_{\Gamma} \sqrt{\frac{\tau_{ON}}{\tau_y + \Delta\tau}}.$$

Коефіцієнт лобового опору $C_x(M)$ представляють у вигляді:

$$C_x^p = i C_{x\Gamma}(M), \quad (2)$$

де C_x^p – коефіцієнт лобового опору для відстріляного (реального) снаряда;

$C_{x\Gamma}(M)$ – деяка функція, прийнята та узгоджена як еталонна.

Очевидно, що від прийнятого значення коефіцієнта форми буде суттєво залежати і швидкість (V), і всі інші елементи і параметри траєкторії: дальність, час польоту, висота траєкторії, висота точки попадання в щит, висота і похила дальність до розриву (при дистанційній та зенітній стрільбах) і т. п. Це означає, що можна, змінюючи коефіцієнт форми, отримати таку розрахункову дальність (або час, або інший параметр), щоб вона співпала з дослідним результатом. У якості $C_{x\Gamma}(M)$ до теперішнього часу використовується так званий «закон опору 43 року» – C_{x43} . У визначенні підхідних значень коефіцієнта форми, що погоджують розрахункові результати з дослідними по якомуньбудь параметру, і полягає весь сенс сучасних табличних стрільб. Так як параметр (коефіцієнта форми) в формулі (2) один (він може бути різним для різних умов стрільби), то ця процедура може бути названа однопараметричним узгодженням [5–6; 10–11].

Із досвіду добре відомо, що значення коефіцієнта форми виходять різними, в першу чергу для різних початкових швидкостей V_0 та кутів підвищення ϕ . Відповідно до цього, як правило, приймають наступний порядок проведення табличних стрільб.

Для кожного заряду і кожного кута підвищення (цей кут, зазвичай, беруть з кроком 5° , рідше 10°) відстрілюють по одній групі з 5...10 снарядів (як правило 7) у три різних дні. Під час кожної стрільби ретельно фіксують умови, які можуть вплинути на траєкторію: в першу чергу, дійсні метеоумови (їх розподіл по висоті), дані про відстрілювані снаряди і заряди.

На приймальних майданчиках визначають координати точок падіння снарядів (за дальністю та напрямком). Відстріл групи виконують, за можливістю, за короткий інтервал часу, щоб уникнути зміни метеоумов. У дощ, сніг, град, при сильному вітрі табличні стрільби не проводяться.

У подальшому під час обробки результатів стрільб – дальність точок падіння снарядів (та/або час польоту) – для кожної групи осереднюють і за середнім значенням визначають коефіцієнт форми. Потім осереднюють три коефіцієнта та рахують отриманий результат відповідним даним V_0 та φ .

Розглянемо порядок безпосереднього визначення коефіцієнта форми.

Бокове відхилення $Z_{\text{он}}$, отримане в процесі дослідних стрільб, також осереднюють за групами і використовують у подальшому для визначення схожого з коефіцієнтом форми коефіцієнта деривації K_d .

Під час табличних стрільб на місцевості необхідно отримати сукупність значень дослідних дальностей $X_{\text{он}}$ та бокових відхилень $Z_{\text{он}}$, що відповідають різним узгоджуваним параметрам, перш за все V_0 (зарядах) та кутах підвищення φ .

Так, під час табличних стрільб по щитах зазвичай знаходять коефіцієнт форми виходячи із замірних часів польоту снаряда до щита $T_{\text{оп}}$. Ці стрільби проводяться, як правило, для відносно малих дальностей стрільби гармат звичайної наземної артилерії та для гармат, призначених тільки для стрільби прямою наводкою (танкових, протитанкових). Щити розставляють на директрисі на дальностях 0,5...2 км (іноді більше). Під час стрільби по них вимірюють час польоту, приводять його до нормальних (табличних) значень усіх можливих умов і потім знаходять відповідний коефіцієнт форми.

Для визначення істинного кута кидання $\theta_0 = \varphi + \delta_y$ та істинного бокового напрямку руху снаряда $\Psi_0 = \delta_y$ необхідно знати кути вильоту. Кути δ_y та δ_z визначають перед табличними стрільбами спеціальним відстрілом по щитах, встановлених на дальності приблизно 50...100 м. На щиті роблять відмітку «хрест», який лежить точно впродовж осі каналу ствола, проводять групу з 3...5 пострілів і знаходять середнє відхилення пробиття від центра Y_δ та Z_δ . Для цих відхилень, незважаючи на опір повітря, впливу порохових газів та вітру, можна записати вирази

$$Y_\delta = \frac{X_{\text{щ}} \delta_y}{\cos^2 \theta_0} - \frac{g}{2} \left(\frac{X_{\text{щ}}}{\cos \theta_0} \frac{1}{V_0} \right)^2; \quad Z_\delta = \frac{X_{\text{щ}}}{\cos \theta_0} \delta_z,$$

де $X_{\text{щ}}$ – горизонтальна відстань до щита.

Звідси

$$\delta_y = \frac{Y_\delta \cos^2 \theta_0}{X_{\text{щ}}} + \frac{g}{2} \frac{X_{\text{щ}}}{V_0^2}; \quad \delta_z = \frac{Z_\delta \cos \theta_0}{X_{\text{щ}}}.$$

До теперішнього часу немає методів вимірювання кутів вильоту під час кожного пострілу, таких надійних, як, наприклад, для вимірювання початкової швидкості. Тому отримані при описаних спеціальних стрільбах середні кути вильоту приймають для всіх стрільб, як на місцевості, так і по щитах [2; 9].

Узгодження дослідних і розрахункових результатів

Розглянемо два підходи до узгодження: з прямою і опосередкованою нормалізацією. Пряма нормалізація з'явилася раніше непрямою і полягає в тому, що узгодження проводиться за дослідною дальністю, перерахованою (приведеною) до табличних умов за допомогою введення в неї поправок на відміну дійсних умов табличних стрільб від нормальних. Потім «нормалізована» дослідна дальність порівнюється з табличною, яка відповідає тим же θ_0 та V_0 і, якщо виявляється розбіжність, табличну дальність перераховують, змінюючи в потрібний бік коефіцієнт форми в СДР. Але, для цього необхідно змінювати і раніше використані поправки, так як вони відповідають початковому значенню коефіцієнта форми (зазвичай його приймають рівним 1).

Таким чином, даний процес узгодження перетворюється в ітераційний, який закінчується за таким значенням i_t , при якому розрахована дальність збігалася б з дослідною, нормалізованою поправками, відповідними тому ж i_t . Розглянутий процес узгодження з нормалізацією на кожному кроці був особливо зручний під час використання Таблиць зовнішньої балістики ч.2 (ТЗБ), в яких і дальності, і поправки визначаються за трьома входами: V_0 , θ_0 та $C = 10^3 \frac{id^2}{m}$. Як видно, тут досить просто здійснювати ітераційний процес, змінюючи значення коефіцієнта форми.

Узгодження з непрямою (неявною) нормалізацією (а фактично зовсім без неї) більше відповідає не ТЗБ, а інтегруванню СДР. Після отримання дослідних дальностей їх усереднюють для кожної групи і проводять інтегрування використовуваної СДР за всіх умов відстрілу метеобюлетня, застосовуючи коефіцієнт форми нульового наближення. Виявивши різницю розрахункової та дослідної (середньої) дальностей, коефіцієнт форми змінюють у потрібний бік та повторюють інтегрування. Для

прискорення та полегшення цього підбору використовують наближену формулу

$$i = i_p + \frac{X_{оп} - X_p}{\partial x / \partial i},$$

де i_p – коефіцієнт форми, при якому отримано значення X_p ; $\partial x / \partial i$ – часткова похідна дальності по (і), розраховується заздалегідь шляхом інтегрування СДР при двох-трьох значеннях [7].

Точність цієї формули тим вища, чим ближче X_p до $X_{оп}$ за однакових умов стрільби. Цим коефіцієнтом форми вже можна користуватися при табличних умовах стрільби, тому узгоджене значення коефіцієнта форми називають табличним коефіцієнтом форми i_t . Слід зазначити, що обидва підходи до узгодження дають практично однаковий результат.

Таким чином, для кожного заряду (V_0) отримаємо деяку множину значень i_t , відповідних відстріляним кутам підвищення (рис. 1).

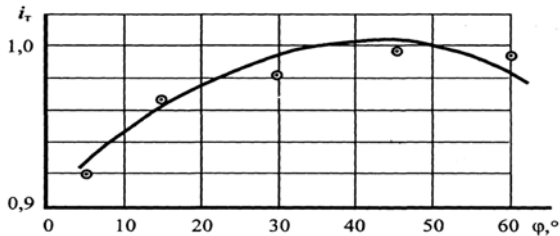


Рис. 1. Згладжувальна крива для коефіцієнта форми

З фізичних міркувань очевидно, що коефіцієнт форми не може бути нерівною функцією від ϕ , однак внаслідок дрібних природних помилок, які супроводжують стрільби і розрахунки, значення $i_t(\phi)$ розташовуються на графіку не гладко. Тому їх піддають згладжуванню. Це можна зробити за лекалом, але правильніше використовувати метод найменших квадратів, згладжуючи або відразу всі значення i_t , або за ділянками (у разі великої мінливості цього коефіцієнта).

Як вже було визначено, для кожної початкової швидкості буде своя крива $i_t(\phi)$. Якщо таких швидкостей декілька (за кількістю змінних зарядів), то, відповідно, зросте число кривих $i_t(\phi)$. Їх сукупність іноді називають «сіткою коефіцієнтів форми» (рис. 2).

Зауважимо, що сітка коефіцієнтів форми має місце за будь-яких параметрів узгодження.

У боковому напрямку також вводять коефіцієнт узгодження, який називають коефіцієнтом деривації K_d . Однак в цьому випадку немає необхідності в зближеннях.

Коли дальність (або час і т. п.) узгоджені шляхом підбору належного i_t , розрахункове значення

деривації $Z_{др}$ порівнюють з її дослідним значенням, яке визначається за формулою

$$Z_{доп} = Z_{оп} - X_{оп} \delta_z - W_z \left(T_{оп} - \frac{X_{оп}}{V_0 \cos \theta_0} \right),$$

де $Z_{оп}$ – отримане на стрільбах середнє бокове відхилення.

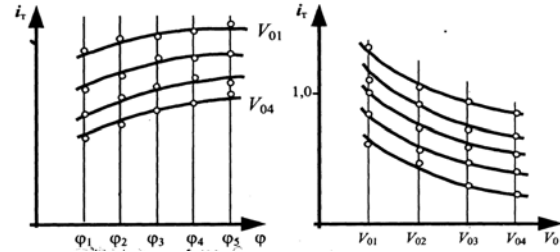


Рис. 2. Сітки згладжувальних кривих для коефіцієнта форми

Далі знаходять коефіцієнт деривації:

$$K_d = \frac{Z_{доп}}{Z_{др}} \quad (3)$$

і будують сітку K_d , схожу сітці i_t .

На цьому обробка табличних стрільб можна вважати закінченою.

Математичні принципи розрахунку та складання Таблиць стрільби

В основі сучасних ТС лежить метод поправок на виміряні відхиляючі фактори. Метод дозволяє кардинально зменшити обсяг таблиць і спростити користування ними. Цей метод зародився в астрономії XIX ст. І з тих пір широко використовується в науці і техніці [2; 10]. Однак в ТС він дещо модифікований. Розглянемо його основні аспекти стосовно дальності стрільби.

Як уже зазначалося, основним способом отримання траєкторій є інтегрування прийнятої до розгляду СДР. Для початкових умов стрільби $V_{0д}$, $\theta_{0д}$ і дійсних умов польоту снаряда – температури повітря T_d , тиску ρ_d , вітру $W_{хд}$ і т.д. – прийнята система диференціальних рівнянь має забезпечувати (разом з коефіцієнтом форми i_t) отримання дальності X_d , близької до дійсної:

$$X_d = X(V_{0д}, \rho_d, T_d, \dots).$$

Якщо, замість дійсних, взяти табличні значення відхиляючих факторів, отримаємо табличну дальність:

$$X_t = X(V_{0т}, \rho_t, T_t, \dots).$$

Різниця між цими дальностями пояснюється відмінністю факторів:

$$V_{0д} = V_{0т} + \Delta V_0; \rho_d = \rho_t + \Delta \rho; T_d = T_t + \Delta T \dots$$

(для простоти обмежимося тільки трьома факторами).

Таким чином, замість залежності (3) можна записати

$$X_d = X(V_{0T} + \Delta V_0, \rho_T + \Delta \rho, T_T + \Delta T, \dots).$$

Розкладаючи цю функцію в ряд Тейлора, отримаємо

$$X_d = X(V_0, \rho_T, T_T) + \frac{\partial X_T}{\partial V} \Delta V_0 + \frac{\partial X_T}{\partial \rho_T} \Delta \rho + \frac{\partial X_T}{\partial T_T} \Delta T$$

або

$$X_d = X_T + \frac{\partial X_T}{\partial V} \Delta V_0 + \frac{\partial X_T}{\partial \rho_T} \Delta \rho + \frac{\partial X_T}{\partial T_T} \Delta T. \quad (4)$$

Звідси

$$X_d + \Pi_v^{(r)} + \Pi_p^{(r)} + \Pi_T^{(r)} = X_T, \quad (5)$$

$$\text{де } \Pi_v^{(r)} = -\frac{\partial X_T}{\partial V} \Delta V_0; \Pi_p^{(r)} = -\frac{\partial X_T}{\partial \rho_T} \Delta \rho; \Pi_T^{(r)} = -\frac{\partial X_T}{\partial T_T} \Delta V_0.$$

Формула (4) відображає метод поправок в його «класичному» вигляді: щоб з дослідної дальності отримати дальність, на яку полетів би снаряд у нормальних умовах, треба до цієї дійсної дальності додати поправки на відхиляючі фактори (поправки є відхилення, взяті з протилежним знаком).

Однак цього для розрахунку установок недостатньо. По-перше, в ТС вказані приціли для табличних, а не дійсних дальностей. По-друге, в ТС всі поправки розраховані для табличних умов $\Pi^{(r)}$, а не для дійсних, і вони можуть дуже відрізнятись один від одного. Тому, в ТС метод поправок дещо розширений. Під час підготовки даних для стрільби необхідно знайти таку табличну дальність, яка разом з відповідними їй поправками дорівнювала б геодезичній дальності до цілі. Ця таблична дальність носить назву обчисленої дальності, по її значенню визначається приціл.

Обчислення опосередкованих граф ТС

Перш за все зазначимо, що до основних відносять графи, що містять значення основних параметрів траєкторії ($X, T_{\text{пол}}, \varphi$). Маючи сітку значень i_T (див. вище), їх неважко визначити, задаючись початковими умовами інтегрування СДР: $V_0, \theta_0 = \varphi + \delta_y$ і табличними умовами стрільби, до яких відносяться наступні умови.

Геофізичні умови. Земля – обертальна куля з радіусом 6370 км та середнім (табличним) прискоренням сили тяжіння 9,80665 м/с. Під час розрахунку поправок на обертання Землі приймається її кутова швидкість $7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с. Табличні висота вогневої позиції і висота точки падіння снаряда (над сферичною поверхнею Землі) рівні 0.

Метеорологічні умови. Вітер на всіх висотах відсутній ($W_x = 0, W_z = 0$). Табличний (нормальний) тиск атмосфери на рівні земної поверхні $\rho_{0N} = 750$ мм. рт. ст. = 1000 мб. Наземна температура $T = +15$ °C = 288,3 К. Нормальна відносна вологість

повітря 50 %. З поправкою на 50 % вологості повітря $T_{0N} = +15,6$ °C = 288,9 К. Розподіл температури за висотою відповідає нормальній артилерійській атмосфері. Розподіл тиску по висоті відповідає барометричному закону.

Балістичні умови. Геометричні обводи снаряда, його маса, моменти інерції і розташування центра мас відповідають номінальним кресленням. Маса снаряда таблична. Початкова швидкість і кути вильоту відповідають табличним значенням. Снаряд на траєкторії рухається без коливань відносно центра мас.

За цих умов розрахунок ведеться для кожного заряду, для відповідної йому V_0 . Так як початковою умовою є не X , а θ_0 , то обчислення проводяться для ряду значень θ_0 з кроком 2°; 3°; 5°. Однак в ТС необхідно вказати основні елементи для вхідної величини X (іноді $T_{\text{пол}}, D_c$). Отже, доводиться вдаватися до заміни аргументу, що проводиться у такому порядку:

– отримані під час інтегрування пар значень, $\theta_{0i}, X_i; \theta_{0i}, T_i; \theta_{0i}, V_{ci}$... апроксимуються поліномами другого-третього ступеня на послідовних ділянках [1; 5; 11];

– маючи такі поліноми, неважко, підставляючи в них значення X з будь-яким необхідним кроком, отримати відповідні значення $\theta_0; T; V_c$.

Кут θ_0 «виправляють» на кут вильоту, переводять у поділки кутоміра і отримують установку прицілу, що відповідає заданій дальності. Польотний час T , якщо необхідно, перераховують в установку дистанційного піддривника. Решту значень основних параметрів розміщують у відведені ім графи. Слід зазначити, що описаний прийом заміни змінних може призводити до деяких помилок. Тому необхідно перевіряти отримані табличні залежності (хоча б з укрупненим кроком) прямим інтегруванням і вносити необхідні корективи.

Обчислення поправок

Відповідно до формули (5) для отримання поправок необхідно знайти похідні по кожному з поправочних факторів. Відомі три основних практичних способу їх визначення: за ТЗБ, рішенням спряженої системи диференціальних рівнянь і методом різниць [1–2; 5]. Перший спосіб простий, але їм користуватися не завжди зручно через обмеженість числа відхиляючих факторів. Другий спосіб вимагає наявності спеціальної програми розрахунку. Щоб уникнути цього, зазвичай використовують метод різниць, при якому за звичайною програмою вирішення основного СДР з заданим кутом φ (що відповідає за будь-якої «круглої» дальності) інтегрують тричі: в перший раз з відхиленням даного чинника в

«+», у другій – без відхилення і в третій – з відхиленням в «-». Позначимо отримані дальності через X^+ ; X^0 ; X^- . Тоді значення поправок можна обчислити за формулами

$$\Pi_{\mu_1}^{(\tau)} = -\frac{X_i^+ - X_i^-}{2}; \quad \Pi_{\mu_2}^{(\tau)} = -\frac{X_i^+ + X_i^- - 2X_i^0}{2}. \quad (6)$$

Величини ΔV_0 ; $\Delta \rho$; $\Delta T \dots$ прийнято задавати стандартними значеннями: $\Delta V_0 = 1\%$, $\Delta \rho = 10$ мм рт. ст., $\Delta T = 10$ °C, $W_x = W_z = 10$ м/с, $\Delta m = 1$ (Δm – масовий знак, відповідає 2/3 % від маси снаряда). В цьому випадку поправки можна записувати без десяткових знаків.

За формулами (6) отримують поправки для деякої скороченої сітки діяльностей x , потім апроксимують їх. Розраховані з постійним кроком по x , поправки вписують у відповідні графі. Аналогічно знаходять для всіх поправок. Попутно оцінюють значення поправок другого порядку (6) та приймають рішення про їх врахування чи неврахування.

Поправки на обертання Землі та на кут місця цілі розраховують як функції двох змінних. У першому випадку – це широта та азимут стрільби (для різних дальностей або кутів прицілювання), у другому – дальність і кут місця цілі. Отримані значення поміщають в окремі таблиці поправок з декількома входами. Поправки на деривацію розраховують за аналітичними залежностями і потім корегують з використанням коефіцієнта κ_d .

Визначення табличних характеристик розсіювання

Для кожної групи з n пострілів при табличних стрільбах характеристики розсіювання визначаються за формулами:

$$B_d = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}{n-1}};$$

$$B_\theta = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{cp})^2}{n-1}};$$

$$B_b = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2}{n-1}},$$

де B_d , B_θ , B_b – ймовірні відхилення за дальністю, напрямком та висотою відповідно;

X_{cp} , Z_{cp} , Y_{cp} – середні значення дальності, висоти і бокових відхилень точок падіння від точки прицілювання, відповідно,

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}; \quad Z_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}; \quad Y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}.$$

Отримані характеристики усереднюються по всіх групах, відповідним однаковим V_0 , θ_0 . Потім їх «згладжують» за всіма кутами підвищення для кожної швидкості, та такі «вирівняні» значення для кожної дальності вказують у відповідних графах ТС.

Вище було наведено порядок узгодження теоретичної моделі руху снаряда (системи диференціальних рівнянь) з дослідними даними (результатами стрільб) за допомогою однієї величини – коефіцієнта форми. В СДР руху центра мас є тільки одна функція, маловідома кількісно, – це коефіцієнт лобового опору $C_x(M)$.

Раніше передбачалося, що снаряди досить схожі і що за допомогою одного коефіцієнта пропорційності, визначеного з досліду, можна забезпечити ідентифікацію всіх елементів траєкторії, розрахованих теоретично, з дослідними. Таким чином, описаний вище метод, який передбачає тільки один параметр узгодження (за дальністю, часом або координатами), має історичне коріння і до недавнього часу був достатнім.

Однак досить швидко з'ясувалося, що одного параметра узгодження недостатньо. Дійсно, вище зазначалося, що навіть на одній і тій же траєкторії цей єдиний коефіцієнт чомусь виходить різним для узгоджуваної дальності, часу або координат. Це допускалося і допускається, так як «не завдає шкоди». Але виявилось, що поправки, розраховані з цими різними коефіцієнтами форми, також різняться.

В результаті досліджень з'ясувалося, що в якості погоджувальної величини найправильніше брати не коефіцієнт при $C_x(M)$, а саму функцію [7]. Але для її визначення необхідно узгодити значення C_x при декількох значеннях числа M , тобто на одній траєкторії комплексно визначати (або узгоджувати) декілька значень $C_x(M)$ (замість цього можна узгоджувати коефіцієнти поліномів, апроксимуючих $C_x(M)$). Цей факт пояснюється просто. На значення поправок впливає не тільки середня величина C_x , яка коректується введеним коефіцієнтом узгодження, але і реальні значення C_x вздовж траєкторії. А вони можуть бути в дійсності непропорційні еталонним значенням $C_{x\text{эт}}(M)$.

Таким чином, уточнення моделі СДР можливо шляхом введення декількох коефіцієнтів узгодження. Такий метод називається багатопараметричним [7].

Можна відразу сказати, що чим більше узгоджувальних параметрів, тим більше точно застосована модель буде сходиться кількісно з натуральним процесом. Але природно, що чим більше параметрів узгоджується, тим більший обсяг інформації необхідно отримати з дослідів. Зокрема, у наведеному вище прикладі з визначенням $C_x(M)$ замість одного коефіцієнта форми необхідно вимірювати поточні траєкторні координати снаряда та його швидкість, для чого потрібна відповідна апаратура.

Запропонована модель розрахунку ТС апробована на дослідних стрільбах на випробувальному полігоні Павлоградського механічного заводу в 2017 році. Результати свідчать, що серединна похибка ТС розроблених на основі запропонованої методики складає 0,3–0,4 % дальності, що відповідає вимогам до точності ТС [1; 9–10; 12].

ВИСНОВКИ

1. Запропонований метод складання Таблиць стрільби, оснований на моделюванні польоту снаряда,

що дозволяє мати найменші матеріальні витрати.

2. Методика дозволяє розраховувати коефіцієнт форми снаряда (балістичний коефіцієнт для дослідного зразка боєприпасу для всіх кутів кидання) і зарядів.

3. Запропоновано застосування методів апроксимації, що дозволить складати Таблиці стрільби з фіксованим кроком.

4. Проведене узгодження дослідних і розрахункових даних дає хороші результати [12].

Список літератури

1. Дмитриевский А.А. Прикладные задачи теории оптимального управления движением беспилотных летательных аппаратов / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 607 с.
2. Баллистика / С.В. Беневоольский, В.В. Бурлов, В.П. Казаковцев и др.; под ред. Л.Н. Лысенко. – Пенза: ПАИИ, 2005. – 425 с.
3. Ермолаев С.И. Внутренняя баллистика / С.И. Ермолаев, Л.Б. Комаров, Е.В. Чурбанов. – Л., изд. ВМА им. А.Н. Крылова, 1958. – 325 с.
4. Зубков А.Ф. Внутренняя баллистика ствольных систем (Газодинамические основы внутрикамерных процессов): учеб. пособ. / А.Ф. Зубков, С.Н. Курков, В.В. Чернов. – Пенза: ВАИУ, 1994. – 210 с.
5. Правдин В.М. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов / В.М. Правдин, А.П. Шанин. – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 1999. – 307 с.
6. Чурбанов Е.В. Внутренняя баллистика / Е.В. Чурбанов. – Л.: ВАОЛКА, 1975. – 291 с.
7. Рух центру ваги некерованої ракети на активній ділянці траєкторії / В.І. Макеєв, Ю.І. Пушкар'єв, В.В. Воронько // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2014. – № 2 (39). – С. 8-13.
8. Makejev V. Ballistics of Uncontrollable Aircrafts: School Book / V. Makejev, P. Trofimenko, N. Lyapa. – Riga, Lambert Academic Publish, 2017. – 454 с.
9. Липанов А.М. Баллистика ствольных систем / А.М. Липанов. – М.: Машиностроение, 2006. – 459 с.
10. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 451 с.
11. Чурбанов Е.В. Краткий курс баллистики / Е.В. Чурбанов. – С-П.: Балтийский государственный технический университет, 2006. – 291 с.
12. Підготовка артилерійських систем до проведення випробувальних стрільб: Звіт про виконання науково-дослідної роботи. – Суми: СумДУ, 2018. – 127 с.

References

1. Dmytryevskiy, A.A. and Lysenko, L.N. (1978), "Prykladnye zadachy teoryi optymal'nogho upravleniya dvyzhenyem bespylotnykh letatel'nykh apparatov" [Applied problems of the theory of optimal control of the motion of unmanned aerial vehicles], Mashynostroeniye, Moscow, 607 p.
2. Benevol'skiy, S.V., Burlov, V.V. and Kazakovcev, V.P. (2005), "Balystyka" [Ballistics], PYY, Penza, 425 p.
3. Ermolaev, S.Y., Komarov, L.B. and Churbanov, V.V. (1958), "Vnutrennjaja ballystyka" [Internal ballistics], VMA im. A.N. Krylova, Leningrad, 325 p.
4. Zubkov, A.F., Kurkov, S.N. and Chernov, V.V. (1994), "Vnutrennjaja ballystyka stvol'nykh system (Ghazodynamicheskiye osnovy vnutykamornykh processov): ucheb. posobyey" [Internal ballistics of barrel systems (Gas dynamic foundations of intracamer processes)], VAYU, Penza, 210 p.
5. Pravdyn, V.M. and Shanyn, A.P. (1999), "Ballystyka neupravlyaemykh letatel'nykh apparatov" [Ballistics of unguided aircrafts], Yzdatel'stvo RFJaC – VNYITF, Snezhynsk, 307 p.
6. Churbanov, V.V. (1975), "Vnutrennjaja ballystyka" [Internal ballistics], VAOLKA, Leningrad, 291 p.
7. Makejev, V.I. Pushkar'ov, Ju.I. and Voronjko, V.V. (2014), "Rukh centra vaghy nekerovanoji rakety na aktyvnij diljanci trajektoriji" [Ruh center of the vague of non-cured rockets on the active dialian trajector], Scientific Works of Kharkiv National Air Force University, No. 2(39), pp. 8-13.
8. Makejev, V., Trofimenko, P. and Lyapa, N. (2017), Ballistiks of uncontrollable aircrafts: school book, Lambert Academic Publish, Riga, 464 p.
9. Lypanov, A.M. (2006), "Ballysytyka stvol'nykh system" [Ballistics of barrel systems], Mashynostroeniye, Moscow, 459 p.
10. Dmytryevskiy, A.A. and Lysenko, L.N. (2005), "Vneshnjaja ballystyka" [External ballistics], Mashynostroeniye, Moscow, 451 p.
11. Churbanov E.V. (2006) "Kratkyj kurs ballystyky" [Short Course of Ballistics], Baltyjskij ghosudarstvennyj tekhnicheskij unyversytet, St. Petersburg, 291 p.
12. SumDU (2018), "Pidghotovka artylerijskykh system do provedennja vyprobuval'nykh stril'jb" [Preparation of artillery systems before the viprobuvalnih pages], Sumy, 127 p.

Надійшла до редколегії 7.06.2018

Схвалена до друку 17.07.2018

Відомості про авторів:**Макеєв Висиль Ілліч**

кандидат технічних наук доцент
доцент
Сумського державного університету,
Суми, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1591-9664>

Петренко Валентин Миколайович

старший викладач
Сумського державного університету,
Суми, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4092-4940>

Житник Віктор Євгенович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
доцент
Сумського державного університету,
Суми, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9669-0859>

Раскошный Андрій Федорович

кандидат військових наук
старший викладач
Сумського державного університету,
Суми, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4114-4855>

Information about the authors:**Vasiliy Makeyev**

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer
of Sumy State University,
Sumy, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1591-9664>

Valentyn Petrenko

Senior Instructor
of Sumy State University,
Sumy, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4092-4940>

Viktor Zhytnyk

Candidate of Technical Sciences
Senior Research
Senior Lecturer
of Sumy State University,
Sumy, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9669-0859>

Andrii Raskoshnyi

Candidate of Military Sciences
Senior Instructor
of Sumy State University,
Sumy, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4114-4855>

МЕТОДИКА СОСТАВЛЕНИЯ ТАБЛИЦ СТРЕЛЬБЫ МОДЕЛИРОВАНИЕМ НА ЭВМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

V.I. Makeev, V.M. Petrenko, V.S. Zhytnyk, A.F. Raskoshnyi

В статье проанализированы существующие методы составления таблиц стрельбы для артиллерийских систем и боеприпасов. Предложена методика составления таблиц стрельбы для новых артиллерийских боеприпасов опытно-теоретическим методом. Данная методика основана на моделировании полета снарядов (мин) на ЭВМ в реальных условиях с использованием исследовательских данных и может применяться на начальных этапах разработки новых боеприпасов для составления таблиц стрельбы. Ее использование позволяет уменьшить расход боеприпасов при проведении исследовательских стрельб на баллистических полигонах и сократить время составления таблиц стрельбы.

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений; коэффициент формы снаряда (мины) исследовательская дальность; коэффициент деривации; поправочные графы ТС; характеристики рассеяния.

METHODOLOGY OF COMPOSING THE SHOOTING TABLE BY MODELING ON THE EU WITH THE USE OF EXPERIMENTAL DATA

V. Makeev, V. Petrenko, V. Zhytnyk, A. Raskoshnyi

The article analyzes the existing methods of drawing up Shooting tables for artillery systems and ammunition. The defining position today is occupies the experimental-theoretical method, which is based on the fact that based on the results of a relatively limited number of shots, select special coefficients (coefficients of form i) that coordinate the results of firing and calculations of trajectories at some intervals of initial velocities and angles of throwing. In the future these coefficients are already used for the pure mathematical calculation of all necessary dependencies for filling the main, correction and auxiliary graph ST. The method allows calculating the coefficient of form of a projectile (ballistic coefficient for a prototype of an ammunition for all angles of casting) and charges, and it is proposed that the methods of approximation be used to make Fixed Target Shooting Tables. Basic shooting tabular divided into firing at the ground, air and on the boards. The table shooting also includes firing for the determination of the departure angle and for the selection of charges. They have an auxiliary character. The technique of drawing up Shooting tables for new artillery munitions by experimental-theoretical method is offered. This technique is based on the simulation of the flight of projectiles (mines) on a computer in real conditions using experimental data and can be used at the initial stages of the development of new munitions for the planting of Shooting tables. Its use can reduce the spending of ammunition during research on ballistic firing ranges and reduce the time of drawing up the Shooting tables.

Keywords: system of differential equations; shell shape factor (mines) research range; coefficient of derivation; corrective graphs of the TS; scattering characteristics.