

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ
КОЕФІЦІЄНТІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ
ТА ПАРАМЕТРІВ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ СНАРЯДІВ
ПРИ СТВОРЕННІ РОЗРАХУНКОВИХ ТАБЛИЦЬ СТРІЛЬБИ**

к.т.н. О.М. Шийко, Р.Ю. Михайлик
(подав проф. В.О. Прокопов)

Наводиться методика розробки розрахункових таблиць стрільби снарядами за кресленнями снарядів на стадії створення артозброєння.

Постановка проблеми. Необхідним і важливим етапом створення артозброєння є розробка розрахункових таблиць стрільби для артилерійських систем. На цьому етапі створення артилерійського озброєння за відомими кресленнями снарядів та при відомих початкових швидкостях визначаються розрахункові параметри траєкторій руху снарядів, такі як дальність польоту, висота траєкторії, час польоту, кут падіння та ін.

Складові *першого етапу* вивчення польоту: схематизація матеріальної системи і сил; вибір системи відліку і співвідношень та їх запис в проекціях на осі вибраної системи координат; отримання диференціальних рівнянь руху. На *другому етапі* існуюча балістична задача відноситься до одного з трьох типів: задачі Коші для звичайних диференціальних рівнянь, тобто визначення польоту за диференціальними рівняннями при відомих початкових умовах; задачі визначення польоту за крайовими умовами (крайова задача); задачі оптимізації польоту. Зміст *третього етапу* зводиться до вибору конкретного чисельного методу розв'язання диференціальних рівнянь задачі балістики.

Таким чином, при створенні розрахункових таблиць стрільби артилерійськими снарядами, коли розглядається їх політ під дією зовнішніх сил та при відомих початкових умовах руху, фактично розв'язується задача Коші, для чого необхідно, насамперед, вірно визначити, які сили діють на снаряд і знайти, яка буде їх величина в кожному момент часу. В результаті розв'язання диференціальних рівнянь отримують усі характеристики руху: швидкість, прискорення, час польоту, координати центру мас, за якими може бути побудована траєкторія.

Аналіз існуючої літератури. Існує досить великий обсяг літератури, що в тій або іншій мірі торкається питань, пов'язаних з розрахунками

таблиць стрільби. Це стосується аеродинамічних розрахунків, розрахунків параметрів траєкторії руху та інше. Недоліком є те, що в цій літературі зазначені питання розглядаються окремо та однобічно. В літературі зі зовнішньої балістики слабо висвітлюються питання розрахунку аеродинамічного опору снарядів і, навпаки – існує велика кількість спеціалізованої літератури з аеродинаміки. Автору невідома література, де б висвітлювалися комплексні методи аеродинамічних та балістичних розрахунків, пов'язаних з розробкою розрахункових таблиць стрільби.

Мета статті. Метою статті є ознайомлення з комплексною методикою розрахунку коефіцієнтів аеродинамічного опору та параметрів траєкторії руху артилерійських снарядів за їх кресленнями при створенні розрахункових таблиць стрільби.

У загальному вигляді розв'язання задачі достатньо важке, оскільки потребує значної кількості аеродинамічних коефіцієнтів снаряда, визначення яких є досить трудомістким та потребує значних матеріальних витрат. Разом з тим, при таких кутах нутації, що мають місце в більшості випадків руху артилерійських снарядів, рух центра мас снаряда мало залежить від його руху навколо центра мас. У такому разі снаряд можна розглядати як матеріальну точку, на яку діють сили тяжіння та сила опору повітря. Силу опору повітря можна визначити за залежністю для сили лобового опору

$$R = \frac{id^2}{g} \cdot 10^3 \cdot \ddot{I}(y) \cdot F(V_\tau), \quad (1)$$

де d – калібр снаряда; i – аеродинамічний коефіцієнт форми снаряда по відношенню до еталонного зразка; g – прискорення сили тяжіння; $I(y)$ – функція тиску, що відображає нормальну залежність розподілу густини повітря з висотою; $F(V_\tau)$ – функція опору повітря, таблична функція зразка 1943 або 1958 р. Коефіцієнт форми снаряда має визначатися по відношенню до цієї функції, тобто $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$.

Залежність для сили опору можна використовувати в тому випадку, коли відомі всі складові правої частини (1), тобто відомий у тому числі й коефіцієнт форми снаряда $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$. Функція опору підраховується за швидкістю, але з урахуванням конкретного значення числа Маха ($M = V_\tau/a$) у точці траєкторії, де a – швидкість звуку в точці траєкторії.

При балістичному проектуванні тобто розрахунковому складанні таблиць стрільби форма запису (1) для сили лобового опору неприйнятна, тому що заздалегідь невідомий коефіцієнт форми снаряда i . Його потрібно попередньо визначати.

Для цього існують теоретичні і експериментальні методи оцінки аеродинамічного опору. Експериментальні методи (досить відомі фахівцям) дають достовірні дані, але потребують матеріальної та експериментальної

бази, суттєвих матеріальних затрат. У порівнянні з ними розрахункові методи визначення опору снарядів виглядають досить привабливо. Вони детально розроблені, про них існує багато літератури. А та точність, яку вони забезпечують, прийнятна при складанні розрахункових таблиць. Нарешті, існують теоретично-експериментальні методи визначення опору, представлені різноманітними емпіричними залежностями.

Аеродинамічні сили опору, що діють на снаряд з боку повітря, в загальному випадку можна поділити на три складові: сили опору тертя (опір тертя); сили опору, пов'язані з підвищенням тиску на головній частині (опір тиску); сили опору, пов'язані з виникненням розрідження за донним зрізом снаряда (донний опір). Усі ці складові на етапі складання розрахункових таблиць стрільби підлягають визначенню за кресленнями снаряда. Визначити їх можна через аеродинамічні коефіцієнти опору. Для цього запишемо вираз для сили лобового опору снаряда у вигляді:

$$R = C_x \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot S_{\text{mid}}, \quad (2)$$

де C_x – аеродинамічний коефіцієнт опору; $\rho V^2/2$ – швидкісний напір повітря, що набігає на снаряд; S_{mid} – площа міделевого перерізу снаряда.

Під час розробки методики використовувалися різноманітні джерела інформації як вітчизняні, так і закордонні. Зокрема, опір тертя та його коефіцієнт визначалися за методом еквівалентної пластинки на основі інтерполяційних формул, що були отримані у свій час співробітниками ЦАГІ ім. Жуковського (Росія) та пройшли неодноразову перевірку на практиці.

Для визначення опору тиску при надзвукових швидкостях польоту застосовано метод характеристик, що на даний час найбільш точний для визначення розподілу тиску на тілах у надзвуковому потоці стиснуваного середовища. Розрахунок донного опору виконується на підставі даних про тіла обертання, що наводяться в керівництві для інженерів та наукових співробітників наукових і конструкторських установ військово-морських сил США. До складу цього документа входять найдостовірніші експериментальні дані американських вчених, отримані в період до 1961 року, що можуть з успіхом використовуватися і в наш час, оскільки питання, що там розглядаються, досить консервативні за своїми суттю і змістом. Експериментальні дані в цій методиці подані у вигляді графіків для коефіцієнтів опору. За цими графіками були отримані інтерполяційні формули для C_x у широкому діапазоні швидкостей – як дозвукових, транзвукових, так і надзвукових.

Коефіцієнт опору снаряда C_x – величина безрозмірна, що сама є функцією безрозмірних параметрів: числа Рейнольдса та числа Маха. Залежність від числа Рейнольдса виявляється при значних висотах польоту. Го-

му можна вважати, що $C_x = f(M)$, тобто є функцією числа Маха $M = V_\tau/a$, де V_τ – швидкість польоту; a – швидкість звуку в точці траєкторії, де знаходиться снаряд. Оскільки підрахувати $C_x(M)$ у кожній точці траєкторії в процесі інтегрування диференційних рівнянь руху неможливо практично, то це потрібно зробити заздалегідь. Для цього підраховуються значення C_x при окремих значеннях числа M та заносять в таблицю. Наприклад, це можуть бути значення C_x при числах M , що відрізняються на 0,1. Значення C_x у будь-якій точці траєкторії, тобто при будь-якому значенні числа M , визначаються в процесі інтегрування диференційних рівнянь шляхом інтерполяції табличних значень. Оскільки під час польоту снаряд змінює значення своєї швидкості в широкому діапазоні, то для існуючих у цей час швидкостей артснарядів залежність $C_x(M)$ потрібно розраховувати від $M = 0,1$ до $M = 2,0 \div 2,5$. Якщо $C_x(M)$ визначені на підставі креслень зовнішніх контурів снаряда, то подальший хід роботи щодо створення таблиць стрільби потребує диференційних рівнянь руху снаряда. Вважаючи снаряд матеріальною точкою та враховуючи сили, що діють на нього, можна навести рівняння руху снаряда, записані в проекціях на швидкісні (натуральні) вісі координат (рис. 1, \bar{V}_0 – початкова швидкість; α – кут прицілювання; O – точка вильоту; A – розрахункова точка падіння).

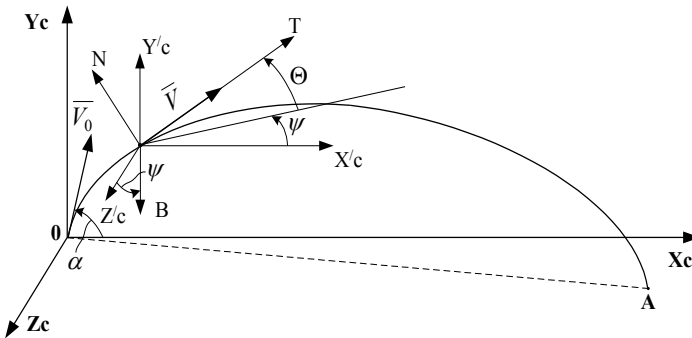


Рис. 1. До запису рівнянь руху

Вісь T цієї системи координат співпадає з вектором швидкості центра мас снаряда. Інші осі N та B доповнюють систему координат. Вісь N – нормальна до траєкторії та лежить у вертикальній площині. Вісь B – перпендикулярна осям T і N . Рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{y}_c &= V \cdot \sin \theta; & \dot{x}_c &= V \cdot \cos \theta \cdot \cos \Psi; & \dot{z}_c &= -V \cdot \cos \theta \cdot \sin \Psi; \\ \dot{V} &= \sum' F_T / m; & \dot{V} &= \sum' F_N / (mV); & \dot{V} &= -\sum' F_B / (mV \cos \theta), \end{aligned} \quad (3)$$

де x_c, y_c, z_c – координати снаряда в стартовій системі координат; V – швидкість снаряда; m – маса снаряда; θ та Ψ – кути, що визначають орієнтацію вектора швидкості відносно стартової системи координат (рис. 1); $\sum' F_T, \sum' F_N, \sum' F_B$ – проекції діючих сил на відповідні осі координат.

Для отриманої системи рівнянь треба вибрати метод розв'язання. Найбільш прийнятним для такої системи на сьогоднішній день є метод чисельного інтегрування Рунге-Кутта, що відрізняється досить простим алгоритмом та достатньою точністю обчислень.

Чисельно інтегруючи систему рівнянь при досить малому кроці h за часом при використанні $C_x(M)$, отриманих попереднім аеродинамічним розрахунком, можна визначити всі необхідні параметри траєкторії, дальність польоту. Сила опору R при цьому визначається за залежністю (2).

Розрахунки траєкторії проводяться для ключових кутів прицілювання, що відрізняються, наприклад, на 5° . Це кути $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, \dots, 50^\circ$. Результати розрахунку заносяться в таблицю. Інтерполюючи отримані результати, можна остаточно заповнити таблицю стрільби.

На практиці заключний етап створення розрахункових таблиць стрільби виглядає дещо інакше. Справа в тому, що таблиці стрільби традиційно складаються з використанням функцій опору 1943 або 1958 р. Це потребує знання коефіцієнтів форми снаряда по відношенню до цих функцій. У таблиці ці коефіцієнти подаються в залежності від кута прицілювання. Для різних кутів прицілювання коефіцієнти форми можуть значно відрізнятись.

Визначаються коефіцієнти форми снарядів $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$ таким чином. Використовуючи результати попередніх розрахунків, коли при чисельному інтегруванні використовується залежність (2) для сили опору, складемо таблицю дальностей польоту. Після цього балістичні розрахунки повторюються. Вони відбуваються на підставі інтегрування тих же самих диференціальних рівнянь (3), але для функції сили опору $F(V)_{43}$ або $F(V)_{58}$. Чисельно інтегруючи рівняння (3) методом послідовних наближень до отриманих раніше дальностей при тих же самих ключових кутах прицілювання, визначаються коефіцієнти форми снаряда $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$. Отримавши значення коефіцієнтів форми снаряда i_{43} або i_{58} при ключових значеннях кутів прицілювання $\alpha = 5, 10, 15, \dots, 50^\circ$, можна шляхом інтерполювання визначити коефіцієнти форми снаряда на будь-яких інших кутах.

Використовуючи отримані значення $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$ та знаючи початкові умови руху, можна провести повні балістичні розрахунки та скласти

розрахункові таблиці стрільби прийнятої форми. Використовуючи попередній матеріал, наводимо послідовність дій зі створення таблиць стрільби.

1. Користуючись кресленнями снаряда, функціонально задати зовнішній контур поверхні снаряда, визначити його масу та початкові швидкості.

2. За допомогою обчислювальної програми підрахувати коефіцієнт лобового опору снаряда C_x при значеннях числа Маха $M = 0,1 \div 2,5$. Скласти таблицю $C_x(M)$.

3. Увести отриману таблицю $C_x(M)$ у програму зовнішньої балістики снаряда та отримати розрахункові дальності польоту снаряда на ключових кутах прицілювання $\alpha = 5, 10, \dots, 50^\circ$. Скласти таблицю дальностей польоту.

4. Увести в програму зовнішньої балістики функцію опору $F(V)_{43}$ або $F(V)_{58}$ та шляхом послідовних наближень отримати значення коефіцієнтів форми снаряда $i = i_{43}$ або $i = i_{58}$ на тих же ключових кутах прицілювання по співпаданню дальностей польоту даного розрахунку з попереднім.

5. Увести отримані значення i в програму зовнішньої балістики разом з відповідною функцією опору $F(V)_{43}$. Інтерполюючи значення коефіцієнта форми снаряда за його значеннями на ключових кутах прицілювання, провести необхідний обсяг розрахунків на ЕОМ та заповнити таблицю стрільби у відповідному обсязі та за прийнятою формою.

Висновки. Розроблена комплексна методика створення розрахункових таблиць стрільби за кресленнями снарядів, що включає в себе розрахунок аеродинамічного опору, масових характеристик та балістичні розрахунки. Методика може використовуватися для гладких неоперених артилерійських снарядів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Handbook of supersonic aerodynamics, Section 8, Bodies of Revolution, Navweeps report 1488 (Vol. 3). U.S. Government Printing Office, Washington, October 1961.*
2. *Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 1972. – 582 с.*
3. *Расчет сопротивления трения, теплопередачи и температуры обшивки летательных аппаратов. Руководство для конструкторов самолетов и крылатых ракет. Т. 1, кн. 1, вып. 4 / В.М. Коваленко, П.П. Воротников, В.М. Фомин. – М.: Оборонгиз, 1967. – 488 с.*
4. *Коваленко В.М. Исследование плоского и осесимметричного турбулентного пограничного слоя на гладких и шероховатых поверхностях: Дисс. на соиск. уч. степ. д.т.н. – Новосибирск, 1978. – 242 с.*
5. *Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Учебник для втузов. – М.: Высш. шк., 1971. – 632 с.*

Надійшла 18.08.2004

ШИЙКО Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, старший науковий спів-

робітник наукового центру артилерії при Сумському військовому інституті РВ і А. Закінчив ХАІ у 1975 році. Область наукових інтересів – зовнішня балістика артилерійських систем.

МИХАЙЛИК Роман Юрійович, науковий співробітник Наукового центру Сумського військового інституту РВ і А. Закінчив Харківський військовий університет у 1996 році. Область наукових інтересів – зовнішня балістика артилерійських систем.
