

УДК 623.546:531.554

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1\(21\).32-34](https://doi.org/1034169/2414-0651.2019.1(21).32-34)

А.В. ГУРНОВИЧ, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,

В.Г. ТРОФИМЕНКО, науковий співробітник,
(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Методичний підхід щодо вирішення оберненої задачі зовнішньої балістики з визначення функції опору повітря польоту снаряда без використання спеціалізованого обладнання

Розглядається підхід до вирішення задачі з визначення функції опору повітря польоту снаряда на основі результатів експериментальних стрільб без застосування спеціалізованого обладнання для замірів швидкості снаряда на траєкторії польоту. Зазначений підхід забезпечує формування індивідуальних драг-функцій для різних типів снарядів що, у свою чергу, дозволяє відмовитися від еталонних функцій та, як наслідок, підвищити точність розрахунків.

Ключові слова: функція опору повітря польоту снаряда, зниження траєкторії польоту снаряда, диференціювання рівняння.

Рассматривается подход к решению задачи по определению функции сопротивления воздуха полету снаряда на основе результатов экспериментальных стрельб без применения специализированного оборудования для замеров скорости снаряда на траектории полета. Указанный подход обеспечивает формирование индивидуальных драг-функций для разных типов снарядов что, в свою очередь, позволяет отказаться от эталонных функций и, как следствие, повысить точность расчетов.

Ключевые слова: функция сопротивления воздуха полету снаряда, снижение траектории полета снаряда, дифференцирование уравнения.

Вирішення оберненої задачі зовнішньої балістики відноситься до класу найбільш складних завдань. Її вирішення пов'язано із значними труднощами, що визначаються нелінійною задачею. В той же час існує багато теоретичних рішень [1], оснований на наближеннях, що відносяться в першу чергу до виду функції опору повітря. Нерідко, при вирішенні даних задач, пошук рішення виконується методом зближення. Використання такого роду зближень приводить до деяких, іноді значних, відмінностей результату від експериментальних даних. У зв'язку з цим, найбільш точним, при рішенні даної задачі, вважається ресурсномісткий метод багаторазового чисельного рішення прямої задачі зовнішньої балістики.

Експериментальні (зовнішньо-траєкторні) методи визначення функції опору повітря [2, 3, 4, 5, 6, 7] базуються на вимірюванні швидкості польоту снаряда, що вимірюється в декількох точках ділянки траєкторії. Основними недоліками існуючих методів є:

визначення середнього значення сили опору повітря на траєкторії польоту снаряда;

виникання великих похибок замірів при малих швидкостях снарядів (внаслідок незначного опору повітря) та неможливість збільшення бази вимірювання внаслідок різкого падіння траєкторії польоту;

необхідність виконання великого обсягу робіт з підготовки вимірювань та використання складного спеціалізованого обладнання.

Метою статті є формування експериментально-теоретичного підходу щодо визначення функції опору повітря польоту снаряда без використання спеціалізованого обладнання.

Альтернативний підхід рішення даної задачі ґрунтується на зворотному рішенні системи з чотирьох диференціальних рівнянь першого порядку, що описує рух снаряда у повітрі як рух твердого тіла [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= -C_0 \times H(y) \times G(v) \\ \frac{d\Theta}{dx} &= -\frac{g}{V^2} \\ \frac{dH}{dx} &= \Theta \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{1}{V} \\ v &= V \times \sqrt{1 + \Theta^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Перше рівняння системи (1) визначає швидкість снаряда на траєкторії польоту (при початкових умовах – початкова швидкість снаряда), друге рівняння визначає кут польоту снаряда на траєкторії (при початкових умовах – кут вильоту снаряда), третім рівнянням визначається висота траєкторії польоту (при початкових умовах – висота прицілу зі знаком мінус), четверте рівняння визначає час польоту снаряда.

Падіння швидкості снаряда на траєкторії відбувається під дією сили опору повітря, яка у свою чергу

визначається балістичним коефіцієнтом C_{σ} функцією густини повітря $H(y)$ та функцією швидкості $G(v)$.

Функція густини повітря є відношення густини повітря при стрільбі (Π) до густини повітря нормальних балістичних умов (Π_{ON}):

$$H(y) = \frac{\Pi}{\Pi_{ON}}. \quad (2)$$

Нормальними балістичними умовами є: температура повітря $-15^{\circ}\text{C}+273$ (T_{ON}), тиск повітря -750 мм рт.ст. (h_{ON}), парціальний тиск водяного пару $6,35$ мм рт.ст. (e_{ON}), тобто відносна вологість 50% .

Загалом вираз для визначення густини повітря має вигляд:

$$\Pi = 13,6 \times \frac{h}{R \times T} \times \left(1 - \frac{3}{8} \times \frac{e}{h}\right), \quad (3)$$

де R – газова стала, яка для повітря складає $29,27$.

Функція швидкості $G(v)$ має вигляд:

$$G(v) = \frac{\pi \times \Pi_{ON}}{8000} \times v \times c_x \left(\frac{v}{a}\right), \quad (4)$$

де $c_x \left(\frac{v}{a}\right)$ – функція лобового опору повітря, що визначається експериментально та фактично являє собою еталонну криву опору повітря для снаряда певної (найбільш поширеної) форми в залежності від миттєвої швидкості польоту кулі.

Для визначення функції опору повітря необхідно вирішити обернену задачу зовнішньої балістики. Тобто, на основі зовнішньо-траєкторних вимірювань висоти траєкторії снаряду на певних відстанях визначити функцію лобового опору повітря польоту снаряда (драг-функцію).

Враховуючи те, що у військових умовах можливо визначити тільки кути кидання снаряду (введення поправки на дальність при стрільбі на певну дистанцію) пропонується така послідовність дій:

1. На всіх відстанях стрільби (x) з дискретністю Δ експериментально фіксується кут кидання снаряду $\gamma(x)$, де $x=0, \Delta, \dots, X$.

2. Визначається падіння траєкторії польоту снаряда як:

$$H(x) = -x \times \text{tg}(\gamma(x)). \quad (5)$$

3. Виконується апроксимація функції залежності $H(x)=f_1(x)$. Найбільш універсальною функцією апроксимації є поліноміальна функція, тобто

$$H(x) = \sum_{i=0}^m a_i x^i, \quad (6)$$

де a_i – коефіцієнти поліноміальної функції залежності падіння траєкторії польоту снаряда від дальності стрільби.

Після диференціювання рівняння (6), воно приймає вид:

$$\frac{dH}{dx} = \sum_{i=0}^m i a_i x^{i-1}. \quad (7)$$

Підставивши рівняння (7) у третє рівняння системи диференціальних рівнянь (1), та вирішуючи його відносно кута падіння снаряду $\Theta(x)$, отримаємо:

$$\Theta(x) = \sum_{i=0}^m i a_i x^{i-1}, \quad (8)$$

На основі рівняння (8) розраховуються кути падіння снарядів з відповідною дискретністю (Δ).

4. Виконується апроксимація функції залежності $\Theta(x)=f_2(x)$, тобто

$$\Theta(x) = \sum_{i=0}^m b_i x^i, \quad (9)$$

де b_i – коефіцієнти поліноміальної функції залежності кутів падіння снарядів від дальності стрільби.

Після диференціювання рівняння (9) прийме вигляд:

$$\frac{d\Theta}{dx} = \sum_{i=0}^m i b_i x^{i-1}. \quad (10)$$

Підставивши рівняння (10) у друге рівняння системи диференціальних рівнянь (1) та вирішуючи його відносно швидкості польоту снаряда, отримаємо:

$$V(x) = \sqrt{\frac{-g}{\sum_{i=0}^m i b_i x^{i-1}}}. \quad (11)$$

На основі отриманої залежності (11) на всіх відстанях стрільби (з дискретністю Δ) розраховується швидкість польоту снаряда $V(x)$.

5. Виконується апроксимація функції залежності $V(x)=f_3(x)$:

$$\frac{dV}{dx} = \sum_{i=0}^m i c_i x^{i-1}, \quad (12)$$

де c_i – коефіцієнти поліноміальної функції залежності швидкості польоту снарядів від дальності стрільби.

Підставивши рівняння (12) у перше рівняння системи диференціальних рівнянь (1) та вирішуючи його відносно функції лобового опору повітря, отримаємо:

$$C_x(V) = \frac{dV/dx}{C_{\sigma} \times H(y) \times G(v)}. \quad (13)$$

На основі отриманої залежності (13) на всіх відстанях стрільби (з дискретністю Δ) розраховується лобовий опір повітря польоту снаряда в залежності від швидкості. При проведенні розрахунків виконується приведення до нормальних умов стрільби.

Висновки. Підхід, що пропонується, дозволяє з достатньою точністю вирішувати зворотну задачу зовнішньої балістики з мінімумом наближень. Точність

визначення закону опору повітря в першу чергу забезпечується за рахунок використання у якості вихідних даних експериментальних значень стрільб. Для отримання вихідних даних немає потреби використовувати додаткове обладнання для здійснення зовнішньо-траєкторних вимірювань. До того ж їх недоліком є неможливість отримання характеристик снаряда на кінцевих ділянках траєкторії, що призводить до необхідності використання додаткового радіолокаційного устаткування на балістичній трасі.

Збір вихідних даних можливо також здійснювати поступово (в ході планових стрільб) в різні пори року, так як запропонований підхід забезпечує врахування відхилення метеорологічних показників атмосфери від нормальних умов.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Борисенко А.Д., Борисенко Н.Д., Маничев Б.В. О некоторых приближенных методах решения обратной задачи внешней баллистики. / Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». №7, 2015. Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Эл. №. ФС77-51036. ISSN 2307-0595. <http://engbul.bmstu.ru/doc/793581.html>.
2. Чернозубов А.Д., Кириленко В.Д., Разин И.И., Михайлов К.В. Внешняя баллистика (часть 1). М: Артиллерийская инженерная академия, 1954. 464 с.

3. Равдин И. Ф. Внешняя баллистика неуправляемых ракет и снарядов. М: Воениздат, 1973. 184 с.
4. Монченко Н. М. Инженерный расчётный метод определения аэродинамических характеристик снарядов ствольной артиллерии. Москва: НИИ-3, 1982. 34 с.
5. Бурдов В. В., Грабин В. В., Козлов А. Ю. Баллистика ствольных систем / под ред. Л. Н. Лысенко, А. М. Липанова. М: Машиностр., 2006. 461 с.
6. McCoy R. L. Modern Exterior Ballistics. Atglen, PA.: Schiffer Military History, 2012. 328 p.
7. Odom C. T. A revised drag coefficient, KD, based on the 8-Inch howitzer shell, HE, M106. Aberdeen proving ground, Maryland: Ballistic Research Laboratories Memorandum Report NO. 1065, 1957. 12 p.

Стаття надійшла до редколегії 26.12.2018 р.

Рецензент Б. Оліярник, д-р техн. наук, с.н.с.
(Державне підприємство ДП «ЛДЗ» «Лорта»,
м. Львів)

Рецензент В. Сенаторов, к.т.н., доцент
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)
<https://orcid.org/0000-0003-2645-0256>