

УДК 623.546

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

Сумський державний університет, Суми

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЮВАННЯ НЕКЕРОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Запропонований аналітичний метод визначення характеристик розсіювання оперених реактивних снарядів, який дозволяє аналітично, за допомогою ЕОМ, розрахувати характеристики розсіювання снарядів та значно зменшити витрати на проведення дослідних стрільб. Це є актуальним та важливим в наш час. Розроблена методика базується на використанні системи диференціальних рівнянь руху центру мас літальних апаратів.

**Ключеві слова:** некерований реактивний снаряд, розсіювання, балістичні умови стрільби.

### Постановка проблеми та аналіз літератури

В літературі з зовнішньої балістики [1, 2] надаються рекомендації з визначення характеристик розсіювання дослідним шляхом. В даній статті пропонується теоретичний метод розрахунку параметрів технічного розсіювання для некерованих літальних апаратів з реактивним двигуном на основі розв'язання системи диференціальних рівнянь руху центру мас, які добре узгоджуються з дослідними даними. Характеристики розсіювання некерованих реактивних снарядів (РС), мін розраховуються по аналогії з характеристиками розсіювання обертових снарядів, виходячи з врахування розсіювання основних балістичних параметрів розраховують траєкторію польоту РС та початкових параметрів траєкторії відповідно до умов польоту РС.

Величина розсіювання оперених РС значно більше величини розсіювання обертових снарядів. До додаткових причин, які збільшують розсіювання оперених РС належать:

ексцентриситет сили тяги реактивного двигуна встановленого на снаряді;

початкові збурення в момент зходу опереного РС з напрямної та в момент вимикання двигуна;

аеродинамічна симетрія опереного РС, нахил, деформація і несиметричність форми елементів стабілізатора внаслідок чого виникають додаткові аеродинамічні моменти, які викликають коливання опереного РС відносно центру мас.

Не розглядаючи безпосередньо вплив розсіювання метеорологічних умов польоту, визначимо характеристики так званого технічного розсіювання некерованих РС, які обумовлені розсіюванням балістичних умов стрільби.

### Викладення матеріалів дослідження

Дальність польоту РС складається з дальності активної  $X_k$  та пасивної  $X_p$  ділянок траєкторії:

$$X = X_k + X_p,$$

причому дальність пасивної ділянки траєкторії  $X_p$  визначається основними балістичними параметрами  $\theta_k$ ,  $V_k$ ,  $C_k$  та висотою  $Y_k$  кінця активної ділянки траєкторії. [3, 4].

Тому серединне відхилення точки падіння РС по дальності  $V_d$  висловимо в залежності від характеристик розсіювання параметрів  $\theta_k$ ,  $V_k$ ,  $C_k$ ,  $Y_k$ ,  $X_k$ , тобто як функцію серединних відхилень (коефіцієнтів розсіювання)  $r_{\theta_k}$ ,  $r_{V_k}$ ,  $r_{C_k}$ ,  $r_{Y_k}$ ,  $r_{X_k}$ , які визначаються дослідним шляхом. Серединним відхиленням кожного із зазначених елементів кінця активної ділянки траєкторії ( $\theta_k$ ,  $V_k$ ,  $C_k$ ,  $Y_k$ ,  $X_k$ ) відповідають складові сумарного серединного відхилення точки падіння РС по дальності:

$$V_d \partial_{\theta_k} = \frac{\partial X_p}{\partial \theta_k} r_{\theta_k}; \quad V_d \partial_{V_k} = \frac{\partial X_p}{\partial V_k} r_{V_k};$$

$$V_d \partial_{C_k} = \frac{\partial X_p}{\partial C_k} r_{C_k}; \quad V_d \partial_{Y_k} = \frac{\partial X_p}{\partial Y_k} r_{Y_k}; \quad V_d \partial_{X_k} = r_{X_k}.$$

Вважаючи елементи кінця активної ділянки траєкторії  $\theta_k$ ,  $V_k$ ,  $C_k$ ,  $Y_k$ ,  $X_k$  при даному куті кидання  $\theta_0$  незалежними випадковими величинами, одержимо наступний загальний вираз для визначення серединного відхилення точки падіння РС по дальності  $V_d$ :

$$V_d^2 = V_d^2 \partial_{\theta_k}^2 + V_d^2 \partial_{V_k}^2 + V_d^2 \partial_{C_k}^2 + V_d^2 \partial_{Y_k}^2 + V_d^2 \partial_{X_k}^2,$$

або

$$V_d = \sqrt{\left(\frac{\partial X_p}{\partial \theta_k} r_{\theta_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial X_p}{\partial V_k} r_{V_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial X_p}{\partial C_k} r_{C_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial X_p}{\partial Y_k} r_{Y_k}\right)^2 + r_{X_k}^2}, \quad (1)$$

де  $r_{\theta_k}$ ,  $r_{V_k}$ ,  $r_{C_k}$ ,  $r_{Y_k}$ ,  $r_{X_k}$  – коефіцієнт розсіювання або серединного відхилення відповідних елементів кінця активної ділянки траєкторії (кута  $\theta_k$ , швидкості  $V_k$  балістичного коефіцієнту  $C_k$ , координат  $Y_k$  і  $X_k$ );

$$\frac{\partial X_{\Pi}}{\partial \theta_k}, \frac{\partial X_{\Pi}}{\partial V_k}, \frac{\partial X_{\Pi}}{\partial C_k}, \frac{\partial X_{\Pi}}{\partial Y_k}, \left( i \frac{\partial X_{\Pi}}{\partial X_k} = 1 \right) - \text{попра-$$

вочні коефіцієнти, що враховують зміну дальності польоту РС при зміні відповідних параметрів ( $\theta_k, V_k, C_k, Y_k, X_k$ ) на одну одиницю, і визначаються за допомогою системи таких диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi / 1 - \frac{2Y}{R_3}; \\ \dot{y} = V \cdot \sin \theta; \\ \dot{z} = V \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi; \\ \dot{V} = a(t) - a_x \cos \gamma - g \cdot \sin \theta \left( 1 - \frac{2Y}{R_3} \right); \\ \dot{\theta} = - \frac{\cos \theta \cdot g \left( 1 - \frac{2Y}{R_3} \right) - a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_x \cdot \sin \theta}{V} + \left( 2 \right) \\ + \frac{V \cdot \cos \theta}{R_c + Y} + 2\Omega_3 \cos B \cdot \sin \alpha_r; \\ \dot{\psi} = \frac{a_x \cdot \cos \gamma \cdot W_z}{V} + 2\Omega_3 (\sin B - \cos B \cdot \cos \alpha_r \cdot \operatorname{tg} \theta); \\ \pi(y) = - \frac{\pi(y) \cdot \dot{y}}{R[\tau(y) + \Delta\tau]}, \end{cases}$$

де

$$\begin{aligned} a(t) &= \frac{\omega_0 \cdot I_1}{m_0 \cdot \tau_a \cdot (1 - \mu_y)}; \mu_y = \frac{\omega \cdot t}{g_0 \cdot m_0 \cdot \tau_a}; \\ a_x &= \frac{d^2}{q_n} 10^3 \pi(y) \frac{\tau_{ON}}{\tau_y} \frac{F_{58}(V_{rT})}{1 - \mu_y}; \\ \cos \gamma &= \frac{V - W_x \cdot \cos \theta}{V_r}; \\ V_r &= V \sqrt{1 - \frac{2(\omega_x \cos \theta \cdot \cos \psi + \omega_z \sin \psi \cos \theta)}{V} + \frac{\omega^2}{V^2}}; \\ W^2 &= W_x^2 + W_z^2; \\ V_{rT} &= V_r; \sqrt{\frac{\tau_{ON}}{\tau(y) + \Delta\tau}}, \end{aligned}$$

$I$  – коефіцієнт форми снаряда (міни),  $d$  – калібр снаряда (міни),  $q_n$  – вага снаряда (міни),  $\mu_y$  – функція розподілу тиску атмосфери з висотою,  $\tau_{ON}=288,9^\circ\text{K}$ ,  $\tau_y$  – розподіл віртуальної температури з висотою,  $F_{58}$  – функція опору повітря [1, 5],  $W_x, W_z$  – складові балістичного вітру,  $\theta$  – кут кидання,  $\omega_0$  – вага реактивного снаряду,  $m_0$  – маса снаряду (міни),  $I_1$  – одиничний імпульс тяги,  $\tau_a$  – час роботи двигуна,  $V$  – швидкість польоту снаряда (міни),  $t$  – час польоту снаряда,  $g_0=9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $\Delta\tau$  – відхилення віртуальної температури від табличної,  $R_3$  – радіус Землі,  $\Omega_3$  – кутова швидкість обертання землі,  $B$  – географічна широта,  $\alpha_r$  – азимут стрільби,  $Y$  – висота траєкторії польоту снаряда (міни),  $R$  – газова постійна для 1 кг сухого повітря,  $\psi$  – бокове відхилення точки падіння снаряда.

Розсіювання точки падіння РС в боковому напрямку визначається розсіюванням кута  $\psi_k$ , характеризує напрямком вектора швидкості  $V_k$  в кінці ак-

тивної ділянки траєкторії в боковій похилій площині, і розсіювання на пасивній ділянці траєкторії. У відповідності з цим сумарне серединне відхилення точки падіння РС в боковому напрямку  $B\delta$  обчислюється за формулою:

$$B\delta = \sqrt{B\delta_{\psi_k}^2 + B\delta_z^2} = \sqrt{\left( \frac{X}{955} \cdot \frac{r_{\psi_k}}{\cos \theta_k} \right)^2 + \left( \frac{X}{955} \cdot r_z \right)^2}, \quad (3)$$

де  $r_{\psi_k}$  – коефіцієнт розсіювання або серединне відхилення кута  $\psi_k$  в боковій похилій площині в тисячних;  $r_z$  – коефіцієнт розсіювання або серединне відхилення у бічному напрямку на пасивній ділянці траєкторії в тисячних.

$B\delta_{\psi_k} = \frac{X}{955} \cdot \frac{r_{\psi_k}}{\cos \theta_k}$  – перший доданок у формулі (3) являє собою серединне бокове лінійне відхилення точки падіння РС, викликане розсіюванням кута  $\psi_k$ , причому  $\frac{r_{\psi_k}}{\cos \theta_k}$  проекція кута  $r_{\psi_k}$  на гори-

зонтальній площині, а множник  $\frac{X}{955}$  переводить тисячні в лінійну величину.

Другий доданок  $B\delta_z = \frac{X}{955} \cdot r_z$  являє собою серединне бокове відхилення точки падіння РС, обумовлене дією, збурюючих факторів на пасивній ділянці траєкторії. Коефіцієнти розсіювання некерованих РС визначаються за результатами вимірювань елементів траєкторій (в кінці активної ділянки і в точці падіння) під час дослідних стрільб. Для некерованих РС з дальністю стрільби до 20 км коефіцієнти розсіювання в середньому складають:

$$\begin{aligned} r_{V_k} &= 0,25\%; \quad r_{C_k} = 1,2\%; \\ r_{\theta_k} &= 5 \div 6 \text{ тис.} \quad r_{\psi_k} = 5 \div 6 \text{ тис.} \end{aligned}$$

Коефіцієнти розсіювання  $r_{V_k}$  і  $r_{C_k}$  для реактивних і ствольних систем відрізняються незначно. Однак коефіцієнти розсіювання  $r_{\theta_k}$  і  $r_{\psi_k}$ , характеризують розсіювання напрямку вектора швидкості РС в кінці активної ділянки траєкторії, приблизно в 15 разів більше, ніж коефіцієнти розсіювання  $r_{\theta_0}$  і  $r_{\psi_0}$  для артилерійських снарядів.

Велике кутове розсіювання вектора швидкості в кінці активної ділянки траєкторії є основним фактором, який визначає значно більше розсіювання некерованих РС за напрямком і за дальністю, за умов малої дальності пуску в порівнянні зі снарядами ствольних систем.

Розглянемо вплив окремих факторів на сумарне розсіювання по дальності некерованих РС на прик-

ладі РС з невеликою дальністю пуску. Нехтуючи у формулі (1) впливом розсіювання координат  $y_k$  та  $x_k$ , для малих дальностей пуску, можна розрахувати характеристику  $V\delta$  з урахуванням перших трьох членів, що відображають вплив розсіювання параметрів:  $\theta_k$ ,  $V_k$  і  $C_k$ .

Складові сумарного розсіювання по дальності  $V\delta$  ( $V\delta_{\theta_k} + V\delta_{V_k} + V\delta_{C_k}$ ) для оперених реактивних снарядів наведені на рис. 1.

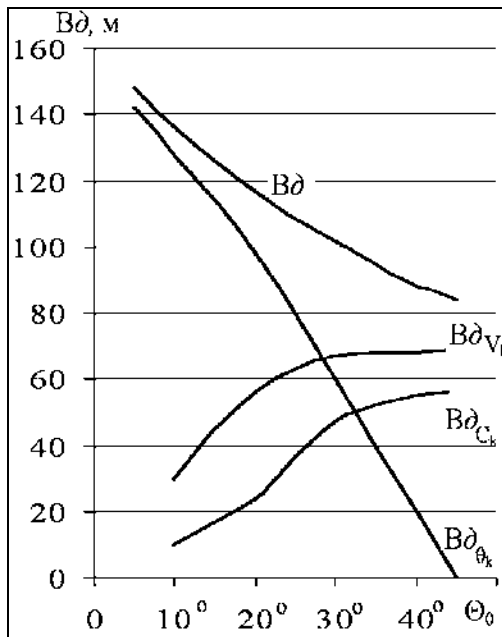


Рис. 1 Складові сумарного розсіювання по дальності для оперених реактивних снарядів

За умови малих кутів кидання або малої дальності пуску складові  $V\delta_{\theta_k}$  на порядок більше інших складових і визначають сумарне розсіювання по дальності. Оскільки розсіювання кута  $\theta_k$  для некерованих РС значне, за малої дальності стрільби відбувається велике розсіювання по дальності некерованих РС. Зі збільшенням кута кидання або дальності стрільби складові  $V\delta_{\theta_k}$  зменшується у відповідності зі зменшенням поправочних коефіцієнтів, і впливають на зменшення сумарної характеристики  $V\delta$ , незважаючи на зростання складових  $V\delta_{V_k}$  і  $V\delta_{C_k}$ . Якщо кути кидання, близькі до кута найбільшої дальності, складова  $V\delta_{\theta_k}$  мала і сумарне розсіювання по дальності визначається практично лише розсіюванням швидкості  $V_k$  та балістичного коефіцієнта  $C_k$  [2].

Отже, на відміну від артилерійських снарядів, розсіювання по дальності некерованих РС з обмеженою дальністю польоту зменшується зі збільшенням кута кидання або дальності стрільби. Це пояснюється великим розсіюванням кута  $\theta_k$  і зменшен-

ням його впливу на розсіювання по дальності із збільшенням кута кидання в межах кута найбільшої дальності.

Розсіювання точки падіння некерованих РС в боковому напрямку зростає із збільшенням дальності стрільби, як це впливає з формули (3). Визначальний вплив на розсіювання некерованих РС в боковому напрямку робить розсіювання кута  $\psi_k$ .

За умови малих кутів кидання  $V\delta < V\delta_0$  (еліпс розсіювання витягнутий в напрямку стрільби), за певних кутів кидання в діапазоні 25-35°  $V\delta = V\delta_0$  (еліпс розсіювання перетворюється в коло), а за кутів кидання, близьких до кута найбільшої дальності,  $V\delta > V\delta_0$  (еліпс розсіювання витягнутий в боковому напрямку).

Такий характер зміни серединних відхилень по дальності і за напрямком та орієнтацією еліпса розсіювання пов'язаний з домінуючим впливом на розсіювання некерованих РС по дальності і напрямку більшого за величиною кутового розсіювання, напрямку вектора швидкості в кінці активної ділянки траєкторії, причому із збільшенням кута кидання (дальності стрільби)  $V\delta$  зменшується, а  $V\delta_0$  збільшується [5, 6].

За даною методикою розроблена програма на ЕОМ на мові C++.

Програма виконує розрахунок характеристик розсіювання снарядів (мін) в залежності від дальності стрільби (кута кидання), зарядів для різноманітних артилерійських систем.

Розрахунок траєкторії польоту снарядів (мін) зводиться до розв'язання системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Результати розрахунків по запропонованій методиці і дослідним даними для РС БМ21 - ОФ без гальмівного кільця наведені в табл. 1 і на рис. 2.

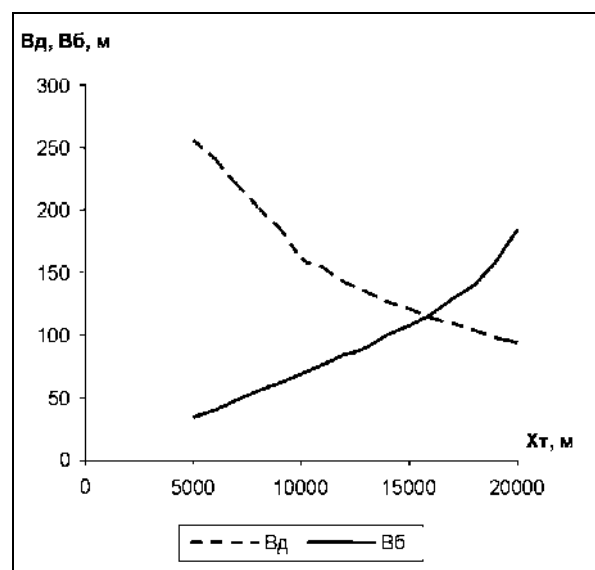


Рис. 2. Графіки характеристик розсіювання  $V\delta$ ,  $V\delta_0$  залежно від дальності стрільби

Таблиця 1

Розрахункові і дослідні дані  
характеристик розсіювання Вд, Вб 122-мм РС БМ21-ОФ (без гальмівного кільця)

	Хт, м	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
		Θ, град	7,42	8,39	9,41	10,51	12,08	13,34	15,1	17,01	19,04	21,22	23,54	26,44	29,55	33,36	38,12
Розраховані дані	Вд	256	240	222	201	186	161	153	142	135	127	121	114	109	104	99	95
	Вб	34	41	48	55	62	69	76	84	91	100	108	118	129	141	157	184
Дослідні дані	Вд	258	240	222	203	185	169	155	143	133	125	119	114	109	104	100	98
	Вб	32	40	49	57	65	72	79	86	94	102	111	120	130	141	156	179

### Висновок

1. Використовуючи запропоновану в статті систему диференційних рівнянь руху оперених реактивних снарядів дозволяє вибрати оптимальні характеристики розсіювання перспективних снарядів даного типу за рахунок вибору оптимальної швидкості обертання опереного РС на траєкторії, вибору доцільного кута нахилу оперення і його розмах.

2. Розраховані дані за запропонованою методикою розрахунку характеристик розсіювання літальних апаратів зі стабілізуючим оперінням, добре узгоджуються з дослідними даними, що дає нам підставу використовувати цю методику при розрахунку і складанні Таблиць стрільби. А це, в свою чергу, дозволяє скоротити матеріальні витрати та час на проведення дослідних стрільб.

### Список літератури

- 1 Дмитриевский А.А. Внешняя бал листика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лисенко. – М. Машиностроение, 2005. – 607 с.
- 2 Равдин И.Ф. Внешняя баллистика неуправляемых реактивных снарядов / И.Ф. Равдин. – Л.: ВАА, 1972. – 184 с.
- 3 Лисенко В.М. Теория полёту / В.М. Лисенко, Д.А. Грабчак, Д.А. Новак. – Суми СумДУ, 2006. – 203 с.
- 4 Сборник таблиц для решения задач по внешней баллистике. – М.: МО СССР, 1989. – 128 с.
- 5 Подготовка стрельбы и управления огнем артиллерии. – М.: МО СССР, 1987. – 376 с.
- 6 Стрельба наземной артиллерии: учебник. – М.: МО, 1962. – 367 с.

Надійшла до редколегії 7.04.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Дубенець, Чернігівський державний технологічний університет, Чернігів.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙВАНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

Предложен аналитический метод определения характеристик рассеивания оперенных реактивных снарядов, который позволяет аналитически, с помощью ЕОМ, рассчитывать характеристики рассеивания снарядов та существенно уменьшить затраты на проведение испытательные стрельб. Это особенно актуально та важно в наше время. Разработанная методика базируется на использовании системы дифференциальных уравнений движения центра масс летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** неуправляемый реактивный снаряд, рассеивание, баллистические условия стрельбы.

### DESIGN PROCEDURE OF CHARACTERISTICS RASSEIVANNIA OF UNCONTROLLABLE FLYING MACHINES

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

The analytical method of definition of characteristics of dispersion of plumose rockets which allows analytically, by means of computer is offered, to expect characteristics of dispersion of shells to reduce essentially that expenses for carrying out trial shooting. It is especially actual that important presently. The developed procedure bases on use of system of the differential equations of locomotion of centre of mass of flying machines.

**Keywords:** an uncontrollable rocket, dispersion, ballistic conditions of shooting.