

## АНАЛІТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТИВНИХ СНАРЯДІВ

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

*Надається спосіб обчислення маси реактивного снаряда, положення його центра мас, осьового та екваторіального моментів інерції як тіла обертання на підставі креслень снаряда. Передбачає розбивку тіла снаряда на окремі елементи типу циліндрів, прямих та обернених зрізаних конусів, елементів змінної маси.*

**Постановка проблеми.** Розв'язання задач зовнішньої балістики артилерійських снарядів пов'язано з розробкою та чисельним інтегруванням диференційних рівнянь руху, до числа яких входять рівняння руху центра мас та рівняння обертального руху відносно центра мас. Це потребує знань таких інерційних характеристик снаряда як його маса, положення центра мас та моментів інерції відносно центра мас. Важливо знати зазначені інерційні характеристики вже на стадії розробки та балістичного проектування снарядів, що значно скорочує строки створення артозброєння. Єдиним можливим шляхом визначення інерційних характеристик на цьому етапі є розрахунок. Тому розробка аналітичних способів їх знаходження являє практично важливу задачу.

**Аналіз література та мета статті.** В літературі з зовнішньої балістики [1, 3] мається досить багато публікацій, в яких розглядаються математичні моделі руху реактивних снарядів. Їх чисельна реалізація потребує обчислень масово-інерційних характеристик снарядів на кожному кроці чисельного інтегрування з урахуванням змінної маси снаряда на активній ділянці руху [1, 2]. Але ж конкретних способів аналітичного визначення інерційних характеристик снарядів за їх кресленнями знайти досить важко. Тому автори даної публікації вважають за доцільне викласти спосіб аналітичного визначення зазначених величин, який доведений до практичної реалізації і використовується при чисельному інтегруванні рівнянь руху реактивних снарядів.

**Основна частина.** Маса, положення центра мас, осевий і екваторіальний моменти інерції є основними інерційними характеристиками снаряда.

Для визначення моментів інерції існує два принципово різних шляхи –

аналітичний і експериментальний. При проектуванні користуються аналітичним методом, але при цьому доводиться робити багато припущень, щоб виготовити модель, яка б задовольняла певним вимогам.

Під час горіння порохового заряду на активній ділянці траєкторії маса його безперервно зменшується. При одночасному горінні всієї поверхні порохового заряду, як зовні, так і з середини, можна вважати, що положення центра мас його не змінюється, а маса зменшується. Це призводить до зменшення осьового моменту інерції РС і має вплив на зміни положення його центра мас. А це, в свою чергу, спричинить зміни екваторіального моменту інерції.

Знаючи початкову масу заряду та його секундні витрати можна визначити інерційні характеристики РС на протязі всього часу горіння порохового заряду. При розрахунках для визначення маси снаряда, порохового і розривного зарядів, положення центра мас і моментів інерції снаряда необхідно поперечними перерізами розділити на елементарні частини (конуси, зрізані конуси та циліндри) окремо оболонку і спорядження (рис. 1).

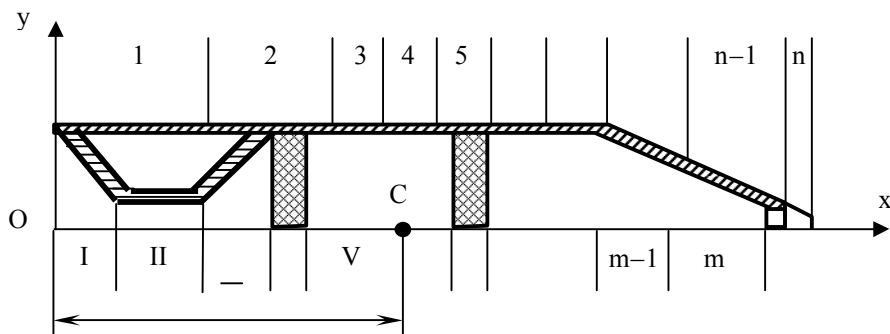


Рис. 1. Схема перерізів реактивного снаряда

При цьому дуга твірної головної частини снаряда може бути поділена на ціле число рівних частин. Одержані відрізки дуг замінюються хордами, а елементарні частини, які складають головну частину снаряда, розглядаються як зрізані конуси.

При визначенні об'ємів фігур (циліндра, зрізаного конуса і конуса) користуються формулами:

$$V_{\text{ц}} = \pi R^2 h; \quad V_{\text{зк}} = \pi/3(R^2 + Rr + r^2)h; \quad V_{\text{к}} = \pi/3R^2 h,$$

де  $R$  – радіус більшої основи фігури;  $r$  – радіус меншої основи фігури;  $h$  – висота фігури.

Для спрощення розрахунків у формулу об'єму зрізаного конуса введемо величину  $\rho = r/R$ .

Тоді:  $V_{зк} = 1/3\pi R^2(1 + r/R + r^2/R^2)h = 1/3\pi R^2(1 + \rho + \rho^2)h$ .

Позначивши  $\alpha = \pi/3(1 + \rho + \rho^2)$ , отримаємо формулу для визначення об'єму зрізаного конуса:

$$V_{зк} = \alpha R^2 h. \quad (1)$$

Ця перетворена формула являє собою загальну формулу для обчислення об'ємів фігур, які розглядаються. Так для циліндра ( $r = R$ ,  $\rho = 1$ )  $\alpha = \pi$ ; для конуса ( $r = 0$ ,  $\rho = 0$ ),  $\alpha = \pi/3$ .

Маса остаточно спорядженого снаряда складається із маси оболонки (об), спорядження (сп) і підривника (підр).

$$M = m_{об} + m_{сп} + m_{підр}.$$

Маса металу оболонки і спорядження визначається за формулами:

$$m_{об} = V_{об} \cdot \gamma_{об}; \quad m_{сп} = V_{сп} \cdot \gamma_{сп}; \quad [m] = \text{кг}; \quad [\gamma] = \text{кг/м}^3; \quad [V] = \text{м}^3,$$

де  $V_{об}$  – об'єм металу оболонки;  $\gamma_{об}$  – густина металу оболонки;  $V_{сп}$  – об'єм камери (спорядження);  $\gamma_{сп}$  – середня густина однорідного спорядження (розривного заряду, порохового заряду).

Об'єм металу оболонки снаряда визначається як різниця між сумами об'ємів елементарних частин по зовнішньому окресленню (корпусу)  $V_{корп}$  та його внутрішньому окресленню (порожнині)  $V_{пор}$  оболонки

$$V_{\text{об}} = \sum_{i=1}^n V_{z_{\text{вн}}} - \sum_{i=1}^m V_{z_{\text{вн}}}.$$

В результаті перерізу снаряда на частини практично утворюються три геометричні форми: циліндр, зрізаний конус і конус, об'єми яких розраховуються за формулою (1):

$$V_{сп} = \sum_k^m V_{i,сп}.$$

При розробці снаряда маса підривника звичайно задається.

Для визначення положення центра мас снаряда необхідно перш за все знайти моменти мас елементів його складових (оболонки, спорядження і підривника) відносно будь-якого перетину, перпендикулярного до вісі снаряда. Але оскільки положення центра мас прийнято вказувати відносно донного зрізу снаряда, то й моменти маси необхідно розрахувати відносно нього.

Положення центра мас снаряда відносно донного зрізу визначається за формулою

$$X_C = \frac{M}{m} = \frac{M_{об} + M_{сп} + M_{підр}}{m},$$

де  $M$  – момент маси снаряда відносно донного зрізу;  $X_C$  – відстань від донного зрізу снаряда до його центра мас;  $m$  – маса снаряда.

Моменти маси оболонки і спорядження визначаються за формулами:

$$M_{об} = m_{об} X_{об}; \quad M_{сп} = m_{сп} X_{сп}.$$

Якщо замінити маси елементів добутком їх об'єму на відповідну густину, то одержимо:

$M_{об} = V_{об} X_{об} \gamma_{об} = M(V_{об}) \gamma_{об}; \quad M_{сп} = V_{сп} X_{сп} \gamma_{сп} = M(V_{сп}) \gamma_{сп},$   
де  $M(V_{об}), M(V_{сп})$  – моменти об'ємів оболонки і спорядження;  $X_{об}, X_{сп}$  – відстань від донного зрізу до центрів мас оболонки і спорядження.

Так як моменти маси оболонки і спорядження складаються із моментів мас окремих геометричних фігур, то:

$$M_{об} = (V_{корп} X - V_{пор} X) \gamma_{об} = \left( \sum_{i=1}^n V_{i\text{корп}} X_i - \sum_{k=1}^m V_{i\text{пор}} X_i \right) \gamma_{об};$$

$$M_{сп} = V_{сп} X \gamma_{сп} = \left( \sum_{k=1}^m V_{i\text{сп}} X_i \right) \gamma_{сп}.$$

Відстань між центром мас кожної елементарної фігури і донним зрізом снаряда  $X_i$  визначається за формулою

$$X_i = l_i + \xi_i,$$

де  $l_i$  – відстань між донним зрізом снаряда і основою елементарної фігури, зверненою до дна снаряда (визначається вимірюванням по кресленню);  $\xi_i$  – відстань між указаною основою і центром мас елементарної фігури.

Для зрізаного конуса, повернутого більшою основою до дна снаряда

$$\xi = \beta h,$$

$$\text{де } \beta = \frac{1 + 2\rho + 3\rho^2}{4(1 + \rho + \rho^2)}.$$

В тих випадках, коли зрізаний конус повернутий більшою основою до вершини снаряда при обчисленні  $\xi$ , користуються формулою:

$$\xi_{зк} = (1 - \beta) h.$$

Для циліндра та конуса відповідно  $\xi_{ц} = 1/2$ ,  $\xi_{к} = 1/4$ .

Осьовим моментом інерції снаряда називається момент інерції відносно осі симетрії. Він дорівнює сумі полярних моментів інерції його елементів

$$A = A_{об} + A_{сп} + A_{підр}.$$

Осьовий момент інерції об'ємів фігур визначається за формулою:

$$A(V) = \mu V R^2; \quad \mu = 0,3 \frac{1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{1 + \rho + \rho^2}; \quad \mu_{ц} = \frac{1}{2}; \quad \mu_{к} = 0,3.$$

Екваторіальним моментом інерції снаряда називається момент інерції відносно екваторіальної осі, яка проходить через його центр мас

$$B = B_{об} + B_{сп} + B_{підр}.$$

Екваторіальний момент інерції об'єктів фігур визначається за формулою:

$$B(V) = A(V)/2 + vVh^2 + V(\lambda)^2;$$
$$v = \frac{3}{80} \cdot \frac{(1+\rho)^4 + 4\rho^2}{(1+\rho+\rho^2)^2}; \quad v_{\text{ц}} = \frac{1}{12}; \quad v_{\text{к}} = \frac{3}{80},$$

де  $\lambda = |X_{\text{с}} - X_{\text{і}}|$  – відстань між центром мас снаряда і центром мас фігури, яка розглядається.

За значеннями полярного і екваторіального моментів інерції можна робити висновки про балістичні властивості снаряда. Виходячи з викладеного вище, оболонку снаряда розглядаємо як суцільне тверде тіло, в якому є порожнини, що не мають маси. Тобто оболонка снаряда являє собою тверде тіло, з якого вирізано частини маси. Отже, можна користуватися одними і тими ж формулами, якщо умовитись, що доданки, котрі відповідають відкинутим масам, брати з від'ємними знаками. Густина  $\gamma$  елемента порожнини будемо записувати зі знаком “мінус” густини оболонки, тобто використаємо метод від'ємних мас.

**Висновки.** Розроблено спосіб аналітичного визначення маси снаряда, положення центра мас, осьового та екваторіального моментів інерції реактивних снарядів. Спосіб придатний для використання при чисельному інтегруванні системи диференціальних рівнянь руху з метою отримання розрахункових таблиць стрільби та при розв'язанні інших задач балістики реактивних снарядів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Правдин В.М., Шанин А.П. Баллистика неуправляемых летательных аппаратов. – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 1999. – 496 с.
2. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 1991. – 582 с.
3. Боеприпасы наземной артиллерии. Учебник. Часть I / Под ред. Н.А. Селезнева, П.И. Чекалина. – М. Воениздат МО СССР, 1970. – 248 с.
4. Краткий физико-технический справочник. Том II / Под ред. К.П. Яковлева. – Госфизматлит, 1962. – 420 с.

Надійшла 24.10.2003

**ШИЙКО Олександр Миколайович**, канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник наукового центру артилерії при Сумському військовому інституті РВ і А. Закінчив ХАІ у 1975 р. Область наукових інтересів – зовнішня балістика артилерійських систем.

**МИХАЙЛИК Роман Юрійович**, ад'юнкт очної ад'юнктури Сумського військового інституту РВ і А. Закінчив Харківський військовий університет у 1996 р. Область наукових інтересів – зовнішня балістика артилерійських систем.