

ОЦІНКА ЧУТЛИВОСТІ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВИХ ОСКОЛКОВО-ФУГАСНИХ СНАРЯДІВ ДО НАВАНТАЖЕНЬ ПРИ ПОСТРІЛІ

Стаття присвячена актуальній проблемі підвищення точності ведення вогню радіально-осьовими снарядами та їх чутливості до комплексу збурюючих навантажень, які виникають у процесі пострілу. Значну увагу акцентовано на дослідженні впливу непрямої осі каналу ствола гармати як одного з ключових факторів. Запропоновано якісний метод оцінки чутливості радіально-осьових снарядів до комплексу збурюючих навантажень, які неминуче виникають у процесі пострілу. Метод дослідження полягає у детальному порівнянні власних частот коливань радіально-осьових снарядів зі спектром частот тих збурюючих навантажень, що діють на снаряд у момент пострілу та його руху каналом ствола, що дозволяє ідентифікувати потенційні резонансні явища та оцінити ступінь впливу динамічних процесів стабільності снаряду.

Проведений аналіз впливу співвідношення між власними частотами снаряду та збурюючими навантаженнями, що впливають на інтенсивність розвитку коливальних процесів снаряду під час руху каналом ствола. Для кількісної оцінки впливу введено критерій – коефіцієнт динамічності. Розглянуто аспекти застосування запропонованого методу для всебічної оцінки існуючих конструкцій радіально-осьових снарядів різних типів, також визначено рівень їхньої відносної чутливості до навантажень, зумовлених непрямою осі каналу ствола.

Представлено результати розрахунків коефіцієнтів динамічності для різних видів коливань радіально-осьових снарядів, що виникають як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах. Також, наведено статистичні дані у вигляді відсоткових показників для вибірки стволів танкових гармат, які характеризуються інтенсивними режимами коливань різних типів радіально-осьових снарядів під час пострілу. тим самим з запропоновано методу якісної оцінки динамічної чутливості радіально-осьових снарядів, що поєднує характеристики зовнішнього впливу з балістичними параметрами снаряда.

Ключові слова: радіально-осьовий снаряд, осколок, чутливість до навантажень, непрямої осі каналу ствола, власні частоти коливань, коефіцієнт динамічності, точність стрільби.

Вступ та постановка проблеми. Як показав досвід російсько-української війни та аналіз опрацьованих джерел, найбільш ефективними засобами ураження живої сили противника залишаються радіально-осьові снаряди, оскільки дані зразки не піддаються жодним зовнішнім впливам технічних засобів застосованих противником. Адже цей тип снарядів один з небагатьох, який може ефективно уражати живу силу та бойове техніку противника на досить великих відстанях. У статті запропоновано метод для всебічної оцінки існуючих конструкцій радіально-осьових снарядів різних типів, визначено рівень їхньої відносної чутливості до навантажень, зумовлених непрямою осі каналу ствола.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результат проведеного аналізу наукових джерел та праць показали, що різні конструкції радіально-осьові снаряди демонструють схильність до коливальних процесів за різними координатами під впливом збурюючих сил, що має значний вплив на ефективність ураження ними живої сили та легкоброньованої бойової техніки. На сьогодні характер руйнування навантажених вибухом циліндричних оболонок достатньо вивчений. Значний внесок в вивчення характеру вибуху, дроблення оболонки на осколкові фракції крім іноземних авторів [1] зробили. Селіванов В.В [2], Ткаченко А. [3], Сидоренко Ю.М [4,5], Літвінчук Р. В., Левченко А. О. [6] та Кушнір О. [7] дослідили основні чинники, які визначають ймовірність ураження елементів моторного та

бойового відділення легкоброньованої техніки при впливі осколкових боеприпасів. Однак у своїй роботі вони недостатньо дослідили конструкцію радіально-осьових снарядів різних типів, не визначено рівень їхньої відносної чутливості до навантажень, зумовлених непрямолінійністю осі каналу ствола.

Метою статті є: проведення аналізу впливу співвідношення між власними частотами снаряда та частотами збурюючих навантажень на інтенсивність розвитку коливальних процесів. Розробка методу для всебічної оцінки існуючих конструкцій радіально-осьових снарядів різних типів, визначення рівня їхньої відносної чутливості до навантажень, зумовлених непрямолінійністю осі каналу ствола.

Виклад основного матеріалу. У військовій справі точність артилерійського вогню є критично важливим фактором. Оскільки на траєкторію радіально-осьових снарядів значний вплив мають збурюючі навантаження, що виникають під час пострілу. Одним із ключових джерел таких навантажень є непрямолінійність дійсної осі каналу ствола гармати.

Тому для якісної оцінки ступеня чутливості радіально-осьових снарядів до навантажень, зумовлених непрямолінійністю каналу ствола, може бути застосований метод порівняння власних частот коливань снаряда зі спектром частот збурюючих навантажень. Де з практичної точки зору, оптимальним є максимальна відмінність між цими частотами, оскільки це мінімізує резонансні явища та інтенсивність коливань. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити ефективність конструктивних рішень, спрямованих на покращення характеристик радіально-осьових снарядів.

Згідно з теорією коливань, для повного усунення інтенсивних коливань мінімальна власна частота коливань радіально-осьових снарядів w_{msn} повинна щонайменше вдвічі перевищувати максимальну частоту збурюючого навантаження β_{max}

$$w_{msn} \geq 2\beta_{max} \quad (1)$$

Тому для кількісної оцінки інтенсивності коливального процесу використовується коефіцієнт динамічності K_d , який визначається за формулою:

$$K_d = \frac{1}{1 - \left(\frac{\beta}{w}\right)^2}, \quad (2)$$

де w – власна частота радіально-осьового снаряду,
 β – домінуюча частота зовнішнього впливу.

Вирази (1) та (2) є взаємопов'язаними для оцінки чутливості радіально-осьових снарядів. Умова (1) відповідає допустимому значенню коефіцієнта динамічності $K_{дин} = 1,33$. Для мінімізації початкових збурень радіально-осьового снаряду на етапі проектування необхідно забезпечити значення $K_d = 1,33$. В іншому випадку коливання снаряда перебуватиме в зоні резонансу, обмеженій відношеннями частот $\beta > 0,70$ при $w > 1,35$. Тоді $\beta/w < 1$, де коливання відбуваються у фазі зі збуренням, а при $\beta/w > 1$ – у протифазі.

Важливо зазначити, що перевищення $K_{дин} = 1,33$ не є безумовним критерієм для бракування ствола чи модернізації радіально-осьового снаряду. Однак це свідчить про підвищений рівень початкових збурень, які можуть варіюватися залежно від ступеня непрямолінійності конкретного ствола, що ускладнює приведення гармат до нормального бою.

Встановлене значення $K_{дин} = 1,33$ не є абсолютною величиною. Допускаючи певний рівень розкиду радіально-осьового снаряду, можна коригувати це значення. Таким чином,

задаючи допустимий коефіцієнт K_d , на етапі проектування можна адаптувати радіально-осьовий снаряд до існуючого рівня технології виготовлення гармат, щоб забезпечуючи при цьому розкид, що не перевищує заданого допуску. За допустимий рівень розкиду може бути прийнята, наприклад, похибка методів приведення гармат до нормального бою.

Рекомендована умова $K_{дин} = 1,33$ є досить жорсткою і спрямована на повне усунення інтенсивних коливань. На практиці, у разі потреби забезпечення певних характеристик радіально-осьових снарядів (наприклад, пробивна здатність осколкового поля), це обмеження може бути послаблене з допущенням деякого розкиду осколків у просторі.

Для оцінки чутливості різних радіально-осьових снарядів до збурюючих навантажень від непрямолінійності стволів гармат було проведено серію розрахунків коефіцієнтів динамічності K_d для різних типів коливань. Усереднені результати цих розрахунків наведено в табл. 1, де $K_{дв}$ – коефіцієнт динамічності поперечних коливань, $K_{дв}$ – кутових коливань, $K_{д1}$ – першого тону згинальних коливань, а $K_{д2}$ – другого тону згинальних коливань.

Таблиця 1.

Середні значення коефіцієнтів динамічності	
Радіально-осьовий снаряд	Коефіцієнт динамічності
	$K_{дв}$
Вертикальна площина	
ЗБМ15	1,001
ЗБМ26	1,003
ЗБМ32	1,002
ЗБМ42	1,001
Горизонтальна площина	
ЗБМ15	1,001
ЗБМ26	1,004
ЗБМ32	1,002
ЗБМ42	1,002

Аналіз табл. 1 показує, що значення $K_{дв}$ та $K_{дв}$ для всіх розглянутих радіально-осьових снарядів близькі до одиниці. Це свідчить про те, що при розгляді радіально-осьових снарядів як твердого тіла, навантаження від непрямолінійності каналу ствола можна вважати статичними з похибкою менше ніж 5%.

Натомість, значення $K_{д1}$ значно перевищують одиницю для всіх радіально-осьових снарядів, що вказує на значний вплив непрямолінійності стволів гармат на згинальні коливання снарядів. Це означає, що коливання радіально-осьового снаряду під час пострілу відбуваються в зоні дії динамічних збурень від непрямолінійності каналу ствола.

Таблиця 2.

Процентний склад стволів, що характеризуються інтенсивним режимом коливань радіально-осьових снарядів $K_{д1} = 1,33$

Радіально-осьовий снаряд	Процент стволів
	вертикальна площина
ЗБМ15	9,0
ЗБМ26	72,7
ЗБМ32	21,2
ЗБМ42	72,7

У табл. 2 представлено процентний склад стволів гармат, для яких характерний інтенсивний режим коливань радіально-осьових снарядів $K_{д1} = 1,33$. Аналіз цих даних демонструє, що ЗБМ26 та ЗБМ42 мають найвищу чутливість до непрямої стволів, тоді як ЗБМ15 є найменш чутливим, що узгоджується з результатами експериментальних досліджень ЗБМ32 займає проміжне положення за цим показником [1].

З наведеного аналізу випливає, що для повного усунення інтенсивних коливань необхідно, щоб домінуюча частота збурюючого навантаження була щонайменше вдвічі меншою за мінімальну власну частоту коливань радіально-осьових снарядів.

Сучасні конструкції гармат та рівень технологій їх виготовлення вимагають, щоб для уникнення інтенсивних коливань радіально-осьового снаряду частота основного тону згинальних коливань снаряда становила не менше 700 Гц. Однак існуючі зразки радіально-осьових снарядів характеризуються частотами в діапазоні 270...540 Гц.

Отже, пошук шляхів підвищення власних частот згинальних коливань радіально-осьових снарядів є актуальним завданням, що має важливе теоретичне та практичне значення. Вирішення цієї задачі на етапі проектування дозволить обґрунтовано підходити до формування необхідного спектра власних частот радіально-осьового снаряду.

Аналіз факторів, що впливають на власні частоти згинальних коливань, показує, що їх підвищення може бути досягнуто шляхом раціонального вибору типу, кількості та схеми розміщення ведучих поясів радіально-осьових снарядів вздовж його активної частини, а також застосування спеціальних конструктивних рішень.

На основі викладеного підходу розроблено методику якісної оцінки динамічної чутливості радіально-осьових снарядів до навантажень від непрямої каналу ствола, яка включає наступні етапи:

- Визначення домінуючих частот β функції впливу для конкретних мікропрофілів каналу ствола гармати та кожної конструкції радіально-осьового снаряду з різною залежністю переміщення від часу.

- Визначення спектрів власних частот коливань для кожної конструкції радіально-осьового снаряду.

- Розрахунок коефіцієнтів динамічності K_d за наведеними формулами та оцінка рівня динамічної чутливості радіально-осьових снарядів на їх основі.

Перевагою запропонованої методики є її здатність комплексно пов'язувати характеристики зовнішнього впливу на радіально-осьового снаряду з його балістичними та динамічними параметрами, що є важливим кроком у вдосконаленні артилерійських боєприпасів.

Висновки. Проведені дослідження надають можливість якісно оцінити чутливість радіально-осьових снарядів до збурюючих навантажень, що виникають під час пострілу, зокрема, до впливу непрямої осі каналу ствола. Запропонований метод, що базується на порівнянні власних частот коливань снарядів зі спектром частот збурень та аналізі коефіцієнта динамічності, показав свою ефективність у визначенні схильності різних конструкцій радіально-осьових снарядів до коливальних процесів.

Аналіз отриманих результатів для конкретних зразків радіально-осьових снарядів ЗБМ15, ЗБМ26, ЗБМ32, ЗБМ42 виявив значні відмінності в їхній чутливості до згинальних коливань, спричинених непрямої каналу ствола. Зокрема, ЗБМ26 та ЗБМ42 продемонстрували найвищу чутливість, що може негативно впливати на точність стрільби з гармат, що мають значну кривизну каналу ствола. Натомість, ЗБМ15 виявився найменш чутливим до цього фактору.

Результати дослідження дають можливість здійснити урахування динамічних характеристик радіально-осьових снарядів на етапі проектування. Забезпечення значної відмінності між власними частотами коливань снаряда та домінуючими частотами

збурюючих навантажень є ключовим фактором для мінімізації початкових збурень та підвищення купчастості стрільби. Запропонована методика якісної оцінки може бути використана для обґрунтованого вибору конструктивних рішень, спрямованих на зниження чутливості радіально-осьових снарядів до зовнішніх динамічних впливів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Army Combat Systems Test Activity Aberdeen Proving Ground MD. Static testing of high explosive munitions for obtaining fragment spatial distribution. 1993. 72 p.
2. Селіванов В.В. Засоби ураження та боєприпаси. Москва: МГТУ ім. М.Е. Баумана., 2008. 984 с.
3. Оцінка ефективності осколкового ураження одиночної цілі одним пострілом у випадку наземного підриву осколково-фугасного снаряду / А. Ткаченко та ін. Труды університету. 2016. № 3. С. 200–209.
4. Сидоренко Ю. М. Особливості процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків, що входять до складу осколково-пучкового снаряда. *Зб. наук. праць Академії ВМ Сім. П.С. Нахімова*. 2012. № 1(19). С. 86–99.
5. Сидоренко Ю. М. Компьютерное моделирование процесса взрывного метания разрезанного осколочнообразующего диска. *Озброєння та військова техніка*. 2014. № 1. С. 34–41.
6. Літвінчук Р. В., Левченко А. Графо-аналітичний метод визначення ймовірності ураження елементів моторного та бойового відділення легко броньованої техніки загальновійськових підрозділів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. № 2(8). С. 63–71.
7. Кушнір О., Кушнір В. Дослідження властивостей високонадійної системи із захистом у випадку пуассонівського процесу відновлення. *Теорія ймовірностей та математична статистика*. 2017. № 96. С. 125–130.

REFERENCES:

1. Army Combat Systems Test Activity Aberdeen Proving Ground MD, (1993). Static testing of high explosive munitions for obtaining fragment spatial distribution. Technical Report.
2. Selivanov V.V., (2008), “Sredstva porazheniya i boeprisasi” [Weapons of destruction and ammunition], MG TU im. N.E. Baum., Moskva, 984 p.
3. Tkachenko A.A., Soloviov V.I., Pavlenko A.H. and Kopashynskiy S.A., (2016) “Otsinka efektyvnosti oskolkovoho urazhennia odynochnoi tsili odnym postrilom u vypadku nazemnoho pidryvu oskolkovo-fugasnoho snariadu” [Evaluation of the effectiveness of fragmentation damage to a single target with a single shot in the case of ground-based detonation of a high-explosive fragmentation projectile], *Trudy universytetu*, No. 3, pp. 200-209.
4. Sydorenko Yu.M., (2012). “Osoblyvosti protsesu vybukhovoho metannia oskolkoutvoriuiuchykh dyskiv, shcho vkhodiat do skladu oskolkovo-puchkovoho snariada” [Features of the process of explosive throwing of fragmentation-forming disks that are part of a fragmentation-beam projectile]. *Zb. nauk. prats Akademii VM Sim. P.S. Nakhimova*, No. 1(19), pp. 86–99.
5. Sidorenko Yu.M. (2014), “Kompyuternoe modelirovanie protsesa vzryvnogo metaniya razrezannogo oskolochnoobrazuyushchego diska” [Computer simulation of the process of explosive throwing of a cut fragment-forming disk.], *Ozbroennya ta viyskova tekhnika*, No. 1, pp. 34–41.
6. Litvinchuk R.V. and Levchenko A.O. (2021). “Hrafo-analitychnyi metod vyznachennia ymovirnosti urazhennia elementiv motornoho ta boiovoho viddilennia lehko bronovanoi tekhniki zahalnoviyskovykh pidrozdiliv” [A graph-analytical method of determining the probability of damage to the elements of the motor and combat department of lightly armored vehicles of the combined military units]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*, No. 2 (8), pp. 63 – 71.
7. Kushnir O., Kushnir V. Investigation of the properties of a high -reliable system with protection in the case of the Poissonic recovery process. *Probability theory and mathematical statistics*. 2017. № 96. P. 125–130.

ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF RADIAL-AXIAL HIGH-EXPLOSIVE
FRAGMENTATION PROJECTILE TO LOADS DURING FIRING

The article is devoted to the urgent problem of increasing the accuracy of firing radial-axial shells and their sensitivity to the complex of disturbing loads that arise during the shot. Considerable attention is paid to the study of the influence of the non-linearity of the axis of the gun barrel as one of the key factors. A qualitative method for assessing the sensitivity of radial-axial projectiles to a complex of disturbing loads that inevitably arise during the firing process is proposed. The research method consists in a detailed comparison of the natural frequencies of oscillations of radial-axial projectiles with the frequency spectrum of those disturbing loads that act on the projectile at the moment of firing and its movement through the barrel, which allows identifying potential resonance phenomena and assessing the degree of influence of dynamic processes on the stability of projectiles.

An analysis of the influence of the ratio between the natural frequencies of the projectile and the frequencies of disturbing loads on the intensity of the development of oscillatory processes was carried out. A special criterion was introduced to quantitatively assess the influence - the dynamic coefficient. Aspects of the application of the proposed method for a comprehensive assessment of existing designs of radial-axial shells of various types are considered, and the level of their relative sensitivity to loads caused by the non-linearity of the axis of the barrel bore is determined.

The results of numerous calculations of dynamic coefficients for various types of radial-axial projectile vibrations occurring in both vertical and horizontal planes are presented. Also, statistical data in the form of percentages for a sample of tank gun barrels characterized by intense vibration modes of different types of radial-axial projectiles during firing. Thus, a method for qualitative assessment of the dynamic sensitivity of radial-axial projectiles is proposed, which combines the characteristics of external influences with the ballistic parameters of the projectile.

Keywords: radial-axial projectile, sensitivity to loads, non-linearity of the barrel bore, natural frequencies of oscillations, dynamic coefficient, accuracy of shooting, radial-axial projectile.

