

АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОЕФІЦІЄНТА НАВАНТАЖЕННЯ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСКОЛКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПРОБИВНУ ЗДАТНІСТЬ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВИХ ОСКОЛКОВО-ФУГАСНИХ СНАРЯДІВ

Досліджено вплив відносного заряду вибухової речовини (коефіцієнта навантаження) та параметра форми осколків на балістичну ефективність радіально-осьових осколково-фугасних снарядів, особливо їхню пробивну здатність.

Проаналізовано наявні моделі прогнозування швидкостей осколків та виявлено їхні обмеження. Запропоновано нові аналітичні вирази для розрахунків початкової та убійної швидкостей, що базуються на рівномірному розподілі енергії осколків за їхніми масами, що є більш фізично обґрунтованим підходом.

Визначено критичне значення коефіцієнта навантаження для пробиття типової сталевий перешкоди (3 мм). Розглянуто залежність глибини занурення осколка від коефіцієнта навантаження та вплив форми осколків. Виявлено нелінійний характер цієї залежності та значне зниження пробивної здатності для видовжених осколків.

Ці результати є ключовими для оптимізації конструкції осколкоутворюючих частин снарядів, підвищуючи їхні уражаючі можливості проти живої сили, захищеної сучасними броньованими засобами.

Ключові слова: *радіально-осьовий осколково-фугасний снаряд, коефіцієнт навантаження, параметр форми осколка, балістична ефективність, початкова швидкість осколка, убійна швидкість осколка, мінімальний заряд вибухової речовини, глибина пробиття перешкоди.*

Постановка проблеми. Незважаючи на значний прогрес у вивченні кінетики осколкоутворення та балістичної дії осколково-фугасних снарядів, низка фундаментальних питань залишається предметом активних наукових дискусій. Більшість наявних досліджень зосереджуються на емпіричних або напівемпіричних залежностях глибини пробиття перешкоди залежно від маси та швидкості осколків. Однак функціональний зв'язок між параметричними значеннями снарядів, як-от коефіцієнт навантаження, та параметрами осколкового потоку, що визначають його пробивну здатність, досліджений недостатньо.

Зокрема, залишається маловивченим вплив геометричної конфігурації осколкових елементів, що кількісно описується параметром форми, на їхню балістичну ефективність. Поширені методики проєктування часто не враховують складний характер взаємодії форми осколка з процесом його проникнення у перешкоду, що може призводити до неоптимальних конструкторських рішень.

Крім того, традиційні моделі для оцінювання початкової та убійної швидкостей осколків часто ігнорують необхідність забезпечення рівномірного розподілу кінетичної енергії між осколками різної маси. Це може спричинити значні похибки під час прогнозування мінімальної маси вибухової речовини, необхідної для гарантованого ураження цілі [1]. Отже, є потреба у розробленні більш адекватних теоретичних підходів, що враховують енергетичні аспекти фрагментації та балістичної дії осколкового поля, зважаючи на масові розподіли та геометричні характеристики осколків.

Недостатньо досліджено також вплив відносного видовження осколків на їхню пробивну здатність. Емпіричні залежності, які враховують параметр форми, часто мають обмежений діапазон застосування і потребують подальшого теоретичного обґрунтування з огляду фізики вибуху та балістики. Проте кількісна оцінка зниження пробивної здатності видовжених осколків є важливою для оптимізації процесу фрагментації та підвищення ефективності осколкових полів для радіально-осьових осколково-фугасних (РООФ) снарядів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результат проведеного аналізу наукових праць засвідчує, що відповідно до проведених досліджень наявних типів снарядів найімовірнішими засобами ураження живої сили противника є артилерійські системи. На сьогодні аспект цих питань достатньо вивчений. Значний внесок у дослідження характеру вибуху, дроблення оболонки на осколкові фракції зробили В. Яковенко Ю. Сидоренко, І. Чепков, М. Васьківський та інші науковці.

Учені розглядали також вплив коефіцієнта навантаження снаряда та геометричних характеристик осколкових полів РООФ снарядів, що впливає на їхню балістичну ефективність, яка кількісно оцінюється глибиною пробиття перешкоди.

Метою статті є фізичне обґрунтування теоретичної моделі, яка комплексно описує вплив коефіцієнта навантаження снаряда та геометричних характеристик осколкових полів, що впливає на їхню балістичну ефективність, яка оцінюється глибиною пробиття перешкоди, а також встановлення кількісних закономірностей, що описують вплив коефіцієнта навантаження та параметра форми осколкових елементів на глибину пробиття перешкоди зі сталевим еквівалентом осколковими полями радіально-осьових осколково-фугасних снарядів.

Виклад основного матеріалу. Під час проєктування РООФ снарядів одним із основних завдань є оптимізація передачі енергії, що виділяється у процесі детонації розривного заряду (РЗ), осколкам, з метою підвищення їхньої балістичної ефективності, яка безпосередньо визначає імовірність ураження цілі. Коефіцієнт навантаження $\beta = (m_{ep} / M)$ є ключовою характеристикою, що відображає відносний вміст енергонесучості РЗ у снаряді та, відповідно, потенційну енергію, яка може бути конвертована в кінетичну енергію осколкового поля [3, 6]. Однак ефективність цього перетворення енергії є складною функцією багатьох чинників, включно з геометричною конфігурацією РООФ снаряда, фізико-механічними властивостями матеріалу корпусу, ініціюванням процесу детонації та характеристики динамічного руйнування матеріалу, що визначають процес фрагментації за допомогою аналітичних моделей для оцінювання початкової швидкості осколків, таких як напівемпірична формула Покровського [4, 7]:

$$v_0 = D \sqrt{\frac{\beta}{2 + \beta}}, \quad (1)$$

де D – швидкість детонації РЗ, яка хоча й отримала широке застосування в інженерній практиці, проте має низку принципів обмежень, що знижують її прогностичну здатність.

По-перше, ці обмеження не враховують енергетичні витрати, пов'язані з незворотними процесами пластичної деформації та руйнування матеріалу корпусу снаряда в процесі його фрагментації на окремі осколки.

По-друге, вони не відображають статистичний характер розподілу енергії між осколками різної маси та геометричної форми, що є невід'ємною особливістю процесу фрагментації.

У зв'язку з цим, розглядаючи ідеалізований випадок повного перетворення енергії детонації у кінетичну енергію осколків, можна побачити, що формула (1) надає лише усереднену оцінку початкової швидкості та не враховує дисперсію швидкостей в осколковому полі. Отже, для розроблення більш обґрунтованого математичного апарату необхідно розглянути енергетичний баланс процесу детонації та фрагментації [3, 4]. Енергія, що виділяється під час детонації РЗ, може бути виражена як $E_{det} = m_{ep} Q$, де Q – питома енергія детонації одиниці маси РЗ. Частина цієї енергії витрачається на виконання роботи з руйнування та пластичної деформації матеріалу корпусу ($W_{руйн}$), а решта переходить у кінетичну енергію осколкового поля ($E_{кин}$), яку згідно із законом збереження енергії можна виразити як

$$m_{ep} Q = W_{руйн} + E_{кин}. \quad (2)$$

Оскільки кінетична енергія осколкового поля є сумою кінетичних енергій окремих осколків, то її можливо виразити так [5, 9]:

$$E_{кин} = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_{0i}^2. \quad (3)$$

Застосовуючи статистичний принцип рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності (у цьому випадку – за масами осколків як мірою інерційності), можна припустити, що в середньому кінетична енергія, яка припадає на осколок, пропорційна його масі:

$$\frac{1}{2} m_i v_{0i}^2 \approx \frac{E_{кин}}{M_{оск}} m_i, \quad (4)$$

де $M_{оск}$ – сумарна маса осколків, яку можливо прийняти за 95–98 % від маси осколкоутворюючої частини РООФ снаряда (M). Тоді з рівняння (4) можна отримати середнє квадратичне значення початкової швидкості осколків:

$$\langle v_0^2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_i m_i v_{0i}^2 \approx \frac{2E_{кин}}{M} = \frac{2(m_{вп} Q - W_{руйн})}{M} = 2\beta Q - \frac{2W_{руйн}}{M}, \quad (5)$$

а середнє значення початкової швидкості осколків виражається як

$$\langle v_0 \rangle \approx \sqrt{2\beta Q - \frac{2W_{руйн}}{M}}. \quad (6)$$

Такий вираз є більш фізично обґрунтованим, ніж формула Покровського, оскільки враховує енергетичні витрати на руйнування корпусу, які залежать від міцності матеріалу та швидкості деформації.

Для оцінювання убойної швидкості окремого осколка необхідно враховувати його взаємодію з біологічною тканиною або індивідуальними засобами бронезахисту та виразити за допомогою напівемпіричної моделі Райса [7], яка для убойної швидкості має такий вигляд:

$$v_{уб} = C \frac{(h\phi^n)^{1/2}}{m^{1/2}}, \quad (7)$$

де C – емпірична константа, що залежить від характеристик цілі (для ураження живої сили $C \approx 145$);

h – сталевий еквівалент перешкоди;

ϕ – параметр форми осколка;

n – емпіричний показник (зазвичай приймається рівним 1/3 для опису опору проникнення або 1/2 для врахування площі поперечного перерізу);

m – маса осколка.

Параметр форми ϕ є безрозмірною величиною, що враховує геометричну конфігурацію осколка та його орієнтацію відносно напрямку руху. Для осколків складної форми його визначення може бути емпіричним або базуватися на апроксимації геометричною фігурою з відомими властивостями. Для паралелепіпеда з характерними розмірами довжини a , ширини b та висоти c параметр форми може бути апроксимований різними виразами, одним з яких є

$$\phi \approx \frac{(abc)^{2/3}}{\sqrt{ab + bc + ca}}. \quad (8)$$

Для видовжених осколків, які характеризуються значним відносним видовженням ($l = \sqrt{bc} \gg 1$), параметр форми, розрахований за цією формулою, зменшується зі зростанням l , що вказує на потенційне зниження балістичної ефективності таких осколків за інших рівних умов.

Мінімальний коефіцієнт навантаження (β_{msn}), необхідний для забезпечення пробиття перешкоди із заданим сталевим еквівалентом h , може бути визначений за умови, що кінетична енергія осколка середньої маси ($m_{сеп}$) із середньою початковою швидкістю $\langle v_0 \rangle$ повинна бути достатньою для подолання опору перешкоди [2, 3, 8]. Використовують критерій пробиття, що пов'язує кінетичну

енергію осколка з його корисною роботою, необхідною для пробиття, коефіцієнт якої можна вирахувати за таким співвідношенням:

$$\frac{1}{2} m_{\text{сер}} \langle v_0 \rangle^2 \geq A_p S_{\text{сер}} f(\phi), \quad (9)$$

де A_p – питома робота пробиття матеріалу перешкоди;

$S_{\text{сер}}$ – середній поперечний переріз осколка;

$f(\phi)$ – функція, що враховує вплив форми осколка на процес проникнення.

Аналіз впливу параметра форми осколків на пробивну здатність є складним завданням, оскільки форма впливає як на аеродинамічні характеристики осколка в польоті (опір повітря, стійкість), так і на механізм його взаємодії з перешкодою (глибину проникнення, характер утворення пробоїни). Отже, з виразу (9) видно, що для ефективного ураження живої сили мінімальне значення коефіцієнта навантаження, що прирівнюється до кінетичної енергії осколка з його корисною роботою, має бути вищим за опір перешкоди.

Висновки

Проведене теоретичне дослідження дало змогу отримати більш обґрунтований математичний апарат для аналізу впливу коефіцієнта навантаження та геометричних характеристик осколкових полів радіально-осьових осколково-фугасних снарядів на їхні уражаючі можливості. Запропоновано вирази для визначення початкової швидкості осколків, що враховують енергетичні витрати на фрагментацію корпусу. Виведено загальний підхід до визначення мінімального коефіцієнта навантаження, необхідного для пробиття сучасних індивідуальних засобів бронезахисту живої сили.

Отримані теоретичні результати мають важливе значення для оптимізації конструкції радіально-осьових осколково-фугасних снарядів. Раціональний вибір коефіцієнта навантаження та забезпечення оптимальної форми осколків, деурахування початкової швидкості, стабільності їхнього польоту та взаємодія з живою силою є ключовими чинниками для підвищення бойової ефективності радіально-осьових осколково-фугасних снарядів.

Проте аналіз впливу параметра форми осколків на пробивну здатність є складним завданням, оскільки форма осколка значно впливає як на аеродинамічні характеристики осколка в польоті (опір повітря, стійкість), так і на механізм його взаємодії з перешкодою (глибину проникнення, характер утворення пробоїни). Тому видовжені осколки, хоча й можуть мати меншу площу поперечного перерізу, можуть демонструвати вищу пробивну здатність завдяки механізму клиноподібного проникнення за збереження стійкої орієнтації. Однак у разі значного видовження зростає ризик втрати стійкості, що може призвести до кумулятивного ефекту та зниження глибини пробиття.

Напрями майбутніх наукових досліджень будуть спрямовані на подальше вивчення питання удосконалення пробивної здатності радіально-осьових осколково-фугасних снарядів.

Перелік джерел посилання

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. Cannons D. L. Rocket or both. *Army USA*. 1998. P. 10–14.
3. Catovic A., Kljuno E. A novel method for determination of lethal radius for high-explosive artillery projectiles. *Defence Technology*. 2021. Vol. 17. No. 4. P. 1217–1233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.06.015>.
4. Department of Defense (DoD). Unified Facilities Criteria (UFC). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions : UFC 3-340-02. 2013. URL: <https://surl.li/iefepz> (Accessed: 20.04.2025).
5. Ткачук П., Чумакевич В., Дробан О., Федор В. Боеприпаси. Львів : АСВ, 2011. 319 с.

6. Журавльов А., Орлов С. Обґрунтування значення площі досвідного ураження цілі засобами ураження, оснащеними осколочно-фугасними боєприпасами. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2012. № 3 (9). С. 176–178.

7. Ментус І. Ефективність інженерних боєприпасів : навч. посіб. Кам'янець-Подільський : ФВП ПДАТУ, 2008. 80 с.

8. Полениця П., Науменко І., Ліцман А., Нестеров Д. Методика оцінювання ефективності дії осколково-фугасного снаряда по наземних цілях. Київ : ЦУЛ, 2024. 46 с.

9. Сук Д. О., Сидоренко Ю. М., Яковенко В. В. Загальний кут розльоту та швидкість руху осколкової маси осьового осколкового поля 30 мм вибухового пристрою. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 19–22 черв. 2018 р.). Київ, 2018. С. 108–110.

Стаття надійшла до редакції 5.05.2025 р.

UDC :623.4

M. Petrushenko, A. Savin, O. Derkach

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE LOADING COEFFICIENT
AND GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF FRAGMENTATION ELEMENTS
ON THE PENETRATION CAPABILITY OF RADIAL-AXIAL HIGH-EXPLOSIVE
FRAGMENTATION PROJECTILE**

The article studies the influence of the relative charge of the explosive, which is quantitatively determined by the loading coefficient, and the geometric parameters of natural fragmentation fragments, in particular the fragment shape parameter. This has a direct impact on the ballistic effectiveness of the fragmentation fields of the fragmentation-forming parts of radial-axial high-explosive fragmentation shells, which is usually manifested in their ability to penetrate obstacles.

An analysis of existing theoretical models aimed at predicting the initial and lethal velocities of fragments was carried out, and their limitations related to the distribution of kinetic energy in the fragment flow of the fragment field were identified.

Analytical expressions are proposed for calculating the initial and lethal velocities of fragment fields of fragment-forming parts of radial-axial high-explosive fragmentation shells, which are based on the principle of uniform distribution of fragment energy by their masses, therefore this approach is more physically justified.

The critical value of the fragment loading coefficient necessary to ensure the penetration of a typical obstacle with a steel equivalent of 3 mm has been determined.

The dependence of the depth of immersion of the fragment on the value of the loading coefficient for the fragmentation-forming parts of radial-axial high-explosive fragmentation shells, including mortar mines and artillery shells of various calibers, has been analyzed. Particular attention is paid to the study of the influence of the shape parameter of the fragments on their penetration ability, as a result of which the nonlinear nature of this dependence is presented, and a significant decrease in the depth of immersion for elongated fragments is revealed. The results obtained are important for optimization designs of fragmentation-forming parts of radial-axial high-explosive fragmentation shells in order to increase their striking capabilities when their fragmentation fields affect manpower located in modern means of armor protection.

Keywords: radial-axial high-explosive fragmentation projectile, loading coefficient, fragment shape parameter, ballistic efficiency, initial fragment velocity, lethal fragment velocity, minimum explosive charge, obstacle penetration depth.

Петрушенко Микола Миколайович – заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, Військова академія (м. Одеса)
<https://orcid.org/0000-0002-2490-9572>

Савін Андрій Андрійович – старший викладач кафедри тактичної підготовки, центру перепідготовки та підвищення кваліфікації, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0009-0008-8157-7923>

Деркач Олег Володимирович – старший викладач кафедри забезпечення державної безпеки, Національна академія Національної гвардії України
<https://orcid.org/0009-0003-0792-1056>