

І. М. Неклонський, к. військ.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-5561-4945)

О. М. Смирнов, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1237-8700)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ОСКОЛКОВОЇ ДІЇ ВИБУХУ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ РУЧНИХ ГРАНАТ

Розроблений технологічний процес ремонту ручних гранат, який передбачає усунення несправностей корпусів ручних гранат та спорядження їх вибуховою речовиною. Дослідження обумовлено необхідністю модифікації системи постачання озброєння та військової техніки для сил сектору безпеки й оборони. Отримані результати базуються на принципах конструювання і концепціях дослідження вибуху конденсованих вибухових речовин та теорії пластичності з використанням методів аналізу, синтезу, математичного моделювання тощо. Проведене математичне моделювання дії різних за розмірами і масою осколків під час вибуху, яке дозволяє оцінювати їх вплив не залежно від характеру дроблення оболонок і їх балістики. Результати моделювання показують уніфікований характер запропонованої математичної моделі, що дозволяє її застосування (з певними обмеженнями та припущеннями) в умовах реалізації технологічних процесів ремонту як ручних осколкових гранат так любих артилерійських боєприпасів осколково-фугасної дії. Для підвищення ефективності управління ризиками під час впровадження технологічного процесу ремонту ручних гранат запропонований підхід щодо оцінювання можливих наслідків уражаючої дії осколків у разі нештатного спрацювання виробу в умовах реалізації відповідного технологічного рішення. Процес оцінювання реалізується через методіку розрахунку ймовірності ураження людей осколками гранати, яка базується на результатах моделювання осколкової дії вибуху гранати. Запропонована методіка дозволяє врахувати фактори негативно-го впливу надзвичайної події, що мають як детермінований так і ймовірнісний характер. Результати дослідження можуть бути реалізовані як виконавцями робіт, так і відповідними органами державного нагляду у сфері техногенної та пожежної безпеки в процесі проведення експертизи під час здійснення заходів контролю, погодження нормативних та інших проектних документів.

Ключові слова: боєприпаси, гранати, ремонт, технологія, осколок, осколкова дія вибуху, ураження людини

1. Вступ

В умовах воєнного стану постачання озброєння та військової техніки а також складових частин для їх ремонту і модернізації є нагально необхідним. На сьогоднішній день стало актуальним питання зумовлене значними потребами забезпечення військових підрозділів ручними осколковими гранатами. З початком активних бойових дій використовуються старі запаси. Міністерство Оборони України у вересні 2024 року кодифікувало та допустило до експлуатації у військах оборонну осколкову гранату та ручну наступальну гранату дистанційної дії – аналоги відповідним гранатами радянського виробництва Ф-1 і РГД-5. Разом з цим, підприємства хімічної промисловості почали виробництво елементів боєприпасів, які дозволяють їх оновлювати за рахунок перезаряджання вибухових речовин та спеціальних сумішей. Крім того, як національні так і міжнародні правила ідентифікації, перевірки та безпечного поводження зі штатними ручними гранатами забороняють використовувати вироби з наявними ознаками несправностей. Таким чином є ймовірним ситуація накопичення певного залишку технічно непридатних (з закінченими гарантійними термінами зберігання) ручних гранат.

З урахуванням цього стає нагальною потреба впровадження інноваційних технологій ремонту технічно непридатних ручних гранат та спорядження оновлених корпусів. При цьому, важливою інженерною задачею під час науково-технічного супроводу впровадження відповідних технологій є вміння оцінити ре-

зультати можливого впливу від нештатного спрацювання виробу на конкретний об'єкт і вжити заходи щодо попередження небезпечних наслідків.

Таким чином, в умовах модифікації національної технологічної політики постачання озброєння та військової техніки стає актуальною проблема, яка полягає в необхідності обґрунтування нового технологічного підходу до ремонту технічно непридатних ручних гранат, в тому числі РГД-5 та їх аналогів, який би враховував вплив критичних параметрів вибуху на безпеку життєдіяльності кваліфікованого персоналу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасні тенденції дослідження проблем безпеки життєдіяльності при поводженні з боєприпасами та ручними гранатами охоплюють, як правило, такі основні напрямки: розпізнавання вибухонебезпечних предметів у контексті війни в Україні, правила безпеки та екстрені процедури для гуманітарних місій з розмінування, технічні стандарти управління запасами боєприпасів. При цьому, це відбувається на фоні попередньо проведених широких досліджень процесів вибухового перетворення конденсованих вибухових речовин (далі – ВР) та процесу детонації, започаткованих Національним комітетом оборонних досліджень США (далі – NDRC).

Так міжнародні технічні рекомендації з боєприпасів [1] фокусуються на безпечному зберіганні та управлінні боєприпасами. Основними напрямками діяльності визначаються: зменшення ризиків, категорювання за небезпекою, утилізація. Мінімізація наслідків можливих незапланованих вибухів має забезпечуватись шляхом роздільного зберігання справних та несправних боєприпасів, моніторингу терміну придатності порохів, присвоєння тимчасових категорій небезпеки для некласифікованих боєприпасів а також проведенням утилізації способом відкритого спалювання або відкритої детонації. Таким чином, рекомендації не передбачають альтернативи утилізації. Такий підхід є доречним для боєприпасів, але не раціональним до ручних гранат, які мають свою специфіку будови й застосування. Крім того, в документі не приділяється увага опису фундаментальних інструментів для зниження ризиків серед кваліфікованого персоналу, що працює з боєприпасами.

Важливим довідником із безпеки, розробленими для захисту персоналу та цивільних осіб, які працюють у регіонах, охоплених наслідками збройних конфліктів, є робота [2]. Автори детально описують різноманітні вибухонебезпечні предмети, пояснюючи їхній зовнішній вигляд, принципи детонації та руйнівний вплив. Окрім класифікації загроз, робота містить практичні поради щодо розпізнавання небезпечних зон, алгоритми дій у надзвичайних ситуаціях та основи надання домедичної допомоги постраждалим. Разом з тим, критичні параметри руйнівного впливу відповідних вибухонебезпечних предметів, у тому числі і гранат, на життєдіяльність кваліфікованого персоналу не розглядаються. Головна мета документа полягає у підвищенні обізнаності та наданні базових знань, що дозволяють уникнути небажаного контакту з вибухівкою.

В роботі [3] систематизована інформація з ідентифікації вибухонебезпечних предметів, яка важлива для проведення гуманітарного розмінування та фахівців з розпізнавання загроз в Україні. Структура документа охоплює широку класифікацію озброєнь, де основна увага приділяється технічним характеристикам, таким як тип вибухівки, радіус ураження та особливості детонаторів. Разом з тим, з точки зору опису впливу на людей автори обмежуються загальною характеристикою зони ураження та летальності: типова осколкова граната вважається летальною в

радіусі 10 м, проте зона небезпеки розльоту осколків може сягати 50 м і більше. Для гранати Ф-1 заявляється теоретична летальність до 200 м, хоча найбільш імовірною межею ураження вважається 30 м. Таким чином, руйнівний вплив осколків гранат розглядається з позиції їх технічних характеристик, не враховуючі енергетичні і кінетичні показники дії осколків, які впливають на здатність пробивати огорожувальну конструкцію. Саме такі показники є актуальними для обґрунтування нового технологічного підходу до ремонту технічно непридатних ручних гранат, особливо для розроблення технологічних рішень щодо мінімізації впливу на кваліфікований персонал.

В роботі [4] з метою вдосконалення процедур безпечної роботи персоналу під час операцій із розмінування біля берегової лінії або критичної морської інфраструктури запропонований метод оцінки фрагментації для занурених боєприпасів. Автори зауважують на необхідності врахування, в додаток до ефекту повітряного вибуху, ефект фрагментації навколишньої оболонки боєприпасу. До фрагментації призводить швидке вивільнення енергії в результаті хімічного процесу, яка передається навколишньому матеріалу. Щоб дослідити характеристики розльоту та розподілу фрагментів у статті представлено серію експериментальних випробувань, які порівнюють як повітряні, так і підводні заряди вибухових речовин у гільзах. Разом з тим, запропонований метод оцінки ґрунтується на статистичному аналізі, а отримані масиви спостережень характеризують поведінку фрагментів боєприпасів в умовах водного середовища.

Спираючись на попередні дослідження підводної фрагментації боєприпасів [4], дослідження [5] розширює аналіз застосовуючи моделі критеріїв ураження для оцінки пов'язаних з ними меж небезпеки. Дослідження спрямоване на розробку стандартної процедури розрахунку безпечних відстаней залежно від глибини та маси заряду в морському середовищі. Автори використовують оптичні дані, метод статистичного аналізу та числове моделювання для імітації детонації, зосереджуючись на оцінюванні механізму кінетичного пошкодження, який доповнює акустичне та ударно-хвильове пошкодження на мілководді. Результати дослідження дають підґрунтя для оцінки та зменшення ризиків під час операцій з розмінування підводних боєприпасів. Для операцій з наземними боєприпасами результати дослідження цікаві з точки зору практичної методології для обчислення траєкторій уламків, максимальної дальності та ймовірності ураження людини з використанням встановлених меж пошкодження.

Робота [6] досліджує реконструкцію місця злочину після підриву двох ручних гранат DM-41 у закритому приміщенні з метою відтворення реальної картини ураження людського тіла. Автори аналізують уламкову дію та параметри вибухової хвилі шляхом проведення експериментального вибуху з використанням манекенів. Ключова ідея роботи полягає в застосуванні фізичного моделювання для підтвердження або спростування обставин події. Робота демонструє, як балістичні характеристики вибухових пристроїв допомагають відтворити реальну картину ураження людського тіла. Разом з тим, в умовах впровадження певного технологічного процесу такий підхід може бути актуальним на етапі розслідування події а не попередження небезпечних наслідків.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що, незважаючи на широке вивчення процесу детонації боєприпасів, небезпека фрагментації їх оболонок, у тому числі ручних гранат, залишається недостатньо вивченою, і тому не існує стандартизованої процедури для розрахунку безпечних умов життєдіяльності як

функціональної залежності від енергетичних і кінетичних показників дії осколків на людей і огорожувальні конструкції.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є необхідність розроблення технологічного процесу ремонту ручних гранат (на прикладі РГД-5 та їх аналогів), впровадження якого має враховувати результати розрахунку енергетичних і кінетичних показників дії осколків на людей і огорожувальні конструкції.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення технологічного процесу ремонту ручних гранат та оцінювання можливих наслідків вражаючої дії осколків у разі нештатного спрацювання виробу в умовах реалізації відповідного технологічного рішення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити поетапний технологічний процес ремонту ручних гранат РГД-5 та їх аналогів, який передбачає усунення несправностей корпусів ручних гранат та спорядження їх вибуховою речовиною;
- провести моделювання дії осколків боєприпасу на огорожувальні конструкції під час вибуху;
- розробити методика розрахунку ймовірності ураження людей осколками гранати.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – технологічний процес ремонту ручних гранат. Предмет дослідження – виробниче середовище, де реалізується відповідний технологічний процес ремонту ручних гранат.

Дослідження має підтвердити гіпотезу, що знаючи будову, принцип дії та технічні характеристики гранат, результати моделювання осколкової дії вибуху гранати можна розробити технологічний процес ремонту ручних гранат організація якого знаходиться у функціональній залежності від енергетичних і кінетичних показників дії осколків на людей і огорожувальні конструкції.

Методи дослідження визначаються сукупністю вирішуваних завдань і базуються на принципах конструювання і концепціях дослідження вибуху конденсованих вибухових речовин та теорії пластичності та включають методи аналізу, синтезу, математичного моделювання тощо. Застосування програмних засобів середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad дає можливість автоматизувати процес обробки результатів дослідження.

5. Розроблення технології ремонту ручних гранат

Пропонується технологія ремонту РГД-5 з закінченими гарантійними термінами зберігання. Відповідна технологія передбачає, що:

- метою організації процесу є певний набір і послідовність операцій з ремонту корпусів ручних гранат та спорядження вибуховою речовиною;
- технологічним об'єктом – ручна граната РГД-5 або її аналог;
- технологічними засобами – устаткування та оснащення відповідно до табл. 1;
- носіями технологічних функцій є складальники боєприпасів у кількості 20 осіб (при організації потокового методу проведення робіт).

Табл. 1. Перелік устаткування та оснащення, необхідного для ремонту гранат

№ операції	Найменування пристосування	Кількість	Найменування інструменту/матеріалу	Кількість	Найменування верстату, машини	Кількість
2	Зборка для стопорних шпильок і ярликів	1	Гострозубці, плоскогубці, лом-фомка	1		
	Гасилка	1	Ломик-фомка	1		
3	Зборка для парафінованого паперу, штемпельна фарба, казеїновий або кістковий або канцелярський клей	1	Сухий чистий папір, паперовий ярлик 50x80 мм, Гумовий графарет	1	Автовантажувач, пакетувальник	1
	Технологічний стіл, тачки типу Т-0,5	1	Гострозубці	1		
4	Технологічний стіл	1	Спец ключ (57-И-662), низьковольтна (24–36В) лампа (ліхтарик)	1	Спец ключ № 8 (53-ИЮ-041) для вигвинчування холостої пробки	2
5	Механічний верстат	1	Щітка-йорж із сталевого дроту або з кардо-стрічки; плоска металева щітка і наждачне полотно; спеціальні державки	1	АВР-СА, дискові щітки	1
	Технологічний стіл	1				
6	Лещата Сегаля	1	Щітка-йорж із сталевого дроту, кардострічка, контрольний запал, прохідний різбовий калібр, калібрувальний метчик (ЗІ60) для різблення 15,45 x 13 ниток на 1 ^{//} , шліфувальна шкірка або ганчір'я	1	Верстат типу СМК	1
	Технологічний стіл	1				
7	Технологічний стіл	1	Прохідний різбовий калібр ПР-СК (ЗІ56) Сп 15,45 x13 ниток на 1 ^{//} , контрольний запал, калібр-макет ПР-СК (7И28) Сп 15,45 x13 ниток на 1 ^{//}		СКП-032М	1
8, 9	Ємність для фарби – емаль ХВ-179 по ґрунту ГФ-032 (ХВ-079), лаку МА-592 та розчинник, снарядне мастило ВС	1	Пристосування КО-СО, пензлі, волосяна щітка і ганчір'я	1	Фарборозпилювач	1
	Технологічний стіл	1				
10	Технологічний стіл	1	Спеціальна закатувальна машинка	1	Установка для спорядження ВР	1

Продовження табл. 1.

11	Технологічний стіл, ємність для фарби ФЛ-59	1	Ваги, клейма, молоток, гумовий трафарет, ганчір'я, пензель	1	Верстат з роликками	1
12	Технологічний стіл	1	Прохідний різьбовий калібр ПР-СК (ЗІ56) Сп 15,45 x13 ниток на 1'', Калібр-макет ПР-СК (7І28) Сп 15,45 x13 ниток на 1'', ручки до різьбових калібрів	1	КУ-006, КУ-009	1
13	Ємність для мастила ПВК, технологічний стіл	1	Ганчір'я, папір обгортувальний, папір просочений парафіном	1		
14	Ємність для фарби, лаку БТ-5100 і уайт-спірит, фарба ФЛ-59, казеїновий або кістковий або канцелярський клей	1	Сухий чистий папір, ярлик 100x80 мм, трафарет, штамп, гумовий трафарет	1		
1,15	Тачки типу Т-0,5, рольганг ТР-6	1	Пакувальник	1	Автовантажувач	1
16	Парафінований папір, парафін, гума, штемпельна фарба	1	Дріт, трафарети, ярликів 50x80 мм, спеціальні ножиці	1	Парафіноплавка	1

Ремонт ручних гранат РГД-5 та їх аналогів представляє собою процес послідовного виконання операцій, характеристика як наведена в табл.2.

Варіант схеми технологічного процесу ремонту РГД-5 у масштабах цеху представлений на рис. 1.

Особливо небезпечними є операції № 10 та № 12. З урахуванням вимог охорони праці й пожежної безпеки дозволяється одночасне знаходження виробів (РГД-5) в цеху: на пункті зосередження (обігріву) – 500 од., у приміщенні з ремонту – не більше 100 од. Допускається залишати в цеху в кінці робочого дня не більше 50 од.

Таким чином, під час реалізації запропонованої технології ремонту ручних гранат повинні бути досягнуті наступні цілі: забезпечити підрозділи сил сектору безпеки й оборони ручними гранатами РГД-5 або їх аналогами; скоротити витрати на зберігання і ремонт ручних гранат; забезпечити максимальну економічну ефективність; зберегти висококваліфіковані кадри і виробничі потужності зі спорядження і ремонту боєприпасів з урахуванням переведення підприємств на сучасні технології.

Проте вплив факторів зовнішнього та внутрішнього середовища в процесі реалізації технології може привести до відхилення від прогнозованих результатів, виникнення аварій та інших непередбачуваних подій, що вимагає створення ефективною системи управління ризиками. Для цього потрібно вирішити наступну інженерну задачу, яка стосується оцінювання результатів можливого впливу від нештатного спрацювання виробу на конкретний об'єкт для вжиття заходів щодо попередження небезпечних наслідків.

Табл. 2. Перелік операцій під час ремонту ручних гранат

Операція	Зміст операції
№ 1	Подача ящиків із корпусами РГД-5 з автомобілю до цеху
№ 2	Видалення стопорних вилок, відкривання замків та кришки ящика. Видалення верхніх вкладок та парафінованого паперу. Вилучення корпусів РГД-5 з ящика та подача їх на наступну операцію
№ 3	Контроль ящиків на повноту вилучення корпусів РГД-5, вкладання вкладок і парафінованого паперу, закривання порожніх ящиків і передача їх на ділянку пакування
№ 4	Підготовка корпусів РГД-5 до ремонту: контроль на безпеку; визначення корпусів гранат на придатність до ремонту
№ 5	Видалення із зовнішньої та внутрішньої поверхонь корпусів РГД-5 запобіжного мастила і забруднень на машині АВР-СА або вручну
№ 6	Ремонт гнізда під запал корпусів РГД-5. Проходження мітчиком різьблення гнізда під запал
№ 7	Перевірка вимірювальними інструментами корпусу гранати після чищення і протирання їх поверхонь
№ 8	Знежирення поверхні та фарбування корпусів РГД-5 емаллю
№ 9	Сушка лакованих корпусів РГД-5 у камері або електропечі
№ 10	За допомогою установки провести спорядження корпусів РГД-5 вибуховою речовиною – $T=0,110$ кг. Роботу виконувати у бронекабіні
№ 11	Зважування та маркування корпусів РГД-5 шляхом прокатування корпусів РГД-5 по литому або вирізаному гумовому трафарету
№ 12	Інструментальний контроль корпусів РГД-5. Контроль різьблення гнізда проводити на верстаті КУ-006 (КУ-009) з головкою КО-005 або вручну
№ 13	Перед пакуванням РГД-5, кожен гранату обернути папером просоченим парафіном та вставити у відповідний осередок
№ 14	Комплектація запалами та пакування РГД-5 однакової кількості у справне закупорювання: закривання, пломбування та маркування закупорювання
№ 15	Контроль пакування РГД-5 та запалів у ящиках. Видача РГД-5 у штатному закупорюванні з цеху
№ 16 (допоміжні операції)	Різання паперу і просочення її парафіном
	Сортування парафінованого паперу (б/в)
	Нарізання дроту для пломбування на шматки необхідної довжини
	Виготовлення трафаретів і ярликів

6. Математичне моделювання осколкової дії вибуху боєприпасу

Аналіз зразків боєприпасів показує, що найбільшого поширення набули боєприпаси з корпусами у вигляді тіл обертання – циліндричної, сферичної і близьким до них формам (кокон, кругова або параболична бочка). Корпуси можуть бути з приблизно сталою товщиною стінки, а гранати також мати насічку або фрагменти. Для боєприпасів з насічкою та з фрагментованим типом оболонки кількість фрагментів дроблення корпусу на осколки відомо. Складним є питання дроблення гладких корпусів. Тому при моделюванні осколкової дії вибуху зарядів вибухових речовин в оболонках доцільно опиратись на наукові ідеї, що викладені в роботах [7, 8, 9] Аналіз результатів даних наукових досліджень дає підстави на визначення кількісних та якісних характеристик вихідних даних для моделювання дії фрагментів (осколків) боєприпасів під час їх вибуху.

Так, якщо відсутні точні дані про товщину стінки корпусу, то при визначенні осколкової дії вибуху зарядів вибухових речовин (ВР) в оболонках з насічкою в розрахунок вводиться товщина стінки d , що усереднена по масі оболонки m ,

$$d = \frac{m}{\rho_i \times S_s} \quad (1)$$

де ρ_i – щільність матеріалу, S_s – площа поверхні оболонки.

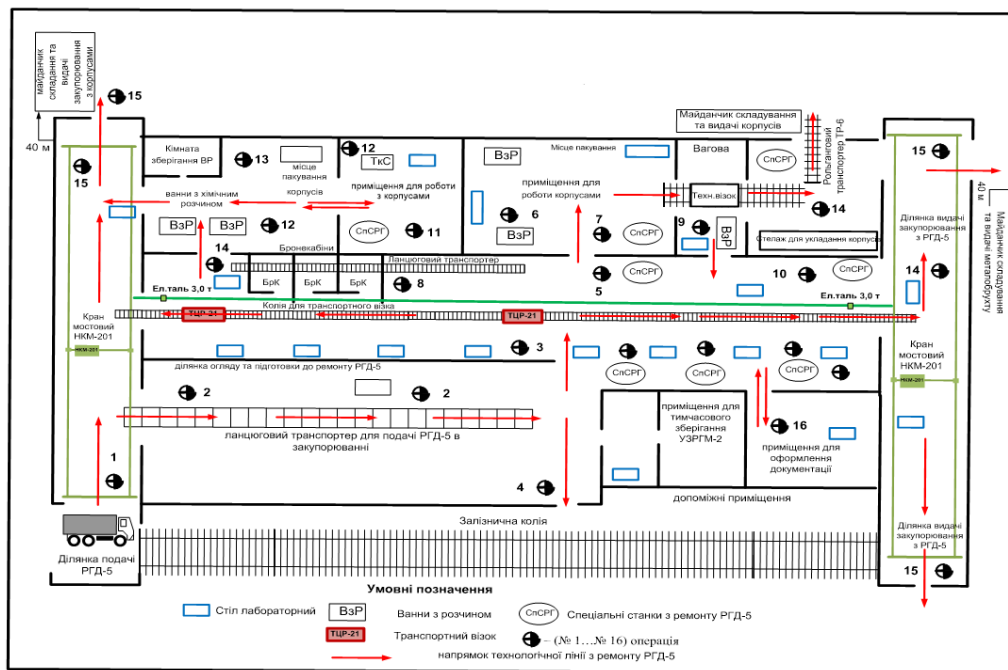


Рис. 1. Схема технологічного процесу ремонту РГД-5 у цеху (варіант)

Величина d представляє міру питомої інерції стінки корпусу. Вважається, що товщина осколка (уздовж вектора швидкості розльоту) дорівнює d . Для циліндричного корпусу висотою H і радіусом r нефрагментованих боєприпасів маса матеріалу, що формує циліндричне осколкове поле, дорівнює масі $m_{ц}$ циліндричної оболонки. При рівномірному розподілі матеріалу по поверхні корпусу відношення маси $m_{ц}$ до повної маси корпусу m буде визначатись за формулою

$$\frac{m_{ц}}{m} = \frac{1}{1 + \frac{r}{H}} \quad (2)$$

Для зразків у формі паралелепіпеда наближену оцінку осколкової дії можна отримати визначивши умовний радіус виходячи із рівняння, що показує рівність поверхонь паралелепіпеда і циліндра

$$r = -\frac{l_m}{2} + \sqrt{\frac{l_m^2}{4} + \frac{(a \cdot b + a \cdot l_m + b \cdot l_m)}{\pi}} \quad (3)$$

де a, b, l_m – розміри паралелепіпеда, причому l_m – найбільший розмір.

Фрагментовані боєприпаси становлять більшу небезпеку по «осколковій» дії фрагментів. Вважається, що вся маса m матеріалу зосереджена у фрагментах,

тобто масою оболонки нехтують. Зазвичай достовірно відома як маса m , так і число фрагментів n , тобто маса фрагмента (осколка) $m_0 = \frac{m}{n}$.

Швидкість розльоту фрагментів обчислюється за масою m , тобто система фрагментів приводиться до умовної ізотропної оболонки без міцності товщиною d і щільністю ρ_i матеріалу фрагментів. При розрахунку швидкості зустрічі осколка з мішенню величина l замінюється діаметром d_1 сферичного тіла

$d_1 = \sqrt[3]{\frac{3m}{\pi\rho_i}}$. Тип фрагментів враховується коефіцієнтом форми K_ϕ . Для кульок

$K_\phi = 1$, для тупих фрагментів і осколків від розриву оболонок з насічками $K_\phi = 0,84$.

Можливість детонації ВР в укупорці і боєприпасів від удару осколків перевіряється порівнянням залишкової швидкості (при пробитті укупорки або оболонки) зі швидкістю удару, що викликає детонацію.

Для боєприпасів з гладкою оболонкою і без фрагментів ефект осколкової дії визначається для спектру осколків різних розмірів, що задаються у нульовому наближенні їх «діаметрами» d_1 , значення яких уточнюються за умовами

$S_s = \frac{n \cdot \pi \cdot d_1^2}{4}$, де n – ціле число. Маса осколка дорівнює $m_0 = \frac{m}{n}$.

Як показав аналіз близько 90 % ручних гранат світу мають фрагментований тип оболонки, причому кількість фрагментів (як правило у вигляді сталевих кульок діаметром до 3 мм) варіюється в межах 800–5000. Гранати з насічками мають невелику кількість осколків, яка не перевищує 100. Характеристики гранат приводяться в національних довідниках озброєння.

Уражаюча дія осколків визначається із рівняння балансу енергії

$$K = L_e - L_m, \quad (4)$$

де L_e – сумарний тепловий ефект вибухового перетворення і розширення енергоносія (ВР); L_m – сумарна величина, що включає внутрішню потенційну E_n і кінетичну E_k енергію продуктів детонації (ПД), енергію, яка передана осколками навколишньому середовищу та ту, яка витрачається на руйнування оболонки; K – кінетична енергія розльоту осколків оболонки.

Кінетична енергія осколків визначається за рівнянням

$$K = \frac{m \cdot v_0^2}{2}, \quad (5)$$

де m – маса оболонки; v_0 – початкова швидкість осколків, під якою розуміють їх швидкість в момент максимального розгону.

Для конденсованих ВР

$$L_e = C \cdot Q_B, \quad (6)$$

де C – маса заряду ВР, Q_B – теплота вибуху.

Показники енергії E_n і E_k визначаються за формулами:

$$E_n = \frac{C \cdot P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}, \quad (7)$$

$$E_k = \frac{C \cdot v_0^2}{\psi}, \quad (8)$$

де P – тиск; ρ – щільність ПД на момент повного розгону матеріалу оболонки; γ – показник ізоентропи ПД ($\gamma = 3$); ψ – константа форми [7].

Якщо знехтувати енергією, яка витрачається на руйнування оболонки та передається від осколку повітря, що не перевищує 8% від величини L_e , то використовуючи формулу (5) отримаємо

$$v_0 = \sqrt{\left(Q_B - \frac{P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}\right) \cdot \frac{2\beta}{1 + \frac{2\beta}{\psi}}}, \quad \beta = \frac{C}{m}. \quad (9)$$

Введемо швидкість детонації D для конденсованих ВР:

$$D \cong 4 \sqrt{Q_B - \frac{P}{\rho \cdot (\gamma - 1)}}, \quad (10)$$

Тоді

$$v_0 = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{2 + \frac{4\beta}{\psi}}}. \quad (11)$$

Якщо припустити, що вся енергія буде витрачатись на розліт осколків, то для оболонок любой форми:

$$v_0 = \sqrt{2\beta \cdot Q_B}. \quad (12)$$

Швидкість осколка на відстані R (тобто швидкість зустрічі або швидкість удару по об'єкту (мішені)) буде менше, ніж початкова швидкість v_0 завдяки гальмуванню лобовим опором повітря. Закон руху (метання) осколка з відомою початковою швидкістю можна описати рівняннями плоского руху по осях координат X , Y

$$m_0 \cdot \ddot{X} = -\frac{l^2 \cdot C_x \cdot \rho_0 \cdot \dot{X}^2}{2}; \quad (13)$$

$$m_0 \cdot \ddot{Y} = -\frac{l^2 \cdot C_y \cdot \rho_0 \cdot \dot{Y}^2}{2} - m_0 \cdot g, \quad (14)$$

де m_0, l – маса і характерний розмір осколка, g – прискорення вільного падіння, C_x, C_y – коефіцієнти аеродинамічного опору, точки зверху означають диференціювання за часом.

Внаслідок нестачі інформації про поведінку параметрів C_x, C_y ці рівняння навряд чи можуть бути використані на практиці.

Для визначення змін швидкості осколка з відстанню скористаємося наближеною формулою Г.І. Покровського:

$$v = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{R}{l \cdot \bar{\gamma}}\right), \left(R < R_* \approx 2v_0 \cdot \sqrt{\frac{H}{g}}\right), \quad (15)$$

де $l = \sqrt{d_1^2 + l_1^2}$ – характерний розмір осколка, який визначається його товщиною (або довжиною) l_1 і діаметром d_1 ; $\bar{\gamma} = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{пов.}}}$ – відношення щільності матеріалу оболонки до щільності повітря; H – висота центру вибуху.

Дана формула обмежена величиною R_* дальності польоту осколка. Експоненціальна залежність $\hat{v} \equiv \frac{v}{v_0}$ від параметра $\hat{R} \equiv \frac{R}{l \cdot \bar{\gamma}}$ буде мати такий вигляд:

\hat{R}	0,05	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5
\hat{v}	0,951	0,905	0,741	0,607	0,497	0,407	0,333	0,273	0,223

Уражаюча дія осколка по об'єкту залежить від його здатності пробити захисну конструкцію. Більшість із запропонованих в різний час формул з розрахунку проникнення під час удару призначені для оцінки захисних конструкцій спеціальних споруд при дії артилерійських снарядів з високими швидкостями. При високошвидкісному ударі прийнято вважати, що опір проникненню в металеву перешкоду буде мати постійне значення, обумовлюючи лінійне зменшення швидкості і залежність глибини проникнення від квадрата швидкості удару

$$S = \frac{m_0 \cdot v^2 \cdot K_1}{2A}, \quad (16)$$

де A – площа поперечного перетину тіла, що здійснює удар (снаряда, осколка), K_1 – коефіцієнт, що відображає об'єм матеріалу перешкоди, витісненого одиницею кінетичної енергії тіла. Для перешкоди зі сталі $K_1 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, з алюмінію $K_1 = 5,3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Величина A залежить від характеру дроблення оболонки енергоносія. Роз-

глянемо відомі підходи щодо аналітичного встановлення розмірів осколків при вибухах зарядів ВР в оболонках. Одним з підходів є схема дроблення циліндричної оболонки із матеріалу з граничним динамічним опором руйнуванню σ_1 по колу без урахування подальшого дроблення.

За даною схемою відповідно [7] число осколків циліндричної оболонки буде визначатись по співвідношенню

$$n = \frac{2\pi \cdot v_0}{v_d}, \quad (17)$$

$$v_d = \frac{\sigma_1}{a \cdot \rho_i}, \quad a = \frac{\sqrt{E_{\text{пр}}}}{\rho_i}, \quad (18)$$

де v_d – характерна швидкість удару, $E_{\text{пр}}$ – модуль пружності.

Середня довжина осколка по колу циліндра радіуса r буде визначатись наступним чином

$$d_r = \frac{2\pi \cdot r}{n} = \frac{r \cdot \sigma_1}{a_1 \cdot \rho_i \cdot v_0}, \quad (19)$$

де a_1 – швидкість звуку в матеріалі оболонки.

Даній величині можна умовно зіставити «діаметр» осколка $d_1 = d_r$ для A в (16). Прийнявши товщину осколка l_1 рівній товщині d матеріалу оболонки рівняння для визначення маси осколка прийме вигляд

$$m_0 = d \cdot A \cdot \rho_i, \quad A = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}. \quad (20)$$

Слід зауважити, що формула (20) для ємностей енергоносіїв малих розмірів може дати занижені значення маси осколків, тобто знизити їх кінетичну енергію і пробивну здатність. Швидкість удару, при якій перешкода товщиною h' пробивається з повною втратою кінетичної енергії, називається граничною балістичною або критичною швидкістю. Якщо швидкість удару перевищить критичне значення, осколок проб'є перешкоду товщиною $h_2 < h'$, втративши лише частину кінетичної енергії. Здійснюючи лінійну апроксимацію для швидкості осколка в перешкоді товщиною h' (до повного гальмування), можна визначити залишкову швидкість v_3 для перешкоди товщиною $h_2 < h'$

$$v_3 = v \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h'}\right). \quad (21)$$

Товщина металевої перешкоди h' , яка пробивається осколком з 50 % ймовірністю, може бути оцінена за формулою

$$h' = \frac{0,138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot v}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}, \quad (h' < 1,1 \cdot d_1), \quad (22)$$

де ρ_1, ρ_2 – щільності матеріалів оболонки і перешкоди (мішені) відповідно; σ_2 – динамічна межа плинності.

Тоді вираз для v_3 набуває вигляду

$$v_3 = v - \frac{7,25 \cdot h_2 \cdot \sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}{\rho_1 \cdot d_1}. \quad (23)$$

В спеціальній літературі [7, 8] приводяться напівемпіричні формули для втраченої швидкості $v_{\text{вт}} = v - v_3$: $m_0 \cdot v_{\text{вт}}^2 = K_3 \cdot d_1 \cdot h_2^2$.

Тоді для залишкової швидкості маємо

$$v_3 = v - h_2 \cdot \sqrt{\frac{K_3 \cdot d_1}{m_0}}, \quad (24)$$

де K_3 – константа з розмірністю $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^2)$.

Вважаючи, що ця формула працює і при критичній швидкості, порівнюємо значення $h_2 = h'$ і прийmemo $v_3 = 0$. Тоді, з урахуванням (22), отримаємо значення K_3 :

$$K_3 = \frac{52,5 \cdot \sigma_2 \cdot \rho_2 \cdot m_0}{d_1^3 \cdot \rho_1^2}, \quad (25)$$

Якщо за металевою перешкодою (наприклад, в контейнері) знаходиться ВР, перевірку на детонацію проводять, якщо швидкість v_3 на вильоті не менше граничної величини швидкості осколка $v_b \approx 1500 \text{ м/с}$. При ударі по перешкоді з пружного крихкого матеріалу (бетон, скло) можливе виникнення відколів, тобто вторинних осколків частини перешкоди, що руйнується. За дослідними даними відкол виникає при виконанні однієї з умов:

$$\bar{P} \geq 8,1 (i \leq 2), \quad \bar{P} \geq 7,0 (2 < i \leq 3), \quad \bar{P} \geq 5,6 (3 < i \leq 8), \quad \bar{P} \geq 5,25 (i > 8),$$

де \bar{P} – безрозмірний контактний тиск осколку:

$$\bar{P} \equiv \frac{P}{\sigma_2} = \frac{\left(\frac{d_1}{h_2}\right)^{0,4} \cdot \rho_2 \cdot a_2 v}{\sigma_2 \cdot \left(1 + \frac{\rho_2 \cdot a_2}{\rho_1 \cdot a_1}\right)}, \quad (26)$$

де i – безрозмірний імпульс, що передається перешкоді під час удару:

$$i \equiv \frac{I \cdot a_2}{P \cdot h_2} = \frac{\rho_1 \cdot l_1}{2 \cdot \rho_2 \cdot h_2} \cdot \left(1 + \frac{\rho_2 \cdot a_2}{\rho_1 \cdot a_1}\right), \quad (27)$$

де a_1, a_2 – швидкість звуку в матеріалі осколка і перешкоди; l_1 – довжина осколка ($l_1 \approx d$).

При невисоких швидкостях удару по перешкодам із залізобетону (порядку сотень метрів в секунду) можуть бути використані методики NDRC. Загальний динамічний вплив удару осколком по конструкції, що використовується під час розрахунку міцності об'єкта, визначається контактним тиском P і імпульсом I згідно (26, 27).

При великій швидкості удару v , коли матеріал ударника поводитья як рідина (розплющується), контактний тиск $P_{\text{конт.}}$ можна визначити за наближеною формулою

$$P_{\text{конт.}} \cong \rho_1 \cdot v^2, \quad \left(0 < t < \frac{l_1}{v} \right), \quad (28)$$

Уражаюча дія осколка на людину, що з 50% ймовірністю буде викликає сильні поранення, оцінюють за граничною швидкістю удару v_{50} згідно емпіричної залежності

$$v_{50} \cong \frac{1247 \cdot A}{m_0} + 22, \quad (29)$$

де $A = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ – міделевий переріз, m^2 ; $m_0 = A \cdot l_1 \cdot \rho_1$ – маса осколка, кг.

Так як $\frac{A}{m_0} = \frac{1}{\rho_1 \cdot l_1}$, то швидкість v_{50} буде залежати тільки від маси осколка на одиницю площі і буде визначатись за формулою

$$v_{50} \cong \frac{1247}{\rho_1 \cdot l_1} + 22. \quad (30)$$

Таким чином, проведене математичне моделювання дії різних за розмірами і масою осколків, яке дозволяє оцінювати їх дію не залежно від характеру дроблення оболонок і їх балістики.

Табл. 3. Результати розрахунку осколочної дії вибуху гранати по мішені

v , м/с	m_0 , г	Вид мішені			
		сталйна		алюмінієва	
		L , мм	X , мм	L , мм	X , мм
1600	0,03	0,5	0,8	2,5	2,9
1610	0,1	1,5	1,6	5,5	5,9
1615	0,3	2,3	2,4	8,5	8,8

В табл. 3 наведені результати розрахунків уражаючої здатності осколків під час вибуху гранати РГД-5. Розрахунки, що приведені, здійснені за таких умов: дія осколків по мішеням, в яких змінюється товщина в межах 0,5-2,0 мм з кроком

0,5 мм, із міцної сталі ($\rho_2 = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_2 = 2,1 \text{ ГПа}$) й алюмінієвого сплаву Д-16 ($\rho_2 = 2780 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_2 = 0,44 \text{ ГПа}$) на відстані 0,25 м. В тал. 3 наводяться швидкість зустрічі (v), маса осколка (m_0), товщина мішені (L), яка пробивається, і глибина деформації (X) без пробиття.

7. Розроблення методики розрахунку ймовірності ураження людей осколками гранати

При аварійному вибуху гранати утворюється осколкове поле, здатне вражати людей, викликати загоряння деяких матеріалів і детонацію ВР. Зазначені ефекти мають місце, якщо енергія осколків досить велика і перевищує певні порогові значення. Розглянемо процес ураження мішеней з урахуванням указаних факторів.

Існують різні підходи до розрахунку параметрів, що характеризують ефективність вражаючої дії осколків. Так, використання положень теорії пластичності [10] в припущенні про постійність відношення енергії деформації перешкоди до її об'єму дає можливість визначити параметр E_1 , що характеризує пробивну здатність осколка, у вигляді відношення його кінетичної енергії $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$ до об'єму

витісненого з пробоїни матеріалу

$$E_1 = \frac{E_k}{\delta \cdot S} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot h}{2 \cdot \delta}, \quad (31)$$

де m – маса осколка з щільністю ρ і швидкістю зустрічі v ; δ – товщина мішені, що пробивається; S, h – наведені до циліндра розміри осколка (міделевий переріз і довжина).

Застосовують також інші параметри, що визначають:

- питому енергію осколка

$$E_2 = \frac{E_k}{S} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot h}{2}, \quad (32)$$

- його повну кінетичну енергію

$$E_3 = E_k = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot h \cdot \pi \cdot r^2}{2}, \quad (33)$$

- питомий імпульс

$$E_4 = \frac{m \cdot v}{S} = \rho \cdot v \cdot h. \quad (34)$$

Аналіз даних рівнянь показує, що параметри E_1, E_2, E_3, E_4 не залежать від міделю («калібру») осколка.

Параметр E_1 використовують при оцінюванні ймовірності пробивання металевих перешкод, E_3 – ураження людей, E_4 – запалювальної дії рідких палив.

Критичне значення так званого «убивчого осколка», що характеризує уразливість людини, приймають рівним $E'_3 = 100$ Дж. Критичне значення E_4 при 50% ймовірності запалювання – $E'_4 \approx 900$ Дж/м²·с [7].

Ударна дія осколка по вибуховій речовині, що ініціює детонацію, визначається критичним тиском і тривалістю ударного імпульсу, а точніше – припливом енергії в одиницю часу, тобто потужністю впливу. Для визначення цієї величини слід розглядати зміну напружень при стисканні в речовині з часом як хвильовий процес. Для пресованого тротилу детонація з 50 % ймовірністю можлива при потужності $E'_5 \approx 150$ МВт з межею ймовірності $E'_5 \approx 50 - 300$ МВт. [7]

Найбільш важливим є питання ураження осколками людей. Для оцінювання цього чинника використовуємо параметр E_3 зберігаючи термін «мішень».

Ймовірність ураження мішені, як ймовірність P_s попадання в неї хоча б одного убивчого осколка, визначається відповідно до закону Пуассона с середня щільність осколкового поля на радіусі R мішені; c – частка убивчих осколків, F_0 – проекція площі мішені на площину, нормальну потоку осколків.

Коли у мішень влучає в середньому лише один осколок $n \cdot c \cdot F_0 = 1$, ймовірність ураження $P_s = 1 - \exp(-1) = 0,632$.

Для людини можна прийняти $F_0 = 0,5$ м². Величини n, c визначаються в залежності від характеристик об'єкту, що вибухнув, типу енергоносія, характеристик дроблення оболонки і спектру осколків, що виникли, а також їх балістики.

У разі серії k вибухів з утворенням осколків ймовірність P_k ураження від їх спільного впливу на мішень визначається за формулою

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P_i), \quad (36)$$

де P_i – ймовірність ураження від i -го осколка, що визначається за (35).

На реальних дистанціях для убивчих осколків гальмування опором повітря залежить від їх маси і розмірів. Гальмування впливає тим сильніше, чим менше вага осколка, тобто мінімальна маса m_{\min} для убивчого осколка на відстані R залежить від початкової швидкості v_0 оболонки енергоносія

$$m_{\min} = \frac{2 \cdot E'_3}{v}, \quad v = v(v_0, R), \quad (37)$$

Початкова швидкість v_0 осколків приймається за формулами р. 6.

Частка убивчих осколків з масою $m_{\text{оск}} \geq m_{\min}$ визначається по табл. 4, що складена на основі експериментів з боеприпасами, які мають форму близьку до циліндра. Дані про щільність осколкового поля наведені в табл. 5.

Зміна швидкості v_r осколка в польоті з відстанню R за рахунок опору повітря можна визначити за експоненціальною залежністю

$$v_r = v_0 \cdot \exp\left(-\frac{R}{R_*}\right), \quad (38)$$

де R_* – параметр затухання.

Табл. 4. Розподіл числа осколків по масі (P – відсоток осколків маси m, г і більше)

m, г	P, %	m, г	P, %	m, г	P, %
1	100	10	29	19	16
2	75	11	27	20	15
3	62,5	12	25,5	30	11,5
4	53,5	13	23	40	10
5	47	14	22	50	8,5
6	42	15	20,5	75	6,5
7	38	16	19	100	4,5
8	34,5	17	18	125	3,0
9	31,5	18	17	150	1,5

Табл. 5. Середня щільність розподілу N=1000 осколків в 19 смугах сферичної поверхні з радіусом R_3 і центром, поєднаним з центром вибуху (рис. 2)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
β^0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\gamma_{1000}(R_3)$	9,6	1,8	1,7	2,2	2,8	3,6	4,7	6,7	15,3	24,4
N	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
β^0	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$\gamma_{1000}(R_3)$	19,1	9,9	6,3	4,6	4,1	3,9	3,9	5,8	37,2	

Для оболонки у формі симетричного циліндра усереднені дані наведені в табл. 6.

Табл. 6. Середня щільність розподілу осколків в 19 смугах сферичної поверхні для симетричної циліндричної оболонки

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
β^0	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\gamma_{1000}(R_3)$	23,4	3,8	2,7	3,1	3,5	4,1	5,5	8,3	17,2	24,4

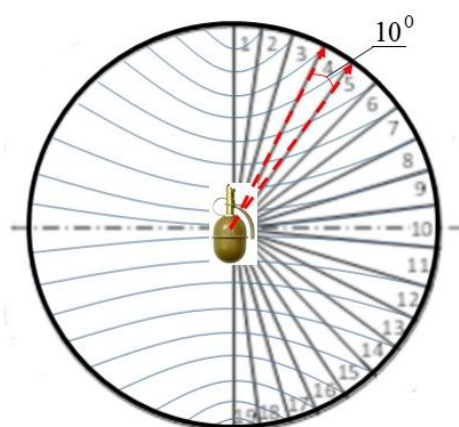


Рис. 2. Кульова поверхня розподілення осколків за смугами

Константу R_* можна розрахувати з використанням даних з табл. 7 та вважаючи, що на дистанції $R_{уб}$ осколок має енергію $E_{уд} = \frac{m \cdot v_{уб}^2}{2}$.

Тоді швидкість зустрічі убивчого осколка з мішенню буде дорівнювати

$$v_{y6} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{уд}}{m}}, \quad (39)$$

а з формули (38) можна визначити значення R_*

$$R_* = -\frac{R_{y6}}{\ln\left(\frac{v_{y6}}{v_0}\right)}, \quad (40)$$

де R_{y6} і v_{y6} – потрібно брати з табл. 7.

Під забійним інтервалом необхідно розуміти відстань від мішені, на якій половина всіх осколків будуть вважатися «убивчими».

Результати розрахунку величин R_* приведені в табл. 8 та табл. 9. Відповідні дані свідчать про те, що параметр затухання швидкості осколка залежить як від відстані, так і від ваги, тобто розміру осколка.

Аналіз даних з табл. 9 дає підстави стверджувати, що залежність параметра затухання від відстані досить слабка. Тому на практиці можна використовувати усереднені значення, що залежать тільки від маси, згідно з табл. 10.

Табл. 7. Убивчий інтервал R_{y6} в метрах для осколків маси m з початковими швидкостями v_0 з енергією удару $E_{уд}=100$ Дж

m, г	v_0 , м/с			
	400	800	1200	1400
5	8,2	11,2	13,4	14,4
10	13	16,8	19,6	20,8
20	18	22,8	26,2	27,8
50	29,3	35,9	40,6	42,8
100	41,1	49,3	55,2	58,1
200	57,1	67,5	75,1	78,6

Табл. 8. Залежність швидкості v_{y6} від маси m убивчого осколка

m, г	1	5	10	20	50	100	200
$v_{заб}$, м/с	447	200	141	100	63	44,7	31,6

Табл. 9. Значення параметру затухання швидкості осколка

m = 5 г	R , м	8,2	11,2	13,4	14,4
	R , м	7,8	8,08	7,5	7,4
m = 10 г	R , м	13	16,8	19,6	20,8
	R , м	12,5	9,68	9,15	9,06
m = 20 г	R , м	18	22,8	26,2	27,8
	R , м	13	11	10,54	10,5
m = 50 г	R , м	29,3	35,9	40,6	42,8
	R , м	15,9	14,1	13,8	13,8
m = 100 г	R , м	41,1	49,3	55,2	58,1
	R , м	18,75	17,1	16,8	16,8
m = 200 г	R , м	57,1	67,5	75,1	78,6
	R , м	22,5	20,9	20,6	20,6

Табл. 10. Середні значення параметра затухання

m, г	5	10	20	50	100	200
R , м	8,7	10	11,3	14,4	17,4	21,2

Крім того під час визначення ймовірності ураження P_{yp} персоналу об'єкту необхідно розуміти, що розміщення людей в зоні вибуху теж може мати випадковий характер. В такому випадку необхідно змоделювати ймовірність появи людини в k -тій точці зони вибуху, де вона може отримати ураження відповідного ступеня тяжкості. Нехай зона вибуху представляє простір $P_n^k(x, y)$. Тоді ймовірність появи людини в k -тій точці простору $P_n^k(x, y)$ можна визначити за формулою

$$P_n^k(x, y) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_k)^2}{\delta^2} + \frac{(y-y_k)^2}{\delta^2} \right]}}{2 \cdot \pi \cdot \delta}, \quad (41)$$

де x_k, y_k – координати (точки) знаходження людини; x, y – координати ймовірного ураження (джерела небезпеки); δ – значення нормального розподілу подій аварій.

Таким чином, під час аварійного прогнозування наслідків вибуху гранати доцільно враховувати фактори негативного впливу надзвичайної події, які мають ймовірнісний характер, а саме: ймовірність ураження людини убивчими осколками; ймовірність появи людини у відповідній точці зони аварії. Такий підхід дозволяє перейти до кількісної оцінки соціального ризику [11].

Користуючись результатами дослідження [7–9], що дозволило провести моделювання осколкової дії вибуху зарядів вибухових речовин, визначимо методику розрахунку ймовірності ураження людей осколками боєприпасів, яка представляє собою наступну процедуру:

1. Підбір вихідних даних. Визначення кількісних та якісних характеристик вихідних даних для моделювання дії фрагментів (осколків) гранати під час вибуху здійснюється з урахуванням рекомендацій зазначених у р.6 проведеного дослідження.

2. Визначення початкової швидкості руху осколків v_0 .

Під початковою швидкістю осколків розуміють їх швидкість в момент максимального розгону. Для її визначення необхідно реалізувати формулу (12).

3. Визначення мінімальної маси убивчих осколків.

Мінімальна маса m_{min} для убивчих осколків на відстані R залежить від початкової швидкості v_0 оболонки енергоносія і визначається за формулою (37)

4. Визначення розподілу убивчих осколків на заданому радіусі.

Частка убивчих осколків вираховується за допомогою табл. 6. При визначенні середньої щільності осколків маса убивчих осколків розраховується за формулою $m_{y6} = c \cdot m$. Для циліндричної оболонки, що розташована вертикально, середню щільність із табл. 6 рекомендується приймати при $\beta = 90^\circ$.

Визначення розподілу убивчих осколків на заданому радіусі R здійснюється за співвідношенням

$$\gamma_{1000}(R) = \gamma_{1000}(R_3) \cdot \left(\frac{R}{R_3} \right)^2. \quad (42)$$

5. Визначення ймовірності появи людей в k -тій точці простору на заданому радіусі R .

Зону вибуху необхідно представити у вигляді простору $P_n^k(x, y)$. Тоді ймовірність появи людини в k -тій точці даного простору можна визначити за формулою (41).

6. Аналіз можливих санітарних втрат людей. Розрахунок показників індивідуального і соціального ризику.

Відповідна методика розрахунку ймовірності ураження людей осколками гранати дозволяє врахувати фактори негативного впливу надзвичайної події, що мають як детермінований так і ймовірнісний характер.

8. Обговорення результатів моделювання осколкової дії вибуху

Отримані результати пояснюються необхідністю удосконалити національну систему ремонту боєприпасів шляхом розроблення технологічного процесу ремонту ручних гранат та оцінювання можливих наслідків уражаючої дії осколків у разі нештатного спрацювання виробу в умовах реалізації відповідного технологічного рішення.

Особливістю запропонованого технологічного процесу ремонту є представлення його як багатоетапну операцію в ході якої забезпечується усунення несправностей корпусів ручних гранат та спорядження їх вибуховою речовиною. При цьому для підвищення рівня економічності та безпеки життєдіяльності кваліфікованого персоналу в технологічному процесі застосовуються спеціальні пристрої та установки. Організаційно-технологічна схема та технологічні рішення щодо забезпечення захисту людей під час ремонту будуються з урахуванням результатів моделювання впливу на людей та огорожувальні конструкції осколкової дії вибуху гранати.

Досліджуючи осколкову дію вибуху гранати необхідно розуміти, що кількість та маса фрагментів є важливими факторами, що впливають на їхню руйнівну силу. Під дією вибухового навантаження фрагментація гранати (снаряда) є одночасно випадковою та певною. Вона випадкова, оскільки фрагменти мають різну масу, тоді як фрагментація є певною, оскільки розподіл кількості фрагментів з різною масою (що називається «розподілом маси фрагментів») відповідає відомому статистичному розподілу. Форма осколків різноманітна і залежить від багатьох факторів. Наприклад, встановлено, що корпус зі сталюого чавуну дробиться на осколки більш правильної форми ніж корпус зі сталі. Для проведення розрахунків введено поняття про параметри форми осколка і середньої площі поперечного перетину осколка (мідель).

Основні обмеження і припущення дослідження обумовлені необхідністю кореляції фізичної та математичної моделі задачі, що вирішується. Так загальна кількість осколків, які утворюються під час вибуху, визначається експериментальним шляхом або за емпіричними залежностями. Наближені методи прогнозування розподілу осколків за вагою базуються на статистичному обробленні експериментальних даних. Розподіл осколків за масами для більшості осколково-фугасних снарядів з природним дробленням корпусу добре описується так званою залежністю Розіна-Рамлера. Разом з тим, відповідна залежність враховує мінімальну в розподілі масу осколка, яка дорівнює 0,5 г.

Здатність так званих мішеней зберігати функції при впливі на них уражаючих факторів різна і носить вибіркового характеру. Мішень більше уразлива до одного уражаючого фактора, не обов'язково буде також уразлива до іншого. Уразливість мішені до кожного з уражаючих факторів характеризується своєю системою критеріїв. Основними критеріями оцінювання ефективності осколкової дії гранати є: наведена зона осколкового ураження – площа, на межі якої ймовірність

ураження не нижче критичної. Кожна елементарна мішень має свою уразливу площу осколкового ураження, яка залежить від: її геометричних розмірів і складу матеріалу (для конструкцій); ступеня захищеності.

З урахуванням великого масиву даних для обробки отриманих результатів можуть бути застосовані програмні апарати середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad. Апробацію в натуральних (лабораторних) умовах та подальше впровадження результатів дослідження доцільно провести на спеціальних виробничих (випробувальних) майданчиках. Натуральні дослідження мають дати розвиток даного дослідження та відповісти на проблемні питання, які можуть бути вирішені в перспективі.

Результати дослідження можуть бути реалізовані як виконавцями робіт, так і відповідними органами державного нагляду у сфері техногенної та пожежної безпеки в процесі проведення експертизи під час здійснення заходів контролю, погодження нормативних та інших проектних документів.

9. Висновки

1. В умовах реалізації національної політики щодо модифікації системи постачання озброєння та військової техніки для сил сектору безпеки й оборони розроблений технологічний процес ремонту ручних гранат, який передбачає усунення несправностей корпусів ручних гранат та спорядження їх вибуховою речовиною. Впровадження відповідного технологічного процесу дає можливість вийти на виробничі потужності з ремонту РГД-5 за зміну – 350–400 шт. Продуктивність ремонту 1000 од. РГД-5 складає 337,42 чол./год.

2. Проведене математичне моделювання дії різних за розмірами і масою осколків під час вибуху, яке дозволяє оцінювати їх вплив не залежно від характеру дроблення оболонок і їх балістики. Результати моделювання показують уніфікований характер запропонованої математичної моделі, що дозволяє її застосування (з певними обмеженнями та припущеннями) в умовах реалізації технологічних процесів ремонту як ручних осколкових гранат так любих артилерійських боєприпасів осколково-фугасної дії.

3. Для підвищення ефективності управління ризиками під час впровадження технологічного процесу ремонту ручних гранат запропонований підхід щодо оцінювання можливих наслідків вражаючої дії осколків у разі нештатного спрацювання виробу в умовах реалізації відповідного технологічного рішення. Процес оцінювання реалізується через методика розрахунку ймовірності ураження людей осколками гранати, яка базується на результатах моделювання осколкової дії вибуху гранати. Запропонована методика дозволяє врахувати фактори негативного впливу надзвичайної події, що мають як детермінований так і ймовірнісний характер.

Література

1. Utilizing the International Ammunition Technical Guidelines in Conflict-Affected and Low-Capacity Environments. UNIDIR, 2019. 118 p. URL: <https://unidir.org/files/publication/pdfs/utilizing-the-international-ammunition-technical-guidelines-in-conflict-affected-and-low-capacity-environments-en-749.pdf>

2. Landmines, explosive remnants of war and ied safety handbook. New York : UN Mine Action Service (UNMAS), Dept. of Peacekeeping Operations, 2015. 128 p. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3799237?v=pdf>

3. Explosive Ordnance Guide for Ukraine. GICHD, 2025. 296 p. URL:

https://www.gichd.org/fileadmin/user_upload/Explosive_Ordnance_Guide_for_Ukraine_GICHD_Third_Edition.pdf

4. Piotr Nowak, Ross Waddoups, Dain Farrimond et al. A fragmentation assessment method for submerged charges. 19th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS), 09-13 Dec 2024. Bonn : ISIEMS, 2024. 12 p. URL: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/220930/1/Nowak_ISIEMS%202024_Paper.pdf

5. Nowak P., Waddoups R., Gajewski T. et al. Fragmentation analysis for underwater ordnance disposal. International Journal of Protective Structures, 2026. 29 p. doi: 10.1177/20414196261421961

6. Seyhan E., Cengiz S. The crime scene reconstruction of the shrapnel effect on human body by two hand grenades detonated in a room: a case approach. Egyptian Journal of Forensic Sciences. 2017. Vol. 7. Art. 9. P. 10. doi: 10.1186/s41935-017-0011-0

7. Baker W. E., Cox P. A., Kulesz J. J., Strehlow R. A., Westine P. S. Explosion Hazards and Evaluation ([edition unavailable]). Elsevier Science, 2012. 840 p. URL: <https://www.perlego.com/book/1874510/explosion-hazards-and-evaluation-pdf>

8. Zhao C., Wang S., Guo C., Liu D., Ma F. Experimental study on fragmentation of explosive loaded steel projectile. International Journal of Impact Engineering. 2020. Vol. 144. 103610. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103610

9. ВП 7-07(01).01. Методика оцінювання ефективності дії осколково-фугасного снаряда по наземних цілях. Суми: Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії, 2019. 59 с. URL: <https://surl.li/hmkncn>

10. Gianpietro Del Piero. The variational structure of classical plasticity. Mathematics and Mechanics of Complex Systems. 2018. Vol. 6. № 3. P. 137–180. doi: 10.2140/memocs.2018.6.137

11. Van Weyenberge, B., Deckers, X., Caspeepe, R. Bart Merci . Development of an Integrated Risk Assessment Method to Quantify the Life Safety Risk in Buildings in Case of Fire. Fire Technology. 2019. Vol. 55. P. 1211–1242. doi: 10.1007/s10694-018-0763-6

I. Neklonskyi, PhD, Senior Lecturer of the Department

O. Smyrnov, Senior Lecturer of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

MODELING THE FRAGMENTATION EFFECTS OF AN EXPLOSION WHEN IMPLEMENTING HAND GRENADE REPAIR TECHNOLOGY

A technological process for repairing hand grenades has been developed, which involves eliminating malfunctions in hand grenade bodies and equipping them with explosives. The research is due to the need to modify the supply system of weapons and military equipment for the security and defense sector forces. The results obtained are based on the principles of design and concepts of studying the explosion of condensed explosives and the theory of plasticity using methods of analysis, synthesis, mathematical modeling, etc. A mathematical modeling of the action of fragments of different sizes and masses during an explosion has been carried out, which allows assessing their impact regardless of the nature of the fragmentation of the shells and their ballistics. The modeling results show the unified nature of the proposed mathematical model. This allows its application (with certain limitations and assumptions) in the conditions of implementing technological processes for repairing both hand fragmentation grenades and any high-explosive artillery ammunition. To increase the effectiveness of risk management during the implementation of the technological process of repairing hand grenades, an approach is proposed to assess the possible consequences of the damaging effect of fragments in the event of an abnormal operation of the product under the conditions of implementing the appropriate technological solution. The assessment process is implemented through the methodology for calculating the probability of people being hit by grenade fragments. The methodology is based on the results of modeling the fragmentation effect of a grenade explosion. The proposed methodology allows taking into

account the factors of the negative impact of an emergency event, which are both deterministic and probabilistic in nature. The results of the study can be implemented by both the performers of the work and the relevant state supervision bodies in the field of technogenic and fire safety in the process of conducting an examination during the implementation of control measures, approval of regulatory and other design documents.

Keywords: ammunition, grenades, repair, technology, fragment, fragmentation effect of the explosion, human injury

References

1. Utilizing the International Ammunition Technical Guidelines in Conflict-Affected and Low-Capacity Environments. (2019). UNIDIR, 118. Available at: <https://unidir.org/files/publication/pdfs/utilizing-the-international-ammunition-technical-guidelines-in-conflict-affected-and-low-capacity-environments-en-749.pdf>

2. Landmines, explosive remnants of war and ied safety handbook. New York (2015). UN Mine Action Service (UNMAS), Dept. of Peacekeeping Operations, 128. Available at: <https://digitallibrary.un.org/record/3799237?v=pdf>

3. Explosive Ordnance Guide for Ukraine. (2025). GICHD, 296. Available at: https://www.gichd.org/fileadmin/user_upload/Explosive_Ordnance_Guide_for_Ukraine__GICHD__Third_Edition.pdf

4. Nowak, P., Waddoups, R., Farrimond, D. et al. (2024). A fragmentation assessment method for submerged charges. 19th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures (ISIEMS), 09-13 Dec 2024. Bonn, ISIEMS, 12. Available at: https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/220930/1/Nowak_ISIEMS%202024_Paper.pdf

5. Nowak, P., Waddoups, R., Gajewski, T. et al. (2026). Fragmentation analysis for underwater ordnance disposal. International Journal of Protective Structures, 29. doi:10.1177/20414196261421961

6. Seyhan, E., Cengiz, S. (2017). The crime scene reconstruction of the shrapnel effect on human body by two hand grenades detonated in a room: a case approach. Egyptian Journal of Forensic Sciences, 7, 9, 10. doi: 10.1186/s41935-017-0011-0

7. Baker, W. E., Cox, P. A., Kulesz, J. J., Strehlow, R. A., Westine, P. S. (2012). Explosion Hazards and Evaluation ([edition unavailable]). Elsevier Science, 840. Available at: <https://www.perlego.com/book/1874510/explosion-hazards-and-evaluation-pdf>

8. Zhao, C., Wang, S., Guo, C., Liu, D., Ma, F. (2020). Experimental study on fragmentation of explosive loaded steel projectile. International Journal of Impact Engineering, 144, 103610. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103610

9. VP 7-07(01).01. Methodology for assessing the effectiveness of a high-explosive fragmentation projectile against ground targets. (2019). Sumy, Research Center of Missile Forces and Artillery, 59. Retrieved from: <https://surl.li/hmkncn>

10. Gianpietro, Del Piero. (2018). The variational structure of classical plasticity. Mathematics and Mechanics of Complex Systems, 6, 3, 137–180. doi: 10.2140/memocs.2018.6.137

11. Van, Weyenberge, B., Deckers, X., Caspeepele, R. Bart, Merci. (2019). Development of an Integrated Risk Assessment Method to Quantify the Life Safety Risk in Buildings in Case of Fire. Fire Technology, 55, 1211–1242. doi: 10.1007/s10694-018-0763-6

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 31.05.2026