

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В БЕЗПЕЦІ ТА ОБОРОНІ

ENERGY TECHNOLOGIES IN SECURITY AND DEFENSE

УДК 623.674

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324265

Оксана Вовк¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7531-9847

Стефан Зайченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-8446-5408

Муцзи Лі¹, аспірант, ORCID 0009-0001-8063-6206

Віктор Городецький¹, канд.ф-м. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4642-3060

Сергій Король², канд. техн. наук, доцент

Вадим Шаленко³, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6984-0302

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Київський національний університет будівництва і архітектури

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗМІНУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИМ РУЙНУВАННЯМ

У дослідженні представлено обґрунтування параметрів процесу розмінування методом гідродинамічного руйнування, який дозволяє ефективно знешкоджувати військові міни без ризику детонації основного заряду. Такий підхід підвищує безпеку під час операцій з розмінування та мінімізує ризики небажаних наслідків у зонах конфліктів. Проведено детальний аналіз конструктивних особливостей найпоширеніших типів детонаторів і підривачів військових мін, що дало змогу ідентифікувати ключові елементи конструкції, які впливають на функціональність і надійність вибухонебезпечних пристроїв. На основі цього аналізу було розроблено логічну модель об'єкта дослідження, яка враховує взаємозв'язок між основними структурними елементами системи та дозволяє визначити можливі стани системи. Для ідентифікації вразливих елементів військових мін серед нескінченної кількості можливих комбінацій фізичних параметрів запропоновано використання інформаційного критерію, заснованого на понятті ентропії Шеннона. Використання цього критерію дозволило визначити елементи, які суттєво знижують ступінь невизначеності системи та мають вирішальний вплив на її функціональність. Вразливий елемент визначено як структурну одиницю пристрою, яка характеризується найменшою залишковою ентропією системи та найбільшим впливом на стан вибухонебезпечного об'єкта. У ході дослідження встановлено, що найвразливішим елементом, від якого залежить загальна працездатність системи, є корпус підривача боєприпасу, що відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та стабільності конструкції. Дослідження не лише висвітлює інноваційне використання гідродинамічного руйнування в операціях з розмінування, але й глибоко аналізує взаємодію структурних та функціональних аспектів вибухонебезпечних пристроїв. Застосування ентропії Шеннона для оцінки вразливості системи надає нову аналітичну основу для технологій розмінування. Цей підхід дозволяє точно ідентифікувати критичні компоненти, вихід з ладу яких може знешкодити вибухонебезпечний пристрій без виклику небажаних наслідків. Акцент на корпусі підривача як на головному вразливому елементі підкреслює важливість розуміння його механічних властивостей і взаємодій у межах пристрою. Цей висновок відкриває нові можливості для розробки спеціалізованих інструментів і методів, спрямованих на безпечніше й ефективніше порушення функціональності вибухонебезпечних пристроїв. Інтеграція передових аналітичних моделей із практичними методами розмінування робить вагомий внесок у розвиток гуманітарного розмінування та військової інженерії.

Ключові слова: система розмінування, вибухонебезпечний пристрій, військова міна, підривачач боєприпасів

Вступ

Військові міни та снаряди залишаються серйозною загрозою для військових підрозділів, мирних жителів і інфраструктури в умовах конфлікту або після його завершення. Пристрої для знешкодження військових мін дозволяють видаляти цю загрозу, забезпечуючи безпеку і захищаючи життя людей. Багато

країн зобов'язані міжнародними угодами знешкоджувати міни на своїй території. Розробка ефективних пристроїв для знешкодження військових мін та снарядів допомагає виконувати ці зобов'язання і підтримувати міжнародний престиж. В умовах війни або конфлікту наявність ефективних засобів для швидкого та безпечного знешкодження військових мін дозволяє зберігати бойові можливості і підтримувати високий рівень готовності військових підрозділів. Видалення військових мін здатне значно покращити гуманітарну ситуацію в постраждалих районах, де військові міни залишаються загрозою для мирного населення, перешкоджаючи поверненню людей до їхніх домівок і відновленню соціально-економічного життя. Розробка нових та вдосконалення існуючих технологій для знешкодження військових мін сприяють технологічному розвитку в країні, стимулюючи наукові дослідження та інновації в галузі безпеки і оборони. Отже, розробка пристроїв для знешкодження військових мін та снарядів є важливою складовою політики безпеки держави, спрямованою на захист її громадян, забезпечення військової готовності і виконання міжнародних зобов'язань. Це необхідна ініціатива для зміцнення обороноздатності та забезпечення стабільності національного і міжнародного рівня.

Основною ідеєю розробки є створення компактного надійного пристрою, що надасть змогу особовому складу військових частини та інших підрозділи, що спеціалізуються на гуманітарному розмінуванні територій в польових умовах провести знешкодження військових мін(снарядів) з малою вірогідністю детонації. Для досягнення поставленої мети пропонуються використати сучасні досягнення у сфері дослідження фізики кумулятивної перфорації. В залежності від необхідності потужності кумулятивного заряду пропонується використання ударників різної конструкції.

Для зменшення динамічного впливу на вибухову величину пропонується використання декілька шарів композитних матеріалів на основі штучних волокон з різними фізико-механічними властивостями і функціональним призначенням. Використання еластичної основи(шару), яка виготовляється в польових умовах, дозволяє фіксувати пристрій в необхідному положенні та поглинає вибухову хвилю від кумулятивного заряду. Поглинання енергії вибухової хвилі, що має радіальну орієнтацію відносно заряду відбувається композитним матеріалом на основі неорганічних волокон(кварца (кристаллического кремнезема (SiO_2)), щелочного полевого шпата, плагиоклаза і полевого шпата) з вязучою речовиною.

Окремою частиною розробки є створення надійного та відносно дешевого способу дистанційного приведення в дію пристрою за допомогою радіоелектродетонатора. З метою здешевлення і максимального поширення розробленого пристрою планується використання максимально доступних радіоелементів та технологій, таких як мікроконтролери з вбудованими модулями радіо частот, низьковартісні радіочастотні передавачі та приймачі, що вже використовуються в промисловості та доступні для широкого кола розробників. Особлива увага при цьому приділяється вибору компонентів, що мають оптимальне співвідношення ціни та якості, що дозволяє досягти необхідних технічних характеристик при мінімальних витратах на виробництво. Такий підхід забезпечить зростання конкурентоспроможності пристрою на ринку і позитивно вплине на його поширення.

Кумулятивний заряд (КЗ) – вибуховий пристрій, ефективність якого визначається глибиною пробиття перешкоди кумулятивною струменем (КС) або визначається енергією ударного взаємодії з перешкодою КС, ударного ядра (УЯ) (explosively formed penetrator), які утворюються при схлопуванні лайнера. За останні 15-20 років кількість публікацій, присвячених дослідженням функціонування КЗ, помітно збільшилася. Переважно це сталося завдяки появі програмних продуктів, що дозволяють проводити комп'ютерне моделювання процесу вибуху КЗ, а саме: детонації вибухової речовини (ВР), деформації корпусу КЗ, схлопування лайнера з утворенням КС або УЯ та проникнення КС (УЯ) в перешкоду. У багатьох роботах результати розрахунків і адекватність математичних моделей, що описують поведінку матеріалів в екстремальних умовах, перевірялися експериментально або порівнювалися з іншими результатами досліджень, опублікованих іншими вченими [1-8]. Ряд робіт присвячений вивченню матеріалознавчих аспектів функціонування КЗ [3-6]. Аналіз робіт [1-6] дозволяє виділити основні особливості конструкції КЗ, що визначають глибину пробиття перешкоди та відповідний об'єм каналу в ній: товщина, форма і матеріал лайнера, енергія вибуху заряду ВР, схема ініціювання детонації заряду. У роботі [2] крім іншого отримані кількісні оцінки впливу на пробиття перешкоди окремих геометричних параметрів кумулятивного заряду або їх комбінації. Зазначено, що найбільший вплив на ефективність КЗ має розташування точки ініціювання детонації заряду ВР (схеми збудження) і товщина лайнера, і значно менший вплив має значення кута у вершині конуса в діапазоні $44^\circ - 46^\circ$ і відстань до перешкоди. Також слід зазначити дві ідеї підвищення ефективності КЗ, пов'язані зі зміною механізмів схлопування облицювань КЗ [3, 7]. Як показав аналіз процесу схлопування півсферичної облицювання дегресивної товщини (значення товщини лайнера зменшується від його вершини до основи), фізична причина збільшення швидкості формуючого при цьому струминного течії полягає в тому, що в такій конструкції КЗ створюється умова для обжаття облицювання, близьке до сферично-симетричного. У результаті посилюється прояв ефекту сферичної кумуляції. Масово-швидкісні параметри КС при цьому наближаються до рівня параметрів КС при схлопуванні конічних лайнерів, а в разі оптимізації форми лайнера можливо можуть перевищувати їх [7]. У роботі [8] описаний інший механізм схлопування

конічної облицювання, відмінний від механізму схлопування зарядів традиційної конструкції (конус або близькі до нього форми). Для цього в зрізаній вершині конуса лайнера розміщують додатковий елемент у вигляді спеціальної пластини. При відображенні набігаючих потоків від цієї пластини відбувається схлопування матеріалу лайнера під кутом, більшим за 180° . У результаті можуть бути отримані КС з більшою кінетичною енергією, ніж КС при традиційній схемі схлопування конічного лайнера, що і підтверджують результати моделювання функціонування такого заряду [6]. Для формування потоку, що може руйнувати елементи військових мін доцільно використати гідродинамічний ефект Юткіна. Використання даного ефекту дозволить зробити процес розмінування більш екологічно чистим та безпечним.

У роботі [7] автори досліджували вплив кута у вершині конуса лайнера, відстані до перешкоди і довжини кумулятивних зарядів на ефективність проникнення в бетонні цілі. Для цього використовувалися конічні лайнери, у яких значення кута при вершині були 90° , 100° і 110° при зовнішньому діаметрі заряду 76 мм. Комп'ютерне моделювання в цьому дослідженні було виконано з використанням програмного забезпечення LS-DYNA, і результати показали, що кут конуса 90° призводить до формування найдовшої КС з найбільшим значенням швидкості головної частини приблизно через 30-40 мкс після детонації заряду ВР. У цьому випадку оптимальна відстань до перешкоди становила від 70 до 100 мм, при якій струмінь могла досягти максимальної швидкості і довжини.

Автор роботи [8] провів дослідження впливу товщини алюмінієвого лайнера і кута при його вершині на ефективність пробиття перешкоди. При збільшенні кута лайнера з 100° до 120° глибина проникнення КС зменшується, що свідчить про зниження її швидкості, а при збільшенні товщини лайнера з 2% до 8% калібру КЗ глибина проникнення збільшується.

Для створення даної системи необхідно визначити вразливі елементи системи які не дозволять спрацювати головному заряду. Мінімізувати вірогідність спрацювання основного заряду військового міни можливо при розгляді об'єкта в цілому з визначенням його структури, можливих станів і можливих руйнувань елементів.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка нової системи розмінування на основі визначення основних вразливих структурних елементів і станів військових мін з врахуванням особливостей взаємодії складових підривачів боєприпасів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

- Розробка структурної схеми військових мін з врахуванням особливостей взаємодії складових, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкта дослідження на його стан;
- Визначення можливих станів військових мін;
- Встановлення вразливих елементів системи для створення системи розмінування гідродинамічним руйнуванням.

Матеріал і результати дослідження

При розробці структурної схеми військової міни розглянемо типову конструкцію яка знайшла найбільшого застосування. Аналогом більшості пристроїв що використовуються на території України є противотанкова мина ТМ-89. Бойова частина складається із сталевго корпусу з кумулятивним облицюванням, спорядженого зарядом ВР. У верхній частині корпусу є кільцевий вузол кріплення підривника, що містить сталеве і дюралюмінієве кільця і гумову прокладку. Сталеве дно міни з'єднане з корпусом закаткою і має дві заливальні горловини, закриті кришками, і скобу з ручкою матер'яною б для перенесення міни, склянка під детонатор, закритий у транспортному положенні поліетиленовою заглушкою, і вузол кріплення детонатора. Вузол кріплення детонатора має сталеву кришку з пружинним фіксатором, закріплену на дні за допомогою петлі і закриту транспортному положенні стрічкою червоного кольору. Вибух призначений для підриву заряду ВР міни при впливі на неї магнітного поля танка, бронетранспортера або автомобіля. Підривач боєприпасу складається з корпусу, дистанційного механізму, гідросповільнювача, електронного блоку, запобіжно-виконавчого механізму та містить елементи вогневого ланцюга: електрозапальник, піротехнічний підсилювач і два капсулі-детонатори. Знизу корпус підривника закритий кожухом. Корпус підривача боєприпасу виготовлений з алюмінієвого сплаву. Дистанційний механізм призначений для приведення в дію та для забезпечення безпеки під час встановлення мін загороджувачем та вручну. Дистанційний механізм складається з втулки, кришки, котушки і скоби. Кришка утримується у втулці за рахунок розвальцованого ковпачка. Для захисту кришки від випадкового вибуху на неї надягається чека, яка застібається шпилькою. Нитка, намотана на котушку, утримує скобу у нижньому положенні. Один кінець нитки прикріплений до кришки дистанційного механізму, другий вільний. Скоба утримує шток гідросповільнювача в притисненому стані і не дає можливості движку запобіжно-виконавчого механізму підривника перевестися в бойове положення. Пусковий механізм на відміну дистанційного механізму немає нитки для дистанційного пуску. Він складається з втулки, кришки (чорного кольору), втулки з гвинтами і ковпачком і зрізної чеки. Кришка пускового механізму утримується у втулці за допомогою втулки, ковпачка та зрізної чеки. Гвинтом

пусковий механізм утримує шток гідросповільнювача у притисненому положенні. Зусилля зриву кришки пускового механізму таке саме, як і у дистанційного механізму. Вибух міни допускає спорядження його двома типами джерела струму ампульним, що встановлюється на заводі-виробнику, або гальванічним елементом, що встановлюється перед застосуванням міни. Конструкція заглушки джерела струму залежить від типу джерела струму, що застосовується. При використанні у підривнику вбудованого джерела струму центральний отвір заглушки закрито поліетиленовою заглушкою з петлею зі стрічки червоного кольору, а при використанні змінного джерела струму верхня частина заглушки виконана суцільною з поглибленням під виступи ключа. Рукоятка з валиком через пружину кручення з'єднана з двигуном запобіжно-виконавчого механізму підривника і призначена для переведення підривника з транспортного положення в бойове. Колір поверхні рукоятки, зверненої назовні, відповідає положенню: червоний - транспортному, захисний бойовому. Рукоятка законтрена стопором і опломбована пломбою. Стопор рукоятки має із зовнішнього боку паз під крюкоподібний виступ ключа. Гідросповільнювач забезпечує час далекого зведення підривника від 20 до 700 с. Він встановлений у центральному гнізді корпусу підривника під дистанційним (пусковим) механізмом. Гідросповільнювач складається з корпусу, кришки, штока, поршня і пружини. Корпус заповнений морозостійким каучуком. Електронний блок призначений для обробки, посилення і перетворення сигналу, створюваного технікою, що рухається, в електричний сигнал. Електронний блок розміщується усередині корпусу підривника. Несучим вузлом блоку є основа, до якого кріпляться з одного боку друкована плата з радіоелементами, магнітопровід з індукційною котушкою датчика, а з іншого боку корпус запобіжно-виконавчого механізму підривника. Основа електронного блоку жорстко кріпиться до корпусу підривника за допомогою обтискання кожуха. Для підвищення механічної міцності внутрішній об'єм корпусу з електронним блоком залитий пінополіуретаном. Запобіжно-виконавчий механізм підривника призначений для запалення порошу ВЗ та пуску ПІМ міни при спрацьовуванні підривника, механічного розриву в вогневих ланцюгах підривник - ВЗ, підривник - ПІМ і для розриву електричного ланцюга підривника в транспортному положенні. Запобіжно-виконавчий механізм складається з корпусу і двигуна, в якому встановлені капсули-детонатори і поворотна пружина. Центральний капсуль-детонатор закріплений в двигуні бойком, а бічний - різьбовою втулкою. У корпусі запобіжно-виконавчого механізму розміщені електрозапальник, піротехнічний підсилювач, нерухомий контакт штирьової і поворотний контакт, що має механічний зв'язок з движком. У транспортному положенні контакти розімкнуті. Вишибний заряд призначений для видалення підривника та маскувального шару ґрунту із зони формування кумулятивного струменя перед вибухом міни. Вишибний заряд складається з дюралюмінієвого корпусу, спорядженого порохом зарядом.

Серед найбільш складних елементів які мають найнижчу надійність є підривача боеприпасу. Руйнування одного з елементів що призводить до ініціювання приведе до нейтралізації об'єкту. Розглянемо структурну схему підривача боеприпасу(рис. 1)

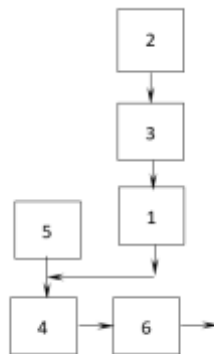


Рисунок 1-Логічна модель підривача боеприпасу:

1 - корпус; 2 - дистанційного механізму; 3 - гідросповільнювач, 4 - електронного блоку, 5 - запобіжно-виконавчий механізм; 6 - елементи вогневого ланцюга

Для того щоб система працювала з максимальною ефективністю, в кожному конкретному випадку необхідно вирішити задачу вибору мінімально достатньої кількості елементів для ураження[7]. Одним з головних критеріїв вибору елементу системи які характеризують технічний стан є інформативний. Елемент вибраний за інформативним критерієм дозволяє з найбільшою вірогідністю вивести підривач боеприпасу з працездатного стану без детонації головного заряду.

Для вибору елемента структурною схемою. Система, що розглядається складається з $N = 6$ елементів. За можливі стани приймемо відмову кожного елементу. Контроль стану підривача боеприпасу

плануємо за кількістю параметрів рівному кількості елементів $k = 6$. В результаті дослідження відмов елементів системи створена таблиця станів (табл. 1). Вірогідність відмов кожного елементу для попереднього розгляду приймемо рівними:

$$P(S_i) = 1/N = 1/6. \quad (1)$$

В даному випадку ентропія системи з кінцевою кількістю станів максимальна.

Вихідна ентропія системи визначається кількістю можливих станів:

$$H(S_i) = \sum_{i=1}^n P(N_i) \log_2 P(N_i) = -6 \frac{1}{6} \log_2 \frac{1}{6} = 2,582 \text{ біт}. \quad (2)$$

Позначимо через m_1 - число одиниць в кожному рядку таблиці, m_0 - число нулів в тому ж рядку. Залишкова невизначеність при контролі кожного параметра на першому кроці обчислюється за формулою

$$H\left(\frac{A}{Z_k}\right) = \frac{m_1}{N} \log_2 m_1 + \frac{m_0}{N} \log_2 m_0. \quad (3)$$

Результати розрахунку залишкової ентропії наведені в останньому стовпчику табл. 1.

Таблиця 1. – Таблиця станів

Діагностичний параметр Z_k	Стани						$H\left(\frac{A}{Z_k}\right)$
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	
1	0	0	0	1	1	1	3,662
2	1	0	1	1	1	1	3
3	1	0	0	1	1	1	3,662
4	0	0	0	0	0	1	3,662
5	1	1	1	1	0	1	3,011
6	0	0	0	0	0	0	3,662

На основі розрахунків побудовано діаграму ентропії системи, яка дозволяє встановити інформативну значимість діагностичного параметру.

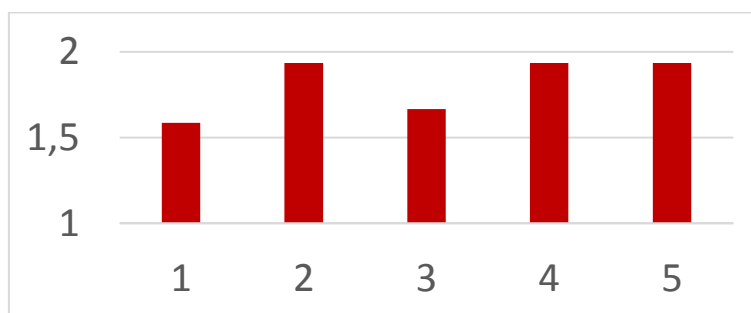


Рисунок 2 - Діаграма ентропії системи

Дійсно, що елемент системи, який має найменшу залишкову ентропію, дає найбільшу кількість інформації про її стан, і тому він повинен руйнуватись у першу чергу. Таким елементом буде Z_1 . Тобто дивлячись на структурну схему підривача боеприпасу (рис. 1) даний номер відповідає корпусу. Наступними елементами, які суттєво впливають на ентропію системи будуть Z_2, Z_4, Z_5 . Дані номери відповідають системам дистанційного механізму, електронного блоку, запобіжно-виконавчому механізму.

Висновки

Розроблено структурну схему військових мін, яка враховує особливості взаємодії складових, що дозволило визначити взаємні впливи різних частин об'єкта дослідження на його стан.

Визначено можливі стани військових мін, що є основою для аналізу їхньої поведінки в різних умовах.

Встановлено вразливі елементи системи, що створює підґрунтя для розробки ефективної системи розмінування. Данні результати забезпечують базу для подальших досліджень та розробок у сфері знешкодження мін шляхом гідромеханічного руйнування.

S. Zaichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

Muzi Li¹, master, ORCID 0009-0001-8063-6206

V. Gorodetsky¹, Cand. Sc. (Phys.,-Math.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4642-3060

S. Korol², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof

V. Shalenko³, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6984-0302

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

³Kyiv National University of Construction and Architecture

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE DEMINING PROCESS BY HYDRODYNAMIC DESTRUCTION

The study presents the rationale for the parameters of a mine clearance process using the method of hydrodynamic destruction, which enables the effective neutralization of military mines without the risk of detonating the primary charge. This approach enhances safety during demining operations and minimizes the risk of adverse consequences in conflict zones. A detailed analysis of the structural features of the most common types of military mine detonators and fuzes was conducted, allowing for the identification of key design elements affecting the functionality and reliability of explosive devices. Based on this analysis, a logical model of the research object was developed, accounting for the relationships between the primary structural elements of the system and enabling the determination of potential system states. To identify vulnerable elements of military mines among an infinite range of possible combinations of physical parameters, the use of an informational criterion based on Shannon's entropy concept was proposed. This criterion facilitated the identification of elements that significantly reduce system uncertainty and have a decisive impact on its functionality. The vulnerable element was defined as the structural unit of the device characterized by the lowest residual system entropy and the most significant influence on the state of the explosive object. The study concluded that the most vulnerable element, on which the overall functionality of the system depends, is the casing of the munition fuze, which plays a key role in ensuring the safety and stability of the design. The research not only highlights the innovative use of hydrodynamic destruction for demining operations but also delves deeply into the interplay of structural and functional aspects of explosive devices. The application of Shannon's entropy to assess system vulnerabilities provides a novel analytical framework for demining technology. This approach enables the precise identification of critical components whose failure could neutralize the explosive device without triggering unintended consequences. The emphasis on the fuze casing as the primary vulnerable element underscores the importance of understanding its mechanical properties and interactions within the device. This finding opens avenues for designing specialized tools and methods tailored to disrupt the functionality of explosive devices more safely and efficiently. By integrating advanced analytical models with practical demining techniques, the study contributes to a significant leap forward in the field of humanitarian demining and military engineering.

Keywords: demining system, explosive device, military mine, ammunition fuse.

References

1. Voitenko, Y., Sydorenko, Y., Zakusylo, R., Goshovskii, S., Zaichenko, S., & Boyko, V. On the Influence of the Liner Shape and Charge Detonation Scheme on the Kinetic Characteristics of Shaped Charge Jets and Explosively Formed Penetrators //Central European Journal of Energetic Materials. – 2023. – T. 20. – №. 4. <http://dx.doi.org/10.22211/cejem/173190>
2. Voitenko Y., Zakusylo R., Zaychenko S. Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier //Central European Journal of Energetic Materials. – 2021. – T. 18. – №. 3. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785017090024>.
3. Zaichenko, S., Frolov, O., Stovpnik, S., & Veremiichuk, Y. (2018). Investigation of the change in the strength properties of a soil mass by mechanical sensing. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. (3 (9)), 19-26.
4. Voitenko, Y.I., Buhaets, V.P. The Effect of Aluminum on the Impact Properties of a Composite Shaped Charge Jet. Herald of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ser. «Mining» 2016, 30: 36-48
5. Rumyantsev B. V., Klimenko V. Yu. Phase Transformations in Copper Cumulative Jet Penetrating into Silicon Carbide // Technical Physics Letters. - 2011. - V. 37, no. 21. - p.p. 1130-1033.
6. Wu, J.; Wang, H.; Fang, X.; Li, Y.; Mao, Y.; Yang, L.; Yin, Q.; Wu, S.; Yao, M.; Song, J. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle.// Materials 2018, 11(9): 1741.
7. Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity// Tech. Physics.. – 2007. – V. 52., # 10. – P. 1379-1382..
8. Vasilyev V.D., Grigryev A.Yu., Dunilov K.K., Semashkin G.V., Frolenkov Yu.A., Dushenok C. A. Method and device for the destruction of explosive objects. Patent 2500980 МПК F 42D5/04., 2013..

Надійшла: 06.02.2025

Received: 06.02.2025