

Підгородецький М. М., канд. військ. наук ¹	(0000-0003-4807-8635)
Куртсеїтов Т. Л., д-р техн. наук, професор ¹	(0000-0001-6478-6469)
Ясько В. А., канд. військ. наук, доцент ²	(0000-0002-4905-083X)
Ментус І. Е., канд. військ. наук, доцент ²	(0000-0003-2223-4775)

¹ – Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ;

² – Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський

Фізичне моделювання мін та інженерних боєприпасів, адекватних за показником теплової інерції

Резюме. Запропонований підхід щодо тестування та проведення експериментів із використанням фізичних моделей мін адекватних за показником теплової інерції дасть змогу розширити коло учасників, які зможуть брати участь у розробленні сучасних і вкрай необхідних засобів розвідки, пошуку, ідентифікації, знешкодження мін та вибухонебезпечних предметів.

Ключові слова: міна; модель міни; вибухонебезпечний предмет; показник теплової інерції; саморобні вибухові пристрої.

Постановка проблеми. Аналіз збройних протистоянь останніх десятиліть, які характеризуються широким застосуванням мін та вибухонебезпечних предметів (ВНП), у тому числі саморобних вибухових пристроїв (СВП), свідчить про значне зростання кількості втрат особового складу і військової техніки [1]. Щоденно по всьому світі внаслідок підриву на протипіхотних чи протитанкових мінах, або на вибухових пристроях, що діють аналогічним чином, я саме розтяжках, або внаслідок детонації вибухонебезпечних залишків війни (ВЗВ) гине та зазнає поранень щонайменше 10 осіб [2]. Як показує реальність сьогодення, жертвами мін стають некомбатанти, які підриваються на мінах, якими забруднена значна територія східних областей України. Так, за офіційною інформацією Управління Верховного комісара ООН з прав людини, упродовж усього періоду конфлікту на сході України з 14 квітня 2014 року по 30 квітня 2021 року загинуло та було поранено близько 10 000 осіб [3]. Оскільки терени окремих районів Донецької і Луганської областей є найбільш забрудненими мінами та боєприпасами в світі, то зменшення ризиків, які можуть виникати внаслідок підриву вибухонебезпечних предметів, до безпечного для життя і здоров'я населення рівня визначено однією із цілей протимінної діяльності в Україні.

Здійснюється ця діяльність на засадах державної підтримки, залучення національних та іноземних інвестицій і допомоги у сфері протимінної діяльності. Зазначене свідчить про зростання ролі виконання заходів розмінування, підвищення актуальності

питань пошуку, виявлення, ідентифікації, знешкодження мін та ВНП як під час гуманітарного розмінування, так і під час ведення бойових дій.

Одним із найбільш складних проблемних питань сьогодення в галузі розмінування є забезпечення ефективного функціонування систем, засобів, комплексів пошуку, виявлення мін і ВНП (СВП).

Аналіз функціонування системи протимінної діяльності свідчить [4], що на етапі розроблення та адекватної практичної апробації зразків пошуку, виявлення, ідентифікації, знешкодження мін та вибухонебезпечних предметів виробники та розробники зустрічаються з проблемою використання натуральних мін. Оскільки розробники та виробники, не мають допуску, доступу та ліцензії на роботи із вибуховими речовинами та інженерними боєприпасами у зв'язку з правовими регуляторними обмеженнями щодо поводження із зазначеними речовинами та засобами [5–7], то вони відмовляються від подальшого дослідження та розроблень новітніх засобів.

Усе це свідчить про зниження конкурентності у сфері розроблення та створення новітніх засобів розвідки, пошуку мін та вибухонебезпечних предметів, що, відповідно, призводить до монополізації у сфері протимінної діяльності та зниження якості розроблених засобів.

На теперішній час фізичне моделювання мін та інженерних боєприпасів здійснюється лише з урахуванням таких показників, які характеризують геометричну подібність, вагу міни, матеріал корпусу, тип вибухової

речовини. Принцип дії новітніх засобів розвідки, пошуку мін та вибухонебезпечних предметів, які базуються на методі теплової індукції потребує урахування показників теплової інерції [8–11]. На сьогодні моделювання з урахуванням показника теплової інерції не проводиться. Тому фізичне моделювання мін та інженерних боєприпасів, адекватних за показником теплової інерції є актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика створення та функціонування ефективної системи протимінної діяльності розкрита у працях іноземних та вітчизняних фахівців і вчених. Аналіз останніх досліджень і публікацій іноземних та вітчизняних фахівців і вчених [8–11] показав, що в них розглянуто проблематику створення та функціонування ефективної системи протимінної діяльності. У [8, 11] розглядаються напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування та дистанційного знищення ВВП. У матеріалах [9, 10] наведені результати теоретичних наукових досліджень, спрямованих на моделювання процесів та обґрунтування вимог до засобів пошуку та виявлення ВВП різними методами.

Проведений аналіз світових сучасних розробок та тенденцій у галузі розмінування показав, що найбільш перспективними та ефективними засобами розмінування є засоби із використанням новітніх технологій, таких як технологія автоматизованого виявлення мін із використанням багатоспектральної зйомки з безпілотних літальних апаратів, що узагальнена у так званому підході безконтактної дистанційної розвідки, виявлення та ідентифікація мін. Ще одним підходом є застосування інфрачервоної апаратури, яка реагує на різницю температур між міною та поверхнею місцевості. Зазначені технології, насамперед, націлені на збереженні життя та здоров'я людей під час проведення зазначених робіт.

Таким чином аналіз відомих доступних досліджень і публікацій дав змогу дійти висновку, що ці роботи спрямовані на дослідження та визначення фундаментальних засад функціонування зазначених систем тощо. Водночас, питання пов'язані з розвитком, розробленням та апробацією засобів розвідки, пошуку, виявлення, ідентифікації, знешкодження мін та ВВП із використанням фізичних моделей мін з урахуванням показників теплової інерції є новими не лише для України, але й для усього

світу. Отже у відкритому друці така інформація майже не публікується.

Мета статті. Систематизувати світовий досвід, дослідити та теоретично обґрунтувати сучасні підходи до фізичного моделювання мін та інженерних боєприпасів, адекватних за показником теплової інерції.

Виклад основного матеріалу. Рівень вимог, які висуваються до якості зразків пошуку, ідентифікації, знешкодження мін і ВВП мають відповідати світовим і державним стандартам у сфері протимінної діяльності [7, 12]. Вирішення цього складного завдання практично неможливе без впровадження новітніх технологій та розробок.

Міна або інженерний боєприпас (ІБ) являє собою складну систему, яка характеризується фізичними, фізико-хімічними та конструктивними параметрами. Під моделлю міни слід розуміти деякий геоморфний об'єкт, більш простий в усіх відношеннях, окрім тих параметрів та ознак, вплив яких необхідно визначити та дослідити. Для того ж самого об'єкта моделювання можна обрати декілька моделей, які відрізняються одна від одної кількістю параметрів, які беруться до уваги. Модель, може відображати одночасно ознаки окремих частин об'єкта та його самого або ж тільки властивості об'єкта в цілому. Вибір моделі визначається вирішенням практичних завдань. За способами реалізації, моделі можуть бути знаковими та реальними. Знакові моделі являються математичним описом процесів. Реальні моделі якими являються фізичні об'єкти, поділяють на фізичні та математичні [13].

Фізичне моделювання мін та ІБ – це спосіб експериментального дослідження на моделях, що мають однакову фізичну природу з об'єктом моделювання (бойових мін), та являють собою деякий макет об'єкта, що вивчається. Для інженерів-конструкторів метод фізичного моделювання особливо привабливий, оскільки фізична природа моделі та об'єкта моделювання не змінюється і фізична модель відображає усі сторони процесу, який досліджується, що дає змогу уточнювати деякі деталі, які не мали відображення у вихідній знаковій моделі. Однак вказану модель можна реалізувати лише за наявності подібної моделі у об'єкта моделювання. До того ж під подібною слід розуміти модель, яка відрізняється лише змінами масштабу вхідних величин, тобто які можна охарактеризувати однаковими знаковими моделями в безрозмірній формі.

У процесі математичного опису процесу в зазначеній формі, параметри об'єднуються у вигляді комплексів. Для подібних між собою процесів значення безрозмірних комплексів мають співпадати. Отже такі комплекси, або критерії подібності, визначають групу подібних об'єктів та число незалежних параметрів моделі (мір свободи) [13].

Критерії подібності дають змогу встановити аналогію між різними явищами, а можливість фізичного моделювання можна визначити за формулою

$$f = m - n, \quad (1)$$

де f – число мір свободи;

m – кількість параметрів, критеріїв, які характеризують процес;

n – число критеріїв подібності, які слід підтримувати однаковими в процесі дослідження.

У разі якщо незалежні параметри відсутні $f < 0$, то немає свободи вибору параметрів моделі та об'єкт моделювання міна або ІБ немає собі подібного. У цьому разі фізичне моделювання неможливо здійснити. У разі, якщо результати протікання процесу практично не залежать від будь-якого критерію подібності, тоді можливе приблизне фізичне моделювання [13].

Теорія подібності є основою запропонованого фізичного моделювання, яка встановлює умови подібності моделі та оригіналу, дає змогу узагальнювати одиничні експерименти в безрозмірних критеріях і застосовувати знайдені залежності на подібні системи [13]. Фізичні моделі мають відтворювати увесь комплекс властивостей та явищ об'єкта [14]. Перевагами фізичного моделювання мін та ІБ перед іншими способами моделювання є наочність (фізична

модель відтворює практично усі властивості оригіналу), можливе вивчення процесу без складання його математичного опису та можливість виробничого процесу в лабораторних умовах. Адекватність моделювання є однією з властивостей, яка показує ступінь відповідності моделі, тому реальному об'єкту для опису якого воно створюється і від якої залежить якість проведеного експерименту.

Основним принципом теорії подібності при фізичному моделюванні, передбачається не лише геометрична подібність моделі з об'єктом моделювання, але й подібність ваги, сил, матеріальних середовищ тощо [13–15]. Водночас фізична модель мін або ІБ має відповідати критеріям подібності основними з яких є: критерій гідродинамічної подібності (Критерій Рейнольдса); критерій теплової подібності (Критерій Нуссельта, Число Грасгофа, Критерій Пекле.), критерій теплопровідності (Фур'є, Біо), на основі яких визначають наскільки модель міни та ІБ подібна оригіналу [13–15].

Фізичне моделювання мін та ІБ починається з визначення відношення основних показників об'єкта моделювання, які характеризують геометричну подібність (ширину, висоту, діаметр, об'єм та інші), масу міни, матеріал корпусу, тип вибухової речовини тощо. Водночас для розроблення та тестування засобів пошуку, виявлення, ідентифікації, знешкодження мін та вибухонебезпечних предметів, що функціонують на різних фізичних принципах дії із використанням фізичних моделей мін, які створені з урахуванням лише зазначених характеристик мін, не достатньо (табл. 1) [16, 17].

Таблиця 1

Основні характеристики протитанкових мін

Характеристика	ТМ-62М	ТМ-62ПЗ	ТМ-62Т	ТМ-62П2	ТМ-62П
Матеріал корпусу	метал	поліетилен	капронова тканина	пластмаса	пластмаса
Маса, кг	9,5-10	8,0-8,7	8,3-9,2	9,4-10	9,0-11,0
Маса вибухової речовини, кг (тротил)	7,0-7,5	6,5-7,2	7,0-7,9	6,5-7,0	7,6-8,0
Амонітом А-50	-	-	-	-	7,5
Амонітом А-80	-	-	-	-	6,6
Діаметр, мм	320	320	320	320	340

У фізичних моделях мін для імітації вибухових речовин використовуються різні інертні матеріали (дерево, гіпс, пісок, шлак, цементна суміш тощо), фізичні властивості яких не відповідали реальному об'єкту моделювання або ж їх відповідність не доводилась за відсутності необхідності, або ж потреби в цьому. А моделювання фізичних

властивостей вибухових речовин у моделях мін завершувалась максимум моделюванням маси [16, 17], що зі свого боку унеможливило їх використання для тестування новітніх засобів розвідки, пошуку мін та вибухонебезпечних предметів, які базуються на методі теплової індукції який потребує урахування показників теплової інерції [8–11].

Оскільки фізичне моделювання лише згідно із зазначеними параметрами не завжди відповідає критерію теплової подібності Нуссельта, який характеризує інтенсивність конвективного теплообміну N_u та визначається за формулою [15]

$$N_u = kL/\lambda, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі;

L – характеристичний розмір (об'єм);

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Коефіцієнт тепловіддачі k характеризує інтенсивність тепловіддачі та дорівнює кількості теплоти, яка передана в одиницю часу через одиницю площі поверхні за температур 1К між поверхнею та середовищем-теплоносієм [15].

Густина потоку q тепла визначається за формулою

$$N_u = k \cdot S \cdot \Delta T, \quad (3)$$

де S – площа поверхні теплообміну;

ΔT – різниця температур.

Сукупність властивостей матеріалу, пов'язаних із теплопровідністю і об'ємною теплоємністю в інженерному та науковому моделюванні теплопередачі називають тепловою інерцією. Показник теплової інерції I матеріалу визначається за формулою [15]

$$I = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c}, \quad (4)$$



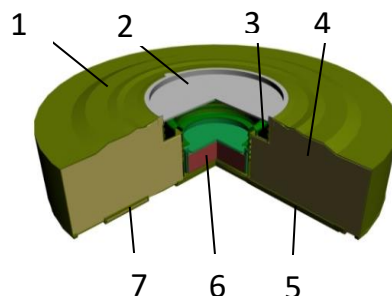
а

де ρ – густина матеріалу;

c – питома теплоємність матеріалу.

Із стрімким розвитком новітніх технологій, які впроваджуються в процеси розвідки та пошуку мін на принципі багато- та гіперспектрального аналізу виникла необхідність визначення та перевірки нових показників у фізичних моделях мін та ІБ. Розрахунки та експерименти в стаціонарному стані й у різних середовищах можуть дати неточні результати з урахуванням того, що теплова інерція як міни, так і фізичної моделі міни є важливими. Особливо це стосується систем, які корелюються та чутливі до теплових показників об'єктів.

Існує декілька способів підтвердження адекватності фізичних моделей мін та ІБ. Як варіант для перевірки відповідності об'єкту моделювання та підтвердження адекватності фізичної моделі мін та ІБ у роботі запропоновано використовувати показники теплової інерції. Для виготовлення інженерних боєприпасів використовуються різні типи вибухових речовин. Відповідно їх фізичні характеристики різні. У відкритих джерелах відсутні відомості щодо теплофізичних характеристик ВР, окрім тротилу та аміачної селітри [16, 17], які вкрай важливі для проектування та виготовлення фізичних моделей мін та ІБ (рис. 1).



б

Рис. 1 а – вигляд фізичної моделі міни ТМ-62М в транспортному стані; б – розріз міни ТМ-62М з пробкою: 1 – корпус; 2 – поліетиленова кришка; 3 – прокладка; 4 – заряд ВР; 5 – дно; 6 – ДД; 7 – провухина для закріплення ручки для перенесення.

Отже проведені у роботі розрахунки показників теплової інерції матеріалів (табл. 2) дають змогу надалі підбирати матеріали для заміника вибухових речовин, адекватного не лише за показником маси, а й за показником теплової інерції. Для прикладу, порівняно з тротилом, найкращими матеріалами для його фізичного моделювання будуть: піногіпс марки 846; пінобетон марки 916.

Водночас фізико-хімічні властивості зазначених матеріалів дають змогу варіювати із показником теплової інерції шляхом зміни пористості матеріалу.

Перевірка достовірності моделювання та оцінюванн ступеня відповідності моделі міни об'єкта моделювання (бойової міни або ІБ) у роботі проведено з використанням методів теорії подібності.

Таблиця 2

Визначенні значення показників теплової інерції основних матеріалів

Найменування матеріалу	Густина, кг/м ³	Теплопровідність λ , Вт/(м ³ ·°С)	Питома теплоємність c , кДж/кг·°С	Теплова інерція матеріалу I , кДж/кг·°С
Скловата	200	0,0372	0,67	2,232666567
Дерев'яні труски	200	0,07	2,7	6,14817046
Пінобетон марки 366	366	0,098	1,13	6,366383589
Цегла ізоляційна	500	0,1395	0,8	7,469939759
Піногіпс марки 641	641	0,142	0,88	8,949824579
Пінобетон марки 611	611	0,14	1,13	9,831591936
Піногіпс марки 740	740	0,169	0,88	10,49060532
Піногіпс марки 715	715	0,178	0,88	10,58289185
Дерево сосна	448	0,107	2,7	11,37660758
Цегла будівельна	800	0,23	0,8	12,13260071
Слюда	290	0,582	0,88	12,18714076
Піногіпс марки 850	850	0,199	0,88	12,20049179
Піногіпс марки 846	846	0,204	0,88	12,32371373
Тритил	1500	0,43	0,328	14,54510227
Пінобетон марки 916	916	0,217	1,13	14,9870731
Пінобетон марки 927	927	0,234	1,13	15,65622368
Резина	1200	0,163	1,38	16,42948569
Дерево дуб	800	0,207	1,75	17,02351315
Пісок сухий	1500	0,326	0,798	19,75403756
Земля суха	1500	0,1385	2,01	20,43471311
Гіпс	1650	0,291	0,88	20,55558318
Парафін	920	0,268	2,2	23,2901696
Портландцемент	1900	0,303	1,13	25,50570524
Шлакобетон	2150	0,43	0,88	28,5229732
Цукор пісок	1600	0,582	1,26	34,25364214
Крейда	2000	0,93	0,88	40,45738499
Глина вогнетривка	1845	1,04	1,09	45,73283284
Земля волога	1700	0,658	2,01	47,4171488
Асфальт	2110	0,698	2,09	55,48071917
Бетон	2300	1,28	1,13	57,67772534
Свинець	11400	34,9	0,129	226,5478757

Як відомо [14], рівнянням Фур'є описується задача теплопровідності для трьохвимірного тіла за відсутності в ньому джерел тепла.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (5)$$

де $T(x, y, z, t)$ – температура, t – час, x, y, z – просторові координати, $\alpha = \lambda/c\rho$.

Для визначення розв'язку конкретної задачі до рівняння Фур'є додаємо умови єдиності його розв'язку, які складаються з початкових та граничних умов. Початкова умова в задачі теплопровідності завжди має вигляд

$$T(x, y, z, 0) = T_{\Omega}(x, y, z), (x, y, z) \in \Omega,$$

і означає, що в початковий момент задається значення температури в кожній точці області

Ω , яку займає тіло (модель міни).

За відомими працями [14] у задачах з теплопровідністю граничні умови задаються, як правило, *трьох типів*.

Перший – задається розподіл температури на поверхні тіла, як функція часу $T(x, y, z, t)|_{(x,y,z) \in S} = T_S(x, y, z, t)$, $t > 0$ умову такого типу досить рідко вдається реалізувати на практиці.

Другий – заданий тепловий потік в усіх точках поверхні тіла. Зважаючи на означення теплового потоку

$$(q = -\lambda \partial T / \partial \vec{n} = -\lambda \vec{n} \text{ grad } T),$$

гранична умова може бути записаною у вигляді

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} |_{(x,y,z) \in S} = -\frac{q_S(x, y, z, t)}{\lambda}, \quad t > 0,$$

теж досить рідко зустрічається в конкретних фізичних задачах.

В інтересах дослідження та вирішення задачі доцільно застосувати *третю* умову, оскільки відома температура зовнішнього по відношенню до тіла середовища T . Звернемося до закону Фур'є: тепловий потік між середовищем та тілом у деякій точці поверхні тіла пропорційний з коефіцієнтом пропорційності a , який називається коефіцієнтом теплообміну, різниці між температурою середовища та температурою поверхні моделі міни або ІБ в даній точці. На основі закону Фур'є гранична умова в цьому разі набуває вигляду

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} + \frac{a}{\lambda} T\right)_{(x,y,z) \in S} = \frac{a}{\lambda} T_c(x, y, z, t), \quad t > 0.$$

Зауважимо, що інколи задається змішана гранична умова, тобто на різних, доповнюючих одна одну частинах поверхні моделі міни задаються різні умови із зазначених вище.

За відомим підходом знаходження умов подібності в задачах теплопровідності, позначимо через $T_t, T_l, x_0, y_0, z_0, t_0$, відповідно характерні значення для розподілу температури в часі та в просторі, характерні значення довжин у трьох просторових вимірах та характерне значення часу. Тоді в безрозмірних змінних

$$T' = \frac{T}{T_t}, T'' = \frac{T}{T_l}, t' = \frac{t}{t_0}, \\ x' = \frac{x}{x_0}, y' = \frac{y}{y_0}, z' = \frac{z}{z_0},$$

вираз Фур'є набуває вигляду

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} = \frac{\alpha T_l t_0}{T_t} \left(\frac{1}{x_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial x'^2} + \frac{1}{y_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial y'^2} + \frac{1}{z_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial z'^2} \right), \\ \left[\left(\frac{\lambda}{al} \right) = \left(\frac{l}{x_0} \frac{\partial^2 T''}{\partial x'} n_x + \frac{l}{y_0} \frac{\partial^2 T''}{\partial y'} n_y + \frac{l}{z_0} \frac{\partial^2 T''}{\partial z'} n_z \right) + T'' \right]_{(x,y,z) \in S} = \frac{T_t/T_0}{T_l/T_0} T_c(x, y, z, t).$$

Окрім параметричних критеріїв $T_l/T_0, T_t/T_0, x_0/l, y_0/l, z_0/l$ зазначений вираз утримує комплексний критерій, відомий як Біо.

$$\frac{\lambda}{al} = Bi.$$

Отже, у дослідженні задача теплопровідності загалом характеризується двома критеріями подібності комплексного типу: Fo та Bi . Її загальний розв'язок може бути представлений у вигляді

$$\frac{T}{T_0} = f \left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l}, \frac{z}{l}, \frac{t}{t_0}, Fo, Bi, P_1, P_2, \dots \right),$$

що вказує на те, що температурні поля в геометрично подібних системах (міни та її фізичної моделі) будуть подібними, якщо для них критерії Фур'є та Біо зберігатимуть свої

Для температури введено два характерних значення (T_t, T_l), а для геометричних розмірів – три (x_0, y_0, z_0). Якщо для цих величин ввести по одному характерному значенню T_t та l , то зазначений вираз трансформується в

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} = \frac{\alpha t_0 T_l/T_0}{l^2 T_t/T_0} \left(\frac{l^2}{x_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial x'^2} + \frac{l^2}{y_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial y'^2} + \frac{l^2}{z_0^2} \frac{\partial^2 T''}{\partial z'^2} \right).$$

Отже, єдиним степеневим комплексом, збереження свого значення яким залишає рівняння теплопровідності інваріантним, є

$$\frac{\alpha t_0}{l^2} \equiv Fo.$$

Визначений комплекс називається критерієм Фур'є [14].

Оскільки значення T_t, T_l, x_0, y_0, z_0 задані параметрами натуральної міни та досліджуваного середовища, то відношення $\frac{T}{T_0}, \frac{T}{T_l}, \frac{x_0}{l}, \frac{y_0}{l}, \frac{z_0}{l}$ входять у розв'язок у вигляді параметричних критеріїв.

Початкова умова не додає критеріїв у вигляді степеневих комплексів і приводиться до безрозмірного вигляду. Єдине, що вона може додати – це характерне значення T , тобто параметричний критерій T_l/T_0 . Аналогічний результат, але відносно параметричного критерію T_t/T_0 , отримуємо привівши до безрозмірного вигляду граничні умови

$$T(x, y, z, t)_{(x,y,z) \in S} = T_s(x, y, z, t), t > 0 \\ \text{або}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{(x,y,z) \in S} = -\frac{q_s(x,y,z,t)}{\lambda}, t > 0.$$

Інша ситуація виникає з третьою умовою, яка в безрозмірному вигляді зводиться до виразу

значення. Рівність параметричних критеріїв P_j для моделі міни та натури не є ступтевою і пов'язує між собою лише характерні значення відповідних змінних [14, 15].

Так, згідно з [14], для подібності явищ достатньо вимагати лише незмінності критерію Біо. У подібних процесах однаковим значенням числа Фур'є відповідають подібні моменти часу.

Слід зазначити, що критерій Фур'є встановлює певне співвідношення між швидкістю зміни умов зовнішнього середовища та швидкістю зміни розподілу температурного поля всередині фізичної моделі міни. Дійсно, характерне значення часу визначає темп зміни температури зовні

моделі, в той час як комбінація параметрів відповідає за темп зміни внутрішньої температури. Отже, критерій Фур'є вказує на те, що в подібних явищах теплообміну темп зміни внутрішньої температури пропорційний швидкості зміни температури зовнішнього середовища.

Розглянувши критерій Біо, який об'єднує в собі один параметр, що характеризує геометричні розміри системи (моделі та бойової міни), та два фізичні параметри, що характеризують інтенсивність передачі тепла, між моделлю міни й середовищем та всередині моделі міни, являє собою міру відношення температурного перепаду в тілі до температурного тиску, який діє між моделлю міни та середовищем.

Оскільки просторові параметри моделі міни та натурального об'єкта (бойової міни) співпадають. Проведені в дослідженні розрахунки показників теплової інерції матеріалів (табл. 2) та порівняння їх показниками теплової інерції тротилу, що зі свого боку доводить відповідність моделі міни за критеріями подібності теплопровідності Фур'є та Біо, і вказує на адекватність проведеного моделювання.

Це означає, що всі процеси, які виникатимуть у моделі міни та в об'єкті моделювання за зазначених умов, подібні без будь-яких обмежень.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, в статті теоретично обґрунтовано шляхи визначення показника теплової інерції натурних (фізичних) моделей мін, розроблені практичні рекомендації щодо натурального моделювання мін та вибухових речовин для забезпечення якості проведення експериментів.

Напрямами подальших досліджень слід вважати: розроблення сигнатур вибухових речовин та технічних вимог для створення фізичних моделей мін із урахуванням показника теплової інерції для забезпечення якості виготовлення, фізичних моделей мін та інженерних боєприпасів для проведення експериментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Валецький О. В. Минное оружие: вопросы минирования и разминирования. Москва : Крафт, 2009. 576 с.
2. Мосов С. П., Нероба В. Напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування: світовий досвід. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки.* Хмельницький, 2020. № 1 (79). С. 172–185. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v79i1.105>.
3. Втрати серед цивільних осіб в Україні, пов'язані з конфліктом. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2021-05/Conflict-related%20civilian%20casualties%20as%20of%2030%20April%202021%20%28rev%206%20May%202021%29%20UA.pdf>. (дата звернення: 21.06.2021).
4. Протимінна діяльність в Україні потребує нових підходів – Мін TOT. URL: <https://oldsite.mtot.gov.ua/ua/protyminna-diyalnist-v-ukrayini-potrebuye-novyh-pidhodiv> (дата звернення: 23.06.2021).
5. Про протимінну діяльність в Україні : Закон України від 06.12.2018 р. № 2642-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/2642-19#Text> (дата звернення: 23.06.2021).
6. ДСТУ-П ІМАС 07.30:2016 (ІМАС 07.30:2016, ІДТ) Акредитація організацій та операцій із протимінної діяльності. URL: <http://document.ua/akreditacija-organizacii-ta-operacii-iz-protiminnoy-diyalnost34578.html>. (дата звернення: 23.06.2021).
7. ДСТУ-П ІМАС 03.30:2016 (ІМАС 03.30:2013, ІДТ) Керівництво з дослідження технологій, пов'язаних із протимінною діяльністю.
8. Бочаров О. А. Методы дистанционного обезвреживания взрывоопасных предметов. *Артиллерийское и стрелковое вооружение.* 2008. № 2. С. 34–37.
9. Коцюруба В. І. Моделювання процесу пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів радіолокаційним методом. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони.* Київ, 2015. № 2 (23). С. 65–69.
10. Коцюруба В. І. Синтез структури пошукових пристроїв виявлення вибухонебезпечних предметів. *Збірник наукових праць ХНУПС.* Харків, 2016. № 4 (49). С. 97–99.
11. Безпілотна авіація у військовій справі: монографія / С. П. Мосов, М. В. Погорецький, С. М. Салій, О. В. Селюков, А. Л. Фещенко]. Київ : Інтерсервіс, 2019. 324 с.
12. ДСТУ-П ІМАС 03.40:2016 (ІМАС 03.40:2013, ІДТ) Випробування та оцінка обладнання, пов'язаного з протимінною діяльністю.
13. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. Москва : Химия, 1969. 624 с.
14. Кепич Т. Ю. Основы теории подібності та аналізу розмірностей та їх застосування в задачах механіки : навч. посібник / упорядники: Т. Ю. Кепич та О. Г. Куценко. Київ : КНУ імені Тараса Шевченка, 2004. 100 с.
15. Василенко С. М., Українець А. І., Олішевський В. В. Основы теплообміну : підручник. Київ : НУХТ, 2004. 250 с.
16. Про затвердження Керівництва з підривної (вибухової) справи у Міністерстві оборони України та Збройних Силах України : наказ МО України від 02.01.2013 р. № 1.

17. Про затвердження Керівництва з застосування України та Збройних Силах України : наказ інженерних боєприпасів у Міністерстві оборони МО України від 27.12.2010 р. № 700.

Стаття надійшла до редакційної колегії 02.07.2021

Physical modeling of mines and engineering ammunition, adequate in terms of thermal inertia

Annotation

Ensuring the implementation of state policy and the implementation of Ukraine's international obligations in the field of mine action involves taking measures to develop means of reconnaissance, search, identification, disposal of mines and explosives.

The products of many enterprises of the defense-industrial complex of Ukraine are means of search, identification, neutralization of mines and explosive objects. Domestic developers and manufacturers of these tools to maintain their position in a competitive market need to pay more attention to the development of their products, which are produced and developed in the shortest possible time. The level of quality, terms of development and acceptance for production directly depends on the term of practical approbation of samples.

At the same time, developers and manufacturers should use mines for adequate practical testing of samples of search, identification, disposal of mines and explosives, which is not always possible for developers and manufacturers who do not have access to work with explosives and engineering munitions in connection with legal regulatory restrictions on the handling of these substances and agents.

Therefore, testing and experimentation with samples of search and identification, is proposed to conduct using full-scale (physical) models of mines. In models of mines to replace explosives to use materials whose physical properties correspond as much as possible to natural. The adequacy of modeling is one of the properties that expresses the degree of conformity of the model to the real object for the description of which is created and on which the quality of the experiment depends.

The proposed approach testing and conducting experiments using physical models of mines will expand the range of participants who will be able to participate in the development of modern and much-needed means of reconnaissance, search, identification, disposal of mines and explosives.

Keywords: mine; mine model; explosive object; thermal inertia index; improvised explosive devices.