

УДК 351.86

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.173640

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ВИБУХУ МАЛОГАБАРИТНОГО ПРЕДМЕТУ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ЗАХИСНОГО ПРИСТРОЮ

Стецюк Є. І.

### 1. Вступ

Піротехнічні підрозділи Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту займаються очищенням об'єктів та місцевості України від вибухонебезпечних залишків війн, які відбувалися в минулому та відбуваються на теперішній час. Підвищення рівня оперативної готовності піротехніків вимагає удосконалення їх технічного оснащення. Одним з напрямків цієї діяльності є локальна локалізація малогабаритних вибухонебезпечних предметів [1]. Проте, відсутність відповідного наукового забезпечення стримує не тільки створення нових зразків захисних пристроїв, але й їх впровадження в практичну діяльність.

Тому актуальним є дослідження перспективного захисного пристрою куполоподібної форми, який повинен забезпечити локалізацію надзвичайної ситуації у разі вибуху всередині нього малогабаритного небезпечного предмету.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є захисний пристрій куполоподібної форми, який використовується піротехнічними підрозділами для локалізації надзвичайної ситуації у разі вибуху всередині нього малогабаритного небезпечного предмету. Такий пристрій відноситься до спеціальної техніки, яку передбачається використовувати для безпечного знищення малогабаритних вибухонебезпечних предметів різного походження на місці їх виявлення або транспортування до спеціально облаштованих ділянок. Корпус захисного пристрою уявляє собою ковпак з можливістю розміщення під ним вибухонебезпечних предметів, поручні для зручності перенесення та установки і збільшувач ваги, розміщений по периметру основи корпусу для щільного прилягання до поверхні.

З позицій локалізації наслідків НС (надзвичайної ситуації) у разі вибуху МВНП (малогабаритного вибухонебезпечного предмету) та використання в практичній діяльності піротехнічних підрозділів додаткового навантаження, відповідна фізична модель у разі застосування захисного пристрою має вигляд, який наведено на рис. 1.

На рис. 1 маємо наступні визначення:

$A_1$  – малогабаритний вибухонебезпечний предмет масою  $m_{внп}$ ;

$B$  – додаткове навантаження загальною масою  $m_2$ ;

$\Gamma$  – осколкопоглинач загальною масою  $m_3$ ;

$r_1$  – найбільша довжина від умовної вісі, що проходить до краю осколкопоглинача Г;

Д – поверхня, на якій знаходиться МВНП;

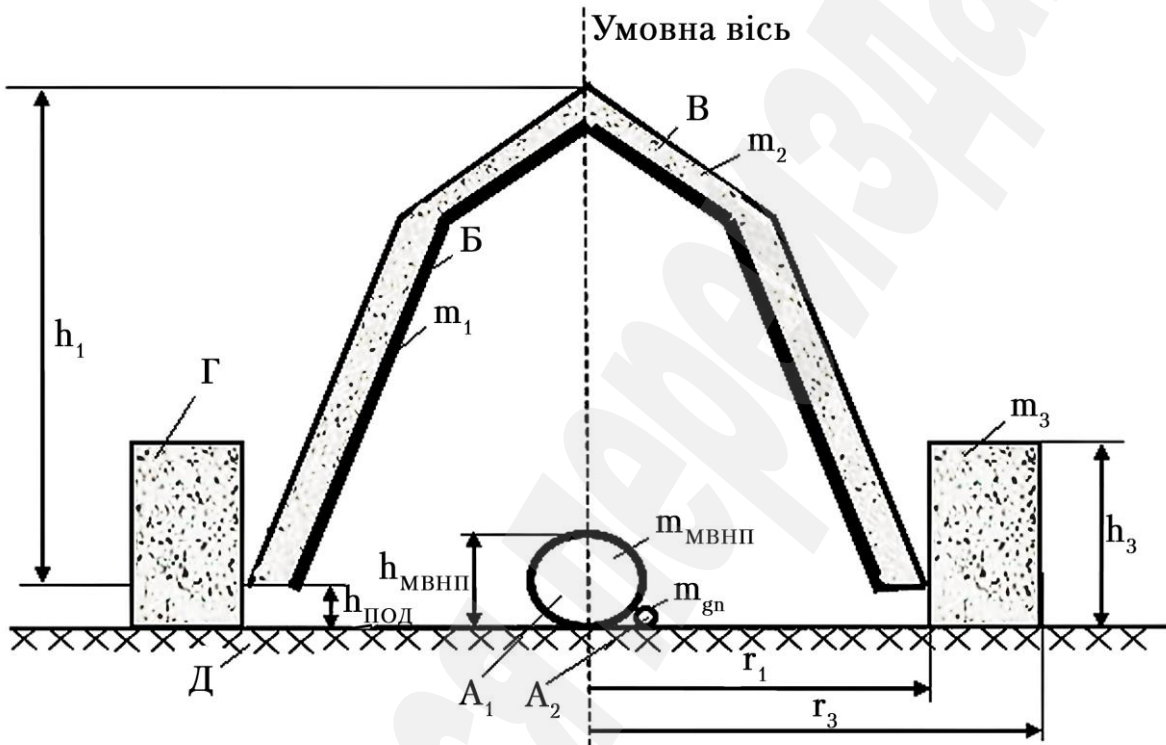
$h_{\text{ПОД}}$  – висота підльоту технічного засобу з додатковим навантаженням внаслідок вибуху МВНП;

$A_2$  – детонаційний пристрій масою  $m_{\text{дн}}$ ;

$h_1$  – висота пристрою Б;

$h_3$  – найменша висота сколкопоглинач Г;

$h_{\text{МВНП}}$  – висота МВНП.



**Рис. 1.** Фізична модель локалізації наслідків вибуху малогабаритного вибухонебезпечного предмету за допомогою захисного пристрою

Відповідно, умовою ефективності застосування захисного пристрою є строге виконання системи рівнянь:

$$\begin{cases} q_1(m, v, t) = 0; \\ q_2(m, v, t) = 0; \\ q_3(m, v, t) \leq q_3^{\text{об.р}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $q_1, q_2, q_3$  – відповідно наслідки НС за рівнем пріоритетності;

$m$  – загальна маса засобів, необхідних для запобігання НС внаслідок загрози вибуху МВНП;

$v$  – швидкість виконання заходів для запобігання НС;

$t$  – загальний час проведення заходів оперативного характеру для запобігання НС;

$q_3^{об.р}$  – кількісні характеристики показників наслідків НС третьої групи пріоритетності, що відповідають об'єктовому рівню.

Діапазони варіації вхідних параметрів ( $m, v, t$ ) залежать від умов (табл. 1) як оперативного, так і технічного характеру.

**Таблиця 1**

Вплив на ефективність ліквідації надзвичайної ситуації внаслідок загрози вибуху малогабаритного вибухонебезпечного предмету

Вид впливу	Параметр		
	$m$	$v$	$t$
Технічні умови	Потужність МВНП; міцність захисного пристрою Б; габарити пристрою Б; різнохарактерність поведінки поверхні Д, на якій знаходиться МВНП	Нормативне додаткове навантаження на піротехніка	Експертна оцінка технічного стану та безпеки МВНП
Оперативні умови	Нормативно допустима вага корисного навантаження	Стан фізичної готовності особового складу	Кількість особового складу піротехнічного підрозділу, яка задіяна

Аналіз табл. 1 показує, що запобігання НС внаслідок загрози вибуху МВНП вимагає розробки рекомендацій, реалізація яких повинна забезпечити недопущення розвитку надзвичайної події до рівня НС за такими пріоритетними наслідками, як кількість жертв та кількість постраждалих. Визначення таких рекомендацій щодо локалізації наслідків НС у разі вибуху МВНП за допомогою спеціалізованого захисного пристрою вимагає отримання математичної моделі локалізації осередку НС на основі формування характеристик відповідних оперативно-технічних заходів з урахуванням низки наступних припущень:

– вся маса оперативно-технічних засобів повинна бути доставленою в осередок можливого вибуху:

$$m = m_1 + m_2 + m_3, \quad (2)$$

де  $m_1$  та  $m_2$  – маса активних засобів, яка залежить від маси МВНП, маси можливого дистанційного пристрою, а також міцнісних характеристик засобу захисту та поверхні, на якій знаходиться МВНП;

$m_3$  – маса пасивних елементів засобу локалізації, які відповідно залежать від висоти вертикального переміщення активних засобів та є фактично умовою визначення їх ваги. Тобто їх можна визначити, виходячи з габаритних параметрів технічного засобу захисту Б;

– інші технічні умови та умови оперативного характеру є умовами граничного типу, що дозволяють отримати кінцеве рішення моделі, яка формується у вигляді сукупності рішень окремих задач відповідно до кожного вагового компоненту.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – розробка математичної моделі локалізації за допомогою захисного пристрою куполоподібної форми наслідків надзвичайних ситуацій у разі вибуху малогабаритного небезпечного предмету всередині засобу захисту.

Завдання дослідження:

1. Обґрунтування припущень щодо умов застосування захисного пристрою.
2. Визначення обмежень у застосуванні обраного методу дослідження.
3. Визначення системи рівнянь, які описують процес локалізації за допомогою захисного пристрою куполоподібної форми наслідків НС у разі вибуху МВНП всередині засобу захисту, та уточнення граничних умов для їх використання.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Визначення рекомендацій щодо оперативних дій, пов'язаних з локалізацією вибухонебезпечних предметів, розглядають з двох різних позицій. По-перше, з точки зору аналізу існуючих алгоритмів бойової роботи особового складу піротехнічного підрозділу [2]. По-друге, з точки зору вибухового ураження піротехніків, коли вони застосовують засоби індивідуального захисту саперів різного класу [3, 4].

Питання роботи із спеціалізованими захисними пристроями колективного користування не розглядаються. В першу чергу це пов'язано з тим, що на сьогоднішній день самі великі труднощі виникають [5] під час виявлення та нейтралізації вибухового пристрою. При цьому використання вибухових речовин у всьому світі при проведенні терористичних актів відродило інтерес як до дослідження вибухів, так і до вивчення способів запобігання або пом'якшення шкоди від застосування вибухових речовин [6]. Емпіричний шлях вирішення задач в цій області [7] підтвердив, що в цій галузі існують серйозні проблеми. Теоретичні дослідження в області захисту від вибуху можуть бути розділені на дві області. По-перше, це розуміння того, як поширюються навантаження від вибухових і ударних хвиль. В більшості випадків аналізується їх проходження через середовище, що має різний фізичний склад [8, 9]. Також здійснюється й аналіз таких навантажень під час проходження через різноманітні геометричні форми [10, 11]. І, по-друге, вивчення пом'якшуючих механізмів для мінімізації збитку від удару і вибухового навантаження [5].

В [12] відзначено, що в основі конкретних оперативних рекомендацій, як правило, повинні лежати результати математичного моделювання складних

сценаріїв вибуху. У той же час, більшість існуючих математичних моделей [13, 14] засновані на вирішенні рівняння збереження Ейлера для маси, енергії та імпульсу. Складна взаємодія вибухових і ударних хвиль з матеріальними конфігураціями і структурами вимагає використання комп'ютерів із поліпшеними обчислювальними потужностями [15], в тому числі для прогнозування ефектів вибуху за допомогою штучних нейронних мереж [16]. При цьому кожен раз створюється фактично новий пакет прикладних програм для вирішення розробленої математичної моделі.

В той же час, на сьогодні існує кінцево-елементний пакет «ANSYS» [17], який дозволяє моделювати поведінку різномірної середовища під впливом імпульсного навантаження, спираючись на Ейлерово-Лагранжевий підхід.

Тобто, визначення та коригування існуючих оперативних процедур піротехніками вимагає розробки математичної моделі локалізації вибуху малогабаритного небезпечного предмету всередині захисного пристрою куполоподібної форми. Така модель повинна забезпечити оцінку міцності технічного засобу локалізації осколків за допомогою кінцево-елементного пакету «ANSYS». Обґрунтування рекомендацій за результатами відповідного моделювання дозволить підвищити ефективність бойової діяльності піротехнічних підрозділів без зниження рівня безпеки особового складу. А також забезпечить можливість багаторазового використання засобу захисту як для знищення вибухонебезпечних предметів, так і для їх транспортування.

## 5. Методи дослідження

Для вирішення задачі оцінки міцності технічного засобу локалізації осколків використовується метод кінцево-елементного моделювання, який реалізовано в кінцево-елементному пакеті «ANSYS» [17]. На сьогодні даний комплекс дозволяє моделювати поведінку різномірної середовища під впливом імпульсного навантаження. Всередині захисного пристрою містяться як газоподібне середовище у вигляді продуктів детонації малогабаритного вибухонебезпечного предмету і повітря, яке знаходиться під поверхнею засобу захисту, так і тверда металева поверхня. Виходячи з цього розробка математичної моделі локалізації наслідків надзвичайних ситуацій у разі вибуху малогабаритного небезпечного предмету та визначення відповідних обмежень спирається на Ейлерово-Лагранжевий підхід.

## 6. Результати дослідження

Математична модель розробляється з припущень, що має місце імпульсне навантаження, а МВНП знаходиться на складній поверхні з коефіцієнтом проникнення, що дорівнює 1, та висотою  $h_{\text{поверх}}$ , яка визначається:

$$h_{\text{поверх}} = h_1 - h_{\text{МВНП}}, \quad (3)$$

та відповідає рис. 2.

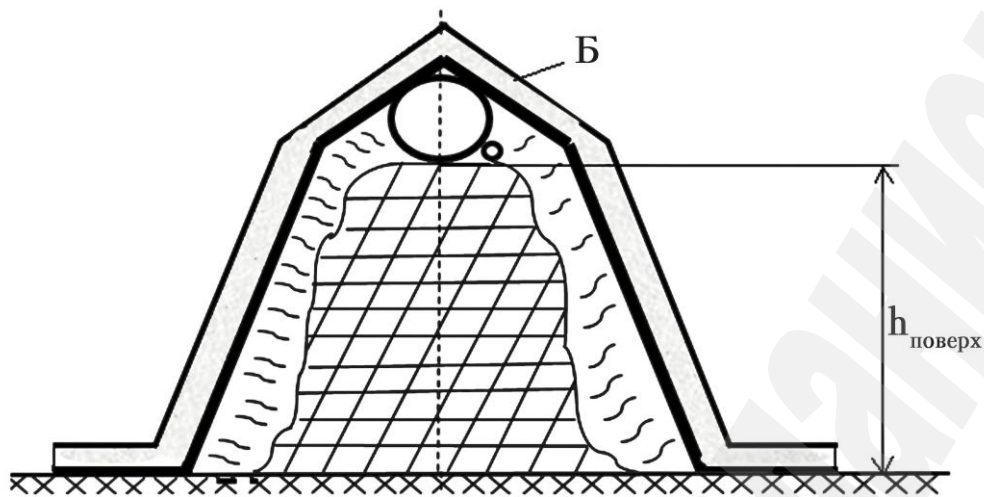


Рис. 2. Розрахункова схема

Обрана схема розміщення МВНП є найгіршим випадком з боку виникнення деформацій та збиткової напруги в засобі захисту Б. Отримані за схемою, яка наведена на рис. 2, висові значення засобу Б забезпечать умову його міцності і за менш складних умов априорі.

Оскільки моделювання процесу локалізації надзвичайної ситуації за допомогою захисного пристрою передбачає використання кінцево-елементного пакету «ANSYS», розширення продуктів детонації можна описати рівнянням Джонса-Уілкінса-Лі:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E_0}{V}, \quad (4)$$

де  $p, E_0, V$  – тиск, внутрішня енергія та відносний об'єм, відповідно;  $A, B, R_1, R_2, \omega$  – емпіричні константи.

Це рівняння входить до бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYNта дозволяє вирішити задачу визначення міцності конструкції засобу захисту Б під час вибуху. І тим самим визначити масогабаритні характеристики засобу Б, у відповідності до яких його застосовує за призначенням бойовий розрахунок піротехнічного підрозділу.

Зазначене рівняння (4) слід доповнити рівнянням ізоентропічного розширення Орленка Л. П. [18]:

$$p_s = B_0 \cdot p^k + C_0 \cdot p^\Gamma, \quad (5)$$

де  $B_0, C_0, k$  – параметричні константи рівняння;  $\Gamma$  – коефіцієнт Грюнайдена.

Такий підхід дозволяє охопити весь спектр вибухонебезпечних речовин, як промислових, так і саморобних.

Значення коефіцієнта  $\Gamma$  коливається в межах від 0,25–0,35 для малих значень густини  $\rho=1000\text{--}1600 \text{ кг/м}^3$  до 0,7–1 для  $\rho \geq 10000 \text{ кг/м}^3$ .

Параметри  $B_0, C_0, k$  визначаються через параметри детонаційної хвилі в точці Чапмена-Жуге [18] наступним чином:

$$B_0 = \frac{p_H - \Gamma \cdot \rho_H \cdot E_H}{\rho_H^k} \cdot \frac{k-1}{k-1-\Gamma}, \quad (6)$$

$$C_0 = \frac{p_H - B_0 \cdot p_H^k}{\rho_H^{1+\Gamma}}, \quad (7)$$

$$k = 1 + \frac{2-\Gamma}{1 - \frac{\Gamma}{6} \cdot \left(1 + \frac{32Q}{D^2}\right)}, \quad (8)$$

де  $Q$  – теплота вибухового перетворення заряду, Дж/кг;  $D$  – швидкість руху детонаційної хвилі по заряду, м/с;  $p_H$  – тиск, Па;  $\rho_H$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $E_H$  – енергія, Дж, на фронті детонаційної хвилі.

Відповідні параметри на фронті детонаційної хвилі визначаються за допомогою наступних залежностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_H = \frac{\rho_0 \cdot D^2}{4}; \\ \rho_H = \frac{4}{3} \cdot \rho_0; \\ E_H = \frac{p_H}{2} \cdot \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_H} \right) + Q \end{array} \right. \quad (9)$$

де  $\rho_0$  – початкова густина вибуху.

В наведеній постановці (4)–(9) задача розрахунку міцності корпусу в зазначеному кінцево-елементному пакеті не вирішується. У зв'язку з цим введемо припущення, що корпус засобу захисту Б виготовлено з урахуванням:

$$h_k = 3 \cdot h_0, \quad (10)$$

де  $h_k$  – товщина корпусу;  $h_0$  – мінімальна товщина, яка дозволяє витримати вибух МВНП, еквівалентний 200 г тротилу.

З урахуванням цього модель розрахунку напружено-деформованого стану уявляє собою крайову задачу теорії пружності, яку повністю визначає система рівнянь рівноваги Нав'є:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (11)$$

де  $\sigma_{ij,j}$  – компоненти тензора напруги;  $F_i$  – компоненти вектору об'ємних сил, які визначаються, виходячи з рішення рівняння (4) для відомих промислових зразків вибухонебезпечної речовини або з рішення системи рівнянь (5)–(9) для вибухонебезпечних речовин непромислового виготовлення.

Формули Коші, які встановлюють зв'язок між компонентами вектору переміщення  $U$  та тензору деформації  $E$ , мають вигляд:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (U_{i,j} + U_{j,i}), \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (12)$$

та фізичні співвідношення:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W(E_{ij})}{\partial E_{ij}}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (13)$$

доповнюються граничними умовами:

$$p_{iv} = \sigma_{ij,n_j}, \quad x_i \in S_F, \quad (14)$$

$$U_i = U_{i0}, \quad x_i \in S_U, \quad (15)$$

де  $W(E_{ij})$  – енергія пружної деформації;  $n_j$  – направляючі косинуси зовнішньої нормалі до межі області;  $S_U$  та  $S_F$  – ділянки межі, на котрих задані граничні умови в переміщеннях та навантаженнях, відповідно;  $p_{iv}$  – компоненти вектору поверхневих сил.

Відповідно, задача у варіаційній постановці з умови мінімуму варіації повної енергії:

$$\delta \mathcal{E}(U) = 0, \quad (16)$$

може бути представлена у вигляді:

$$\mathcal{E}(U) = \iiint_V W(E_{ij}) dV - \iiint_V F_i U_i dV - \iint_{S_F} P_{iv} U_i dS, \quad (17)$$

де  $\mathcal{E}(U)$  – повна енергія всієї пружної області.

З урахуванням залежностей Костельяно стосовно питомої потенційної енергії:

$$\frac{\partial W(E_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} = E_{ij}, \quad (18)$$



рівняння (17) приймає вигляд:

$$\mathcal{E}(U) = \frac{1}{2} \iiint_V E^T \sigma dV - \left( \iint_{S_F} U^T P dS + \iiint_V U^T F dV \right), \quad (19)$$

де  $T$  – операція транспонування.

Відтак, математична модель локалізації за допомогою захисного пристрою наслідків надзвичайних ситуацій у разі вибуху малогабаритного небезпечного предмету уявляє собою систему рівнянь (4), (5), (9) та (19) з урахуванням виконання вимог (10), (14) та (15). Наявність такої математичної моделі дозволяє провести розрахунки на міцність від миттєвого навантаження внаслідок підриву МВНП, спираючись під час моделювання на бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN.

Тобто, рішення розробленої математичної моделі дозволяє оцінити розмір мінімальної товщини  $h_0$ , яка витримає вибух МВНП, еквівалентний 200 г тротилу, та з урахуванням матеріалу засобу захисту Б, а саме, сталь 20 з параметрами  $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$ ;  $E=210 \text{ Гпа}$ ;  $\mu=0,33$ ;  $\sigma_T=288 \text{ МПа}$ ;  $E_T=1 \text{ Гпа}$ . Відповідно, можна визначити мінімальну вагу засобу захисту Б з урахуванням оперативних можливостей бойового розрахунку піротехнічного підрозділу.

## 7. SWOT-аналіз результатів дослідження

*Strengths.* Можливість розрахунку на міцність засобів захисту особового складу піротехнічних підрозділів та населення внаслідок вибуху малогабаритного вибухонебезпечного предмету всередині захисного пристрою куполоподібної форми, спираючись на результати моделювання за допомогою існуючої бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN. Результати розрахунку дозволяють мінімізувати вагу засобів захисту такого типу та, внаслідок цього, підвищити оперативні можливості піротехнічного підрозділу в процесі локалізації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухонебезпечними предметами.

*Weaknesses.* Трудомісткість підготовки вихідних даних, що вимагає для здійснення цього процесу висококваліфікованих спеціалістів. Такі фахівці повинні одночасно мати знання як в теорії детонації та міцності, так і в практиці проведення робіт щодо контрольованого знищення вибухонебезпечних предметів.

*Opportunities.* Вдосконалити оперативні процедури щодо ліквідації малогабаритних вибухонебезпечних предметів шляхом встановлення співвідношень між тротиловим еквівалентом малогабаритного вибухонебезпечного предмету, масогабаритними характеристиками засобу захисту та масою додаткового навантаження. Розширити номенклатуру багатofункціональних захисних пристроїв, у тому разі визначення пропозицій щодо їх використання для тимчасової ізоляції вибухонебезпечних предметів на об'єктах з масовим перебуванням людей, а також під час перевезення вибухонебезпечних предметів до місця ліквідації.

*Threats.* Невірна (занижена) експертна оцінка властивостей вибухонебезпечного предмету може призвести не тільки до руйнування засобу захисту, але й до людських жертв.

## 8. Висновки

1. Зроблено обґрунтування припущень для розробки математичної моделі. Обрані найгірші з точки зору виникнення деформацій та збиткової напруги в засобі захисту умови його застосування. По-перше, це імпульсний тип навантаження. По-друге, така схема розміщення малогабаритного вибухонебезпечного предмету, коли він знаходиться на складній поверхні з коефіцієнтом проникнення, що дорівнює 1, та торкається верхньої частини куполу захисного пристрою. Отримані за такою схемою висові значення засобу захисту забезпечать його міцність і за менш складних умов апріорі.

2. Зроблено визначення обмежень у застосуванні обраного методу дослідження. Задача визначення міцності захисного пристрою куполоподібної форми повинна вирішуватись із застосуванням бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN.

3. Зроблено визначення системи рівнянь (4), (5), (9) та (19), що дозволило отримати математичну модель локалізації наслідків надзвичайної ситуації у разі вибуху МВНП всередині захисного пристрою куполоподібної форми. Рішення цієї моделі з урахуванням граничних умов (10), (14) та (15) дозволяє оцінити розмір мінімальної товщини захисного пристрою та визначити його мінімальну вагу з урахуванням оперативних можливостей особового складу.

## Література

1. ВР України. (2017). Про схвалення Стратегії реформування системи ДСНС України: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 січня 2017 № 61р. База даних «Законодавство України». Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>

2. Xiao, T., Horberry, T., Cliff, D. (2015). Analysing mine emergency management needs: a cognitive work analysis approach. *International Journal of Emergency Management*, 11 (3), 191–208. doi: <http://doi.org/10.1504/ijem.2015.071705>

3. Тоан, D. Q. (2015). Train-the-Trainer Trauma Care Program in Vietnam. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 19 (1). Available at: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol19/iss1/9>

4. Smith, A. (2017). An APT Demining Machine. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 21 (2). Available at: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/15>

5. Hadjadj, A., Sadot, O. (2013). Shock and blast waves mitigation. *Shock Waves*, 23 (1), 1–4. doi: <http://doi.org/10.1007/s00193-012-0429-0>

6. Tyas, A., Rigby, S. E., Clarke, S. D. (2016). Preface to special edition on blast load characterisation. *International Journal of Protective Structures*, 7 (3), 303–304. doi: <http://doi.org/10.1177/2041419616666340>

7. Blakeman, S. T., Gibbs, A. R., Jeyasingham, J. (2008). *A study of mine resistant ambush protected (MRAP) vehicle as a model for rapid defence*

acquisitions. MBA Professional Report Monterey Naval School. Available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a493891.pdf>

8. Sherkar, P., Whittaker, A. S., Aref, A. J. (2010). *Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design*. Technical Report MCEER-10-0009. Available at: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/25356/10-0009.pdf?sequence=3>

9. *Armor Thane Reduces the Impact from Bombs and Bullets*. Available at: <https://www.armorthane.com/protective-coating-applications/blast-mitigation-protection.htm>

10. Togashi, F., Baum, J. D., Mestreau, E., Löhner, R., Sunshine, D. (2010). Numerical simulation of long-duration blast wave evolution in confined facilities. *Shock Waves*, 20 (5), 409–424. doi: <http://doi.org/10.1007/s00193-010-0278-7>

11. Snyman, I. M., Mostert, F. J., Olivier, M. (2013). Measuring pressure in a confined space. *27th international symposium on ballistics*, 1, 829–837.

12. Woodley, C., Feng, C., Li, B. (2018). Defence Technology. *1st International Conference on Defence Technology*. Beijing, 14 (5), 357–642. doi: [http://doi.org/10.1016/s2214-9147\(18\)30442-2](http://doi.org/10.1016/s2214-9147(18)30442-2)

13. Van den Berg, A. C. (2009). «BLAST»: A compilation of codes for the numerical simulation of the gas dynamics of explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22 (3), 271–278. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2008.07.004>

14. Cullis, I. G., Nikiforakis, N., Frankl, P., Blakely, P., Bennett, P., Greenwood, P. (2016). Simulating geometrically complex blast scenarios. *Defence Technology*, 12 (2), 134–146. doi: <http://doi.org/10.1016/j.dt.2016.01.005>

15. Chaudhuri, A., Hadjadj, A., Sadot, O., Ben-Dor, G. (2012). Numerical study of shock-wave mitigation through matrices of solid obstacles. *Shock Waves*, 23 (1), 91–101. doi: <http://doi.org/10.1007/s00193-012-0362-2>

16. Remennikov, A. M., Mendis, P. A. (2006). Prediction of airblast in complex environments using artificial neural networks. *WIT transactions on the build environment, structures under shock and impact IX*, 269. doi: <http://doi.org/10.2495/su060271>

17. Программный пакет ANSYS. Available at: <https://sites.google.com/site/komputernoemodelirovanie/home/stati/programmnyj-paket-ansys>

18. Андреев, С. Г., Бабкин, Ю. А., Баум, Ф. А. и др.; Орленко, Л. П. ред. (2002). *Физика взрыва. 3-е изд., перераб. Т. 1*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 832.