

УДК 351.86

*Р. І. Шевченко¹, д.т.н., с.н.с., нач. наук. відділу (ORCID 0000-0001-9634-6943)**В. В. Стрілець², н.с. (ORCID 0000-0003-1913-7878)*¹*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*²*Науково-виробниче підприємство «АРТ-ТЕХ», Харків, Україна*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЦИКЛІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАХИСНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ІМПУЛЬСНИМ ХАРАКТЕРОМ ВИКИДАННЯ НЕБЕЗПЕЧНОЇ ХІМІЧНОЇ РЕЧОВИНИ

У якості об'єкта дослідження розглядається захисний пристрій куполоподібної форми, який використовується для попередження надзвичайної ситуації, пов'язаної з загрозою викидання небезпечних хімічних речовин, джерело якої має імпульсний характер. Відмічена актуальність застосування такого пристрою, який повинен не тільки здійснити локалізацію надзвичайної ситуації у разі імпульсного характеру викидання небезпечної хімічної речовини, але й забезпечити багаторазовість використання. Відмічено, що саме багаторазовість використання на сьогоднішній день є одним з найбільш проблемних місць використання таких захисних пристроїв в оперативній діяльності рятувальних підрозділів. Показано, що це вимагає отримання математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою куполоподібної форми. Ця модель повинна забезпечити оцінку багаторазовості його використання та відповідне коригування діючих оперативних процедур знищення малогабаритних вибухонебезпечних предметів другої категорії з елементами, що містять небезпечні хімічні речовини. В ході дослідження використовувався Ейлерово-Лагранжевий підхід, який дозволив реалізувати розроблену математичну модель в кінцево-елементному пакеті із застосуванням бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN. У порівнянні з аналогічними відомими моделями розроблена математична модель дозволяє оцінити можливість багаторазового використання захисного пристрою куполоподібної форми. Використання розробленої математичної моделі спільно з математичною моделлю визначення міцності технічних засобів локалізації елементів ураження в умовах імпульсного навантаження надає можливість отримання результатів, що дозволяють зменшити вагу захисних пристроїв такого типу. Це підвищить оперативні можливості рятувального підрозділу в процесі локалізації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з небезпечними хімічними речовинами, що мають імпульсний характер викидання внаслідок застосування малогабаритного малопотужного детонаційного пристрою.

Ключові слова: захисний пристрій, математична модель циклічних навантажень, небезпечні хімічні речовини, багаторазовість використання, пакет ANSYS

1. Вступ

Підвищення рівня терористичної небезпеки у всьому світі, у тому разі пов'язаного із застосуванням небезпечних хімічних речовин (НХР) на об'єктах з масовим перебуванням людей, вимагає удосконалення оперативних дій як рятувальних підрозділів, що залучаються до ліквідації такого роду надзвичайних ситуацій, так і персоналу цих об'єктів. Одним з напрямків такої діяльності є локалізація малогабаритних вибухонебезпечних предметів [1] з елементами, які містять НХР. Проте відсутність відповідного наукового забезпечення стримує не тільки створення нових зразків захисних пристроїв, але й їх впровадження в практичну діяльність.

Тому проблема створення та дослідження функціональних властивостей захисного пристрою, який повинен забезпечити локалізацію надзвичайної ситуації у разі вибуху всередині нього малогабаритного вибухонебезпечного предмету з елементами, які містять небезпечні хімічні речовини, за умов багаторазовості використання захисного пристрою є актуальною проблемою цивільного захисту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Визначення рекомендацій щодо оперативних дій, пов'язаних з локалізацією вибухонебезпечних предметів, розглядають з двох різних позицій. По-перше, з то-

чки зору аналізу існуючих алгоритмів бойової роботи особового складу піротехнічного підрозділу [2]. По-друге, з точки зору вибухового ураження піротехніків [3], коли вони застосовують засоби індивідуального захисту саперів різного класу [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 [8]. 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 [9]. Також здійснюється й аналіз таких навантажень під час проходження через різноманітні геометричні форми [10]. І, по-друге, вивчення пом'якшуючих механізмів для мінімізації збитку від удару і вибухового навантаження [11].

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 засновані на вирішенні рівняння збереження Ейлера для маси, енергії [13] та імпульсу [14]. 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 різнорідного середовища під впливом імпульсного навантаження, спираючись на Ейлерово-Лагранжевий підхід. За його допомогою в [18] була оцінена міцність технічного засобу для локалізації осколків, проте питання оцінки герметичності такого технічного засобу локалізації елементів, що містять НХР, за умов циклічного навантаження не розглядались, а саме вони зумовлюють можливість багаторазового використання захисного пристрою за умов імпульсного викиду.

Тобто, коригування існуючих оперативних процедур рятувальниками вимагає розробки математичної моделі циклічних навантажень та герметизації захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з вибухонебезпечними предметами з елементами НХР. Така модель повинна забезпечити за допомогою кінцево-елементного пакету «ANSYS» не тільки оцінку міцності такого захисного пристрою, але й забезпечити його герметичність та можливість багаторазового використання. Відповідно завданням дослідження є створення математичної моделі подібного класу, що дасть змогу вирішити актуальну науково-практичну задачу, яка відповідатиме методологічному апарату проблематики цивільного захисту.

3. Мета та завдання дослідження

Мета дослідження – розробка математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з небезпечними хімічними речовинами, що мають імпульсний характер викидання.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- сформувати коло припущень для розробки математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з імпульсним характером викидання небезпечної хімічної речовини;
- розробка математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з імпульсним характером викидання небезпечної хімічної речовини (НС IX НХР).

4. Формування кола припущень для розробки математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з імпульсним характером викидання небезпечної хімічної речовини

Для вирішення задачі оцінки міцності технічного засобу локалізації використовується метод кінцево-елементного моделювання, який реалізовано в кінцево-елементному пакеті «ANSYS» [17]. На сьогодні даний комплекс дозволяє моделювати поведінку різноманітного середовища під впливом імпульсного навантаження. Всередині захисного пристрою, корпус якого уявляє собою тверду поверхню, містяться як газоподібне середовище у вигляді продуктів детонації, небезпечна хімічна речовина та повітря.

Виходячи з цього розробка математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з загрозою викидання небезпечних хімічних речовин, джерело якого має імпульсне походження та визначення відповідних обмежень спирається на Ейлерово-Лагранжевий підхід.

По аналогії з [18] схема локалізації наслідків НС IX НХР за допомогою захисного пристрою має вид, який наведено на рис. 1.

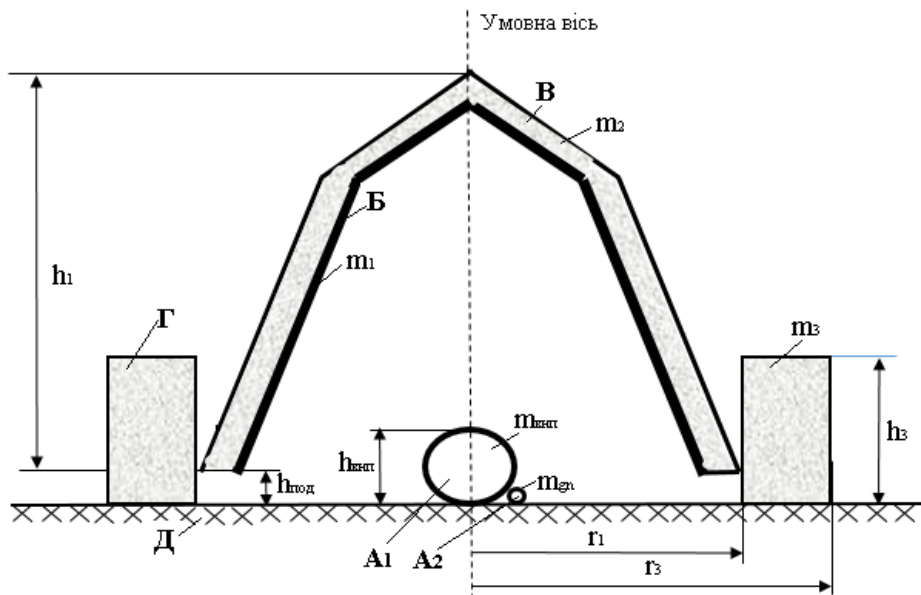


Рис. 1. Схема локалізації наслідків вибуху МВНП за допомогою захисного пристрою

На рис. 1 маємо наступні визначення: A_1 – малопотужний ініціюючий пристрій НС IX НХР з елементами, що містять НХР масою $m_{внп}$; B – захисне герметичне навантаження загальною масою m_2 ; Γ – засоби герметизації загальною масою m_3 ; r_1 – найбільша довжина від умовної осі, що проходить до краю засобів герметизації Γ ; D – поверхня, на якій знаходиться малопотужний ініціюючий пристрій; $h_{под}$ – висота підйому захисного пристрою з герметичним навантаженням.

ням внаслідок ініціації малопотужного пристрою; A_2 – детонаційний пристрій масою $m_{дп}$; h_1 – висота захисного пристрою Б; h_3 – найменша висота засобів герметизації Г; $h_{МВНП}$ – висота ініціюючого пристрою.

За припущення, що циклічне навантаження імпульсного характеру на межі максимально допустимого може призвести до виникнення втомної тріщини, поява останньої може стати причиною виникнення концентратора напружки та відповідно руйнування засобу локалізації Б.

Загальний вираз для розрахунку повної довговічності до розгерметизації $N_{пд}$ захисного пристрою Б до руйнування від втоми має вигляд

$$N_{пд} = N_{дГ} + N_{МГ} + N_{ВГ}, \quad (1)$$

де $N_{дГ}$ – кількість циклів навантаження до виникнення малої тріщини; $N_{МГ}$ – кількість циклів навантаження під час росту малої тріщини; $N_{ВГ}$ – кількість циклів навантаження під час росту великої тріщини.

Введемо два припущення:

1) велика тріщина це люба тріщина, яка визначається візуально. Внаслідок цього подальше використання засобу локалізації Б є небажаним, оскільки виникає можливість його руйнування в процесі подальшої експлуатації та враження продуктами НХР. Тобто $N_{ВГ} = 0$;

2) внаслідок першого імпульсного навантаження на внутрішній поверхні засобу локалізації Б утворюється мікротріщина, а відтак $N_{дГ} = 1$.

Отже для виразу (1) маємо

$$N_{пд} = 1 + N_{МГ}. \quad (2)$$

Вирази (1) та (2) формують необхідне коло припущень моделювання процесу, який досліджується в роботі.

5. Розробка математичної моделі циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з імпульсним характером викидання небезпечної хімічної речовини

Спираючись на припущення (1) та (2) сформуємо шукану математичну модель циклічних навантажень захисного пристрою. Для цього при визначенні показника величини $N_{і0}$ використаємо модель Паріса-Герцберга [19]. В цьому випадку з урахуванням факту зміни границі витривалості $\Delta\sigma_a$ на $\Delta\sigma$, що відповідає поточному рівню навантаження у відповідності до модифікованої діаграми Кічагави-Такагаші, тріщина має величину

$$l_i = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\Delta K_{tn}}{Y \cdot \Delta\sigma} \right)^2, \quad (3)$$

де Y – геометричний фактор (для крайової наскрізної тріщини дорівнює 1,122); ΔK_{tn} – розмах порогового коефіцієнту інтенсивності напружень

$$\Delta K_{tn} = U^{-1} \cdot \Delta K_{tneff}, \quad (4)$$

де U – коефіцієнт закриття тріщини ($U \leq 1$), який приймає вигляд

$$U = \sqrt{d/l_0}, \quad (5)$$

де d – поточний розмір тріщини; l_0 – розмір втомної тріщини, який відповідає границі витривалості та дорівнює

$$l_0 = \frac{E^2 \cdot 6}{\sigma_{-1}^2}, \quad (6)$$

де 6 – вектор Бюргера.

З урахуванням (4) та (6) вираз (3) приймає вигляд

$$l_0 = \frac{E^2 \cdot 6}{\ddot{I} \cdot d \cdot Y^2(\Delta\sigma)^2} \cdot l_0. \quad (7)$$

Процес росту тріщини описується наступним рівнянням

$$\frac{dl}{dN} = 6 \cdot \left(\frac{\Delta K}{E \cdot \sqrt{6} \cdot \sqrt{l/d}} \right)^3. \quad (8)$$

Відтак маємо

$$N_{MT} = \frac{E^3 \cdot \sqrt{6}}{(\sigma_a \cdot Y_l \cdot \sqrt{n \cdot d})^3} \cdot (l_i - d). \quad (9)$$

Відповідно вираз для розрахунку повної довговічності з урахуванням (9) приймає вигляд

$$N_{пд} = 1 + \frac{E^3 \cdot \sqrt{6}}{(\sigma_a \cdot Y_l \cdot \sqrt{n \cdot d})^3} \cdot (l_i - d). \quad (10)$$

Вираз (10) слід доповнити умовами безпеки під час застосування засобу локалізації Б та виконання ним цільових функцій. Тобто, вираз (10) має місце за умови відсутності візуальних дефектів по внутрішній поверхні засобу Б після ініціалізації малопотужного ініціюючого пристрою з елементами, що містять НХР. Якщо попередня експертиза малопотужного ініціюючого пристрою імпульсного джерела НХР вказує на пограничне значення потужності або на її перевищення, приймається уточнюючий коефіцієнт довговічності

$$K_{дов} = \frac{1}{1 + 2 \cdot K_{пер}}, \quad (11)$$

де $K_{пер}$ – відсоток перевищення розрахункової потужності.

З урахуванням (11) маємо

$$N_{\text{нд}} = 1 + \frac{1}{1 + 2 \cdot K_{\text{пер}}} \cdot \frac{E^3 \cdot \sqrt{6}}{(\sigma_a \cdot Y_l \cdot \sqrt{n \cdot d})^3} \cdot (l_i - d). \quad (12)$$

Фактично вираз (12) не визначає габаритні характеристики захисного пристрою Б, а є умовою, маючи за мету виконання системи рівнянь (1), наведених у [23], його безпечного застосування та доповнює умови забезпечення міцності захисного пристрою (рис.1) під час локалізації малопотужного ініціюючого пристрою імпульсного джерела НХР умовами забезпечення міцності у разі циклічних навантажень (а це зумовлює багаторазовість використання захисного пристрою).

6. Обговорення результатів дослідження

Сильною стороною отриманого результату є вдосконалення розрахунків на міцність захисних пристроїв куполоподібної форми. Використання розробленої математичної моделі спільно з математичною моделлю визначення міцності технічного засобу локалізації елементів ураження за умов імпульсного навантаження, що наведена в [18], дозволяє, спираючись на результати моделювання за допомогою існуючої бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN, отримати результати, які дозволять зменшити вагу захисних пристроїв такого типу. Це сприятиме підвищенню оперативних можливостей оперативно-рятувального підрозділу в процесі локалізації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з небезпечними хімічними речовинами, що мають імпульсний характер викидання внаслідок застосування малогабаритного малопотужного детонаційного пристрою.

Одночасно необхідно відмітити, що застосування цих математичних моделей в практичній діяльності супроводжується трудомісткістю підготовки вихідних даних для їх реалізації за допомогою комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN, оскільки для здійснення цього процесу необхідно залучити висококваліфікованих спеціалістів, які одночасно мають знання як в теорії детонації, міцності та утворення НХР, так і в практиці контрольованого знищення вибухонебезпечних предметів та локалізації небезпечних хімічних речовин.

Отримані математичні моделі імпульсного та циклічного навантаження дозволяють не тільки оцінити розмір мінімальної товщини захисного пристрою та визначити його мінімальну вагу з урахуванням оперативних можливостей особового складу, але й сприяють вдосконаленню оперативних процедур щодо ліквідації малогабаритних пристроїв з елементами, що містять НХР, шляхом встановлення співвідношень між тротиловим еквівалентом малопотужного пристрою, масогабаритними характеристиками захисного пристрою та масою захисного герметичного навантаження.

7. Висновки

Зроблено обґрунтування припущень для розробки математичної моделі. Обрані найгірші з точки зору руйнування від втоми умови захисного пристрою куполоподібної форми. По-перше, це відсутність тріщин, які визначаються візуально. По-друге, внаслідок імпульсного навантаження вже після першої ініціації малопотужного пристрою, який забезпечує імпульсний характер викидання небезпечної хімічної речовини, всередині захисного пристрою утворюється мікротріщина. Отримані за такою схемою масові значення захисного пристрою забезпечать його міцність і за менш складних умов апріорі.

Зроблено визначення обмежень у застосуванні обраного методу дослідження. Задача визначення міцності захисного пристрою куполоподібної форми по-

винна вирішуватись із застосуванням бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN.

Отримана математична модель циклічних навантажень захисного пристрою для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з імпульсним характером викидання небезпечної хімічної речовини, фактично визначає не габаритні характеристики засобу локалізації, а є умовою його безпечного багаторазового використання.

Подальші дослідження необхідно проводити в напрямку розширення номенклатури багатофункціональних захисних пристроїв, у тому разі визначення пропозицій щодо їх використання для тимчасової ізоляції малопотужних предметів з елементами, що містять небезпечні хімічні речовини на об'єктах з масовим перебуванням людей, в першу чергу метрополітені.

Література

1. Про схвалення Стратегії реформування системи ДСНС України: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 січня 2017 № 61р // База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>
2. Xiao T., Horberry T., Cliff D. Analysing mine emergency management needs: a cognitive work analysis approach // International Journal of Emergency Management (IJEM). 2015. V. 11. №. 3. P. 191–208. URL: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=71705>
3. Toan Dang Qua. Train-the-Trainer Trauma Care Program in Vietnam // Journal of Conventional Weapons Destruction. 2015. V. 19. Is. 1. Art. 9. URL: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol19/iss1/9>
4. Smith A. An APT Demining Machine // Journal of Conventional Weapons Destruction. 2017. V. 21. Is. 2. Art. 15. URL: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/15>
5. Hadjadj A., Sado O. Shock and blast wave mitigation // Shock Waves. 2013. V. 23. P. 1–4.
6. Tyas A., Rigby S. E., Clarke S. D. Preface on special edition on blast load characterization // Int J ProtStruct. 2014. V. 7. Is. 3. P. 302–304.
7. Blakeman S. T., Gibbs A. R., Jeyasingham J. A study of mine resistant ambush protected (MRAP) vehicle as a model for rapid defence acquisitions // MBA Professional Report Monterey Naval School. December 2008. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a493891.pdf>
8. Sherkar P., Whittaker A. S., Aref A. J. Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design / Technical Report MCEER-10-0009. 2010. URL: <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/10-0009.pdf>
9. Armor Thane Reduces the Impact from Bombs and Bullets. URL: <https://www.armorthane.com/protective-coating-applications/blast-mitigation-protection.htm>
10. Numerical simulation of long duration blast wave evolution in confined facilities / Togashi E., Baum J. D., Mestreau E., Löhner R., Sunshine D. // Shock Waves. 2010. V. 20. P. 409–424.
11. Snyman I. M., Mostert F. J., Olivier M. Measuring pressure in a confined space // 27th international symposium on ballistics. April 2013. P. 22–26. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A747220549/Proceedings-27th-International-Symposium-on-Ballistics>
12. Changgen Feng, Baoming Li. Defence Technology // 1st International Conference on Defence Technology. 21–25 October 2018. Beijing, China. V. 14. Is. 5. P. 357–642.

13. Van den Berg A. C. A compilation of codes for numerical simulation of the gas dynamics of explosions // *J Loss Prev Process Ind.* 2009. V. 22. P. 271–278.

14. I. G. Simulating geometrically complex blast scenarios / Nikiforakis Cullis N., Frankel P., Blakely P., Bennet P., Greenwood P. // *Defence Technol.* 201. V. 12. P. 134–146.

15. Numerical study of shock wave mitigation through matrices of solid obstacles / Chaudhuri A., Hadjadj A., Sadot O., Ben-Dor G. // *Shock Waves.* 2012.

16. Remennikov A. M., Mendis P. A. Prediction of airblast in complex environments using artificial neural networks // *WIT transactions on the build environment, structures under shock and impact IX.* 2006. V. 269.

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

18. Stetsiuk Y. Development of mathematical model of localization of an explosion of a small subject with the help of a specialized protective device / Y. Stetsiuk // *Technology audit and production reserves.* 2019. № 4(48). P. 43–52.

19. Физика взрыва: в 2 т. Т. 1. / Андреев С. Г., Бабкин Ю. А., Баум Ф. А. и др.; под ред. Орленко Л. П. 3-е изд., перераб. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.

R. Shevchenko¹, DSc, Senior Research, Head of Scientific Department
V. Strelets², Researcher

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Research and Production Enterprise «ART-THE», Kharkiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF CYCLIC LOADS OF A PROTECTIVE DEVICE FOR THE PREVENTION OF EMERGENCIES RELATED TO THE IMPULSE NATURE OF THE RELEASE OF A HAZARDOUS CHEMICAL

The article deals with a dome-shaped protective device that is used to prevent the emergence of an impulse-threatening hazardous chemical hazard. The urgency of the use of such a device, which should not only localize the emergency situation in case of impulse nature of the discharge of a dangerous chemical substance, but also ensure the reusability of use. It is noted that reusability is by far one of the most problematic places for the use of such protective devices in the operational activities of the rescue units. It is shown that this requires obtaining a mathematical model of cyclic loads of a dome-shaped protective device. This model should provide an assessment of the reusability of its use and a corresponding adjustment of current operational procedures for the destruction of small-sized explosive objects of the second category with elements containing hazardous chemicals. The study used the Eulerian-Lagrangian approach, which made it possible to implement the developed mathematical model in a finite element package using the library of the ANSYS / AUTODYN computer complex. Compared with similar known models, the mathematical model developed allows us to evaluate the possibility of multiple use of the dome-shaped protective device. Using the developed mathematical model in conjunction with the mathematical model of determining the strength of the technical means of localization of elements of damage under the conditions of impulse loading shows the results that will reduce the weight of protective devices of this type. This will enhance the operational capabilities of the rescue unit in the process of localization of emergencies related to hazardous chemicals that have impulse ejection due to the use of a small, low-power detonation device.

Keywords: safety device, mathematical model of cyclic loading, dangerous chemicals, reusability, ANSYS package

References

1. Rozporyadzhennya Kabi`netu Mi`ni`stri`v Ukrayini № 61 г. (2017). Pro skhvalennya Strategi`yi reformuvannya sistemi DSNS Ukrayini. URL: <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 Civil Security*. DOI: 10.5281/zenodo.3647984

Management (IJEM), 11, 3. 191–208. URL: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=71705>

3. Toan Dang Qua. (2015). Train-the-Trainer Trauma Care Program in Vietnam. Journal of Conventional Weapons Destruction, 19, 1, 9. URL: <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, 15. URL: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/15>

5. Hadjadj, A., Sado, O. (2013). Shock and blast wave mitigation. Shock Waves, 23, 1–4.

6. Tyas, A., Rigby, S. E., Clarke, S. D. (2014). Preface on special edition on blast load characterization. Int J ProtStruct. 7, 3. 302–304.

7. Blakeman, S. T., Gibbs, A. R., Jeyasingham J. (December 2008). A study of mine resistant ambush protected (MRAP) vehicle as a model for rapid defence acquisitions. MBA Professional Report Monterey Naval School. URL: <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. URL: <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/10-0009.pdf>

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

10. Togashi, E., Baum, J. D., Mestreau, E., Löhner, R., Sunshine, D. (2010). Numerical simulation of long duration blast wave evolution in confined facilities. Shock Waves, 20, 409–424.

11. Snyman, I. M., Mostert, F. J., Olivier, M. (April 2013). Measuring pressure in a confined space. 27th international symposium on ballistics, 22–26. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A747220549/Proceedings-27th-International-Symposium-on-Ballistics>

12. Changgen Feng, Baoming Li. (21–25 October 2018). Defence Technology. 1st International Conference on Defence Technology. Beijing, China, 14, 5, 357–642.

13. Van den Berg, A. C. (2009). A compilation of codes for numerical simulation of the gas dynamics of explosions. J Loss Prev Process Ind, 22, 271–278.

14. Nikiforakis Cullis N., Frankel P., Blakely P., Bennet P., Greenwood P. (2016). I. G. Simulating geometrically complex blast scenarios. Defence Technol, 12. 134–146.

15. Chaudhuri, A., Hadjadj, A., Sadot, O., Ben-Dor, G. (2012). Numerical study of shock wave mitigation through matrices of solid obstacles. Shock Waves.

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.

17. Programmny`j paket ANSYS. URL: <https://sites.google.com/site/komputernoemodelirovanie/home/stati/programmnyj-paket-ansys>

18. Stetsiuk, Y. (2019). Development of mathematical model of localization of an explosion of a small subject with the help of a specialized protective device. Technology audit and production reserves, 4(48). 43–52.

19. Andreev, S. G., Babkin, Yu. A., Baum, F. A. i dr.; pod red. Orlenko L. P. (2002). Fizika vzry`va: v 2 t. T. 1. FIZMATLIT, 832.

Надійшла до редколегії: 21.09.2019

Прийнята до друку: 16.10.2019