

ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК 621.9.048.6

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.95-100>А.І. Андрухів², А.В. Баранов¹, Н.М. Гузик¹, Б.І. Сокіл¹, М.Б. Сокіл²¹Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів²Національний університет “Львівська політехніка”, Львів

УДАРНА ДІЯ СНАРЯДІВ НА СПЕЦІАЛЬНІ ЗАХИСНІ СПОРУДИ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗАХИСНОЇ СПРОМОЖНОСТІ

Розроблено методику дослідження реакції пружних елементів захисних споруд на серію ударних дій снарядів. У роботі пружні елементи захисної споруди моделюються однорідними балками, а динамічна дія снарядів – миттєвими точково прикладеними силами. Вплив останніх у побудованій математичній моделі динамічного процесу, що є крайовою задачею для гіперболічного рівняння, відображено за допомогою дельта-функції Дірака. Отримано аналітичні залежності для описання пружних деформацій захисного елемента, які є базовими для визначення міцнісних характеристик. Запропоновано шляхом модернізації захисних елементів споруд підвищити їх захисну спроможність.

Ключові слова: інженерна споруда, математична модель серії ударних дій снарядів, оцінка захисної спроможності.

Постановка проблеми

Для захисту особового складу та техніки від різних видів вибухових дій, а також безпосереднього ураження снарядами чи осколками мін, широко використовують різноманітні інженерні споруди. Ефективність використання залежить, в першу чергу, від властивості їх протидії ударній хвилі чи тілам ураження. Особливістю дії вказаних уражаючих факторів є їх коротко тривалість, і одночасно вони характеризуються ударним імпульсом значної величини. Останній призводить до значних деформацій пружних елементів систем захисту, а в окремих випадках – до їх руйнувань. З метою уникнення навіть часткового руйнування елементів інженерних споруд у найбільш небезпечних місцях використовують різних видів підкріплення, матеріали із покращеними фізико-механічними властивостями, зміцнення за рахунок конструктивної зміни захисних елементів. Крім того, в останні роки набули широкого застосування багатопарові захисні конструкції. Вони здатні протидіяти короткотривалому динамічному навантаженню за геометричних розмірів (товщини) значно меншому, ніж монолітні захисні елементи із цього ж матеріалу. Однак, належне обґрунтування тих чи інших параметрів елементів захисних споруд можна зробити лише на базі аналітичних розрахунків чи натурного експерименту. До речі, на базі останнього не можна зробити узагальнюючих висновків, і він потребує певних матеріальних та часових витрат. З іншого боку, підхід, побудований на базі аналітичних розрахунків елементів

захисних споруд від дії короткотривалих динамічних навантажень, потребує розробки відповідного математичного апарата. Саме розробка методики аналітичного дослідження реакції найпростіших елементів захисних споруд на серію ударних дій снарядів є **метою цієї роботи**. Вона дозволить вибрати такі параметри захисної споруди, які зменшать ударну дію на неї. У ній пружні елементи захисної споруди моделюються пружним тілом, а динамічна дія снарядів (куль) – миттєво прикладеними силами. Останні моделюються за допомогою дельта-функції Дірака. Розглянуто найбільш небезпечний з огляду на динамічні навантаження захисного елемента випадок – випадок ударної дії кулі (снаряда) в одну точку через рівні проміжки часу.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Оцінити захисну спроможність елементів захисних споруд можна на базі динамічного їх прогину [1]-[3], геометричних розмірів та фізико-механічних властивостей матеріалів, із яких вони сконструйовані. Динамічний прогин можна також отримати при обробці натурних випробувань та шляхом математичного моделювання процесу ударної дії на елементи захисної конструкції [4]-[11], аналізом отриманих співвідношень, які описують деформації захисних елементів з наступним використанням основних співвідношень для оцінки міцнісних характеристик [12]-[13]. Що стосується математичних методів, пов'язаних із дослідженням реакції захисного елемента системи на миттєву дію, то такі дослідження частково розглядалися лише

в окремих випадках (див., наприклад, [14]-[16]). Тому у роботі зроблено спробу вказану прогалину у дослідженні важливих практичних задач розв'язати шляхом поширення основних ідей методів збурень на нові класи крайових задач – задач із дискретними правими частинами. Саме вони описують динаміку захисних елементів інженерних споруд під дією серії ударних дій снарядів.

Виклад основного матеріалу

Відомо [17], [18], що поздовжні коливання однорідного пружного елемента системи захисту сталого поперечного перерізу у випадку, коли його пружні властивості задовольняють лінійному закону пружності [17], описуються лінійним диференціальним рівнянням

$$u_{tt}(x,t) - \beta^2 u_{xx}(x,t) = 0. \quad (1)$$

У рівнянні (1) через $u(x,t)$ позначено поздовжнє переміщення поперечного перерізу пружного елемента системи захисту з координатою x в довільний момент часу t ; $\beta^2 = \frac{EA}{m}$, де A – площа поперечного перерізу; $m = \frac{M}{l}$ – маса одиниці довжини тіла.

У випадку, коли вказаний захисний елемент піддається серії ударних дій снарядів у точках з координатами x_1, x_2, \dots, x_n у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n , рівняння (1) трансформується до вигляду

$$u_{tt}(x,t) - \beta^2 u_{xx}(x,t) = \sum_{i=1}^n F_i \delta(x - x_i) \delta(t - t_i), \quad (2)$$

де F_i – «величина» імпульсної дії снаряда на захисний елемент у точці з координатою x_i , $\delta(\dots)$ – дельта-функція відповідного аргументу [17].

Реакція захисного елемента на дію серії ударних імпульсів снарядів, крім вказаних зовнішніх та внутрішніх чинників, залежить ще і від способу його закріплення, що моделюється відповідними крайовими умовами. Для рівняння (2) їх будемо приймати у вигляді

$$u(x,t)|_{x=0} = 0, \quad u(x,t)|_{x=l} = 0, \quad (3)$$

у випадку закріплених або

$$u_x(x,t)|_{x=0} = 0, \quad u_x(x,t)|_{x=l} = 0, \quad (4)$$

вільних кінців, l – довжина захисного елемента.

Таким чином, базою для оцінки захисної здатності (спроможності) елемента захисної конструкції буде служити значення функції $u(x,t)$ (деформація) у конкретній точці, а відтак – напруження у ній та основні співвідношення теорії міцності.

Базою для знаходження функції $u(x,t)$ є основні ідеї методів збурень [17], [18]. Відповідно до них, розв'язки крайових задач для рівняння (2) будемо шукати у вигляді

$$u(x,t) = u_0(x,t) + \tilde{u}(x,t), \quad (5)$$

де $u_0(x,t)$ – розв'язок відповідного однорідного рівняння (2) з заданими однорідними крайовими умовами, а $\tilde{u}_0(x,t)$ – частинний розв'язок неоднорідного рівняння

$$\tilde{u}_{tt} - \beta^2 \tilde{u}_{xx} = \sum_{i=1}^n F_i \delta(x - x_i) \delta(t - t_i).$$

Значний інтерес становить знаходження функції $\tilde{u}(x,t)$, адже саме вона частково враховує вплив ударної дії снаряда на елемент захисної конструкції. Що стосується функції $u_0(x,t)$, то її знаходимо без особливих труднощів у вигляді $u_0(x,t) = \sum_k X_k(x) S_k(t)$.

Власні функції $\{X_k(x)\}$ для крайових умов (3) або

$$(4) \text{ мають вигляд } \{X_k(x)\} = \begin{cases} \sin \frac{k\pi}{x} \\ \cos \frac{k\pi}{x} \end{cases} \text{ відповідно, а}$$

$S_k(t) = S_{0k} \cos(\omega_k t + \phi_{0k})$, S_{0k} , ϕ_{0k} – сталі, які знаходять із початкових умов неоднорідного рівняння, $\omega_k = \frac{k\pi}{l} \sqrt{\frac{EA}{m}}$.

Примітка: урахування початкових умов пов'язано із розв'язанням мішаної задачі, що може бути предметом окремих досліджень.

Треба відзначити, що системи функцій $\{X_k(x)\}$ володіють властивостями повноти та ортонормованості, а тому функцію $\tilde{u}(x,t)$ треба також шукати у вигляді

$$\tilde{u}(x,t) = \sum_k X_k(x) \tilde{S}_k(t). \quad (6)$$

Це забезпечить виконання крайових умов для загального розв'язку крайової задачі (2), (3), або (2), (4). Функції ж $\tilde{S}_k(t)$ у поданні (6) повинні бути розв'язком неоднорідного рівняння

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{S}}_k(t) + \beta^2 \left(\frac{k}{l}\right)^2 \tilde{S}_k(t) = \\ = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n F_i \delta(t - t_i) \int_0^l X_k(x) \sum_{j=1} X_j(x_i) X_j(x) dx. \end{aligned} \quad (7)$$

У наведених вище диференціальних рівняннях на базі властивостей дельта-функцій імпульсну складову за просторовою змінною представлено у вигляді

$$\delta(x - x_i) = \frac{1}{l} \sum_{j=1} X_j(x_i) X_j(x).$$

Частинний розв'язок диференціального рівняння (7) набуває вигляду

$$\tilde{S}_k(t) = \frac{l}{\beta k \pi} \sum_{i=1}^n F_i X_k(x_i) \int_0^t \cos \beta \frac{k \pi}{l} (t - \tau) \delta(t - \tau - t_i) d\tau \quad (8)$$

Таким чином, отримані результати дозволяють описати багаточастотний процес у захисному елементі пружного тіла під дією серії уданих дій снарядів. Проте, для практичного використання, на базі принци-

$$u(x, t) = \sin \frac{\pi}{l} x \left\{ S_{01} \cos \left(\frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EA}{m}} t + \phi_{01} \right) + \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{m}{EA}} \sum_{i=1}^n F_i \sin \frac{\pi x_i}{l} \int_0^t \cos \sqrt{\frac{EA}{m}} \frac{\pi}{l} (t - \tau) \delta(t - \tau - t_i) d\tau \right\} \quad (9)$$

для крайових умов (3) та

$$u(x, t) = \cos \frac{\pi}{l} x \left\{ S_{01} \sin \left(\frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{EA}{m}} t + \phi_{01} \right) + \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{m}{EA}} \sum_{i=1}^n F_i \cos \frac{\pi x_i}{l} \int_0^t \cos \sqrt{\frac{EA}{m}} \frac{\pi}{l} (t - \tau) \delta(t - \tau - t_i) d\tau \right\} \quad (10)$$

для крайових умов (4).

Нижче на рис.1, рис.2 представлено відповідно до залежності (9) зміну прогину і амплітуди коливань захисної сталеної конструкції довжиною 3 м, поперечного перерізу $0,02 \text{ м}^2$ з масою одиниці об'єму $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, точок ураження одиночної дії снаряда

пу одночастотності коливань можна обмежитись однією із форм його "динамічної рівноваги". Приймаючи її за першу, яка відіграє найважливішу роль для оцінки міцнісних характеристик, отримаємо

x_1 (рис. 1) та амплітуди коливань захисного елемента при дії на нього серії ударних дій снарядів (рис. 2), які характеризуються величиною дій $2,36 \cdot 10^4 \text{ Н}$.

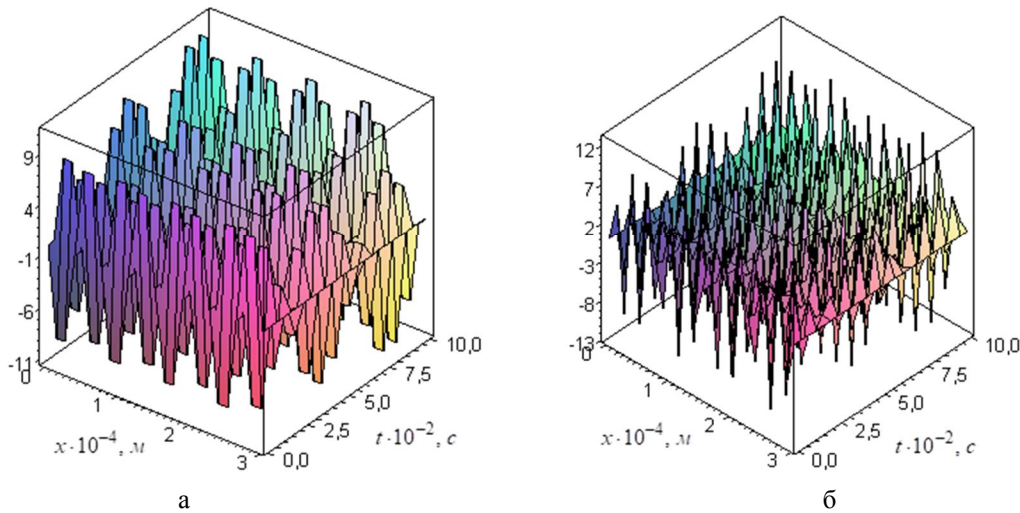


Рис. 1. Закон зміни прогину елемента сталеної захисної конструкції від одиночної дії снаряда для випадку

$$x_1 = \frac{l}{3} \text{ (рис.1 а) та } x_1 = \frac{l}{2} \text{ (рис.1 б)}$$

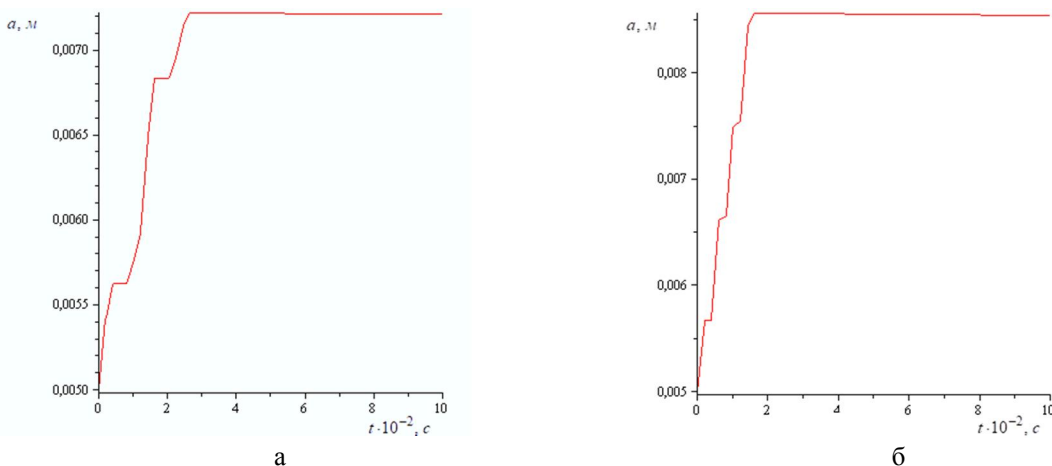


Рис. 2. Зміна в часі амплітуди коливань захисного елемента при дії на нього серії із 3-х (рис. 2 а) та 4-х (рис. 2 б) ударних дій снарядів у різних точках захисного елемента

Висновки, практичні рекомендації та подальші узагальнення результатів

Розроблена методика дослідження серії ударних дій снарядів на елементи захисних споруд дозволяє отримати аналітичні залежності для визначення динамічного прогину захисного елемента. Особливістю дії на нього є те, що вона носить миттєвий точковий характер, а відтак математичною моделлю процесу є крайові задачі для гіперболічного рівняння з нерегулярною правою частиною. Останню описано за допомогою дельта-функцій Дірака. Методика, використана у роботі, є базою для:

- визначення міцнісних характеристик захисних елементів, а відтак – перевірки надійності захисної конструкції;

- дослідження динаміки захисних та подібного типу конструкцій з урахуванням нелінійних характеристик пружних елементів захисних споруд;

Список література

1. Альберт И.У., Петров В.А., Скворцова А.Е. Анализ динамической реакции конструктивно-нелинейных механических систем. *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. Львов, 2002. Вып. 241. С. 38–59.
2. Белов Н. Н., Копаница Д. Г., Кумпль О. Г., Югов Н. Т. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные загрузки. Томск: СТТТ, 2004. 466 с.
3. Пахолук О.А., Шимків Т.Ф. Аналіз технічного стану, підсилення та модернізація споруд спеціального призначення. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 61. С. 369–373.
4. Величко Л.Д., Петрученко О.С., Кондрат В.Ф. Динаміка захисної конструкції при ударі кулі або осколка снаряда. *Військово-технічний збірник*. Львів: НАСВ. 2015, № 13. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.13-19>
5. Петрученко О.С., Хитряк О.І. Величко Л.Д. Зменшення ефективної дії кулі, осколка снаряду на об'єкт захисту. *Військово-технічний збірник*. Львів: НАСВ. 2015, № 12. С. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.65-69>
6. Фролов О.О., Тур С.В. Розрахунок значень тиску на фронті ударної хвилі при руйнуванні гірських порід вибухом. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво"*. Київ, 2009. № 18. С. 43–47.
7. Peng Liua, Deju Zhua, Yiming Yao, Junwen Wang, Tinh Quo Bui Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system. *Materials & Design*. 2016. Vol. 99. Is. 5. pp. 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.040>
8. George L. Blaisdell, Terry D. Melendy, Marin N. Blaisdell Ballistic protection using snow. *International*

- вивчення більш складних коливань елементів захисних конструкцій (в тому числі із підкріпленням).

Отримані ж аналітичні та побудовані на їх базі графічні залежності для конкретних випадків показують, що динамічні деформації захисного елемента для крайових умов (3) є більшими у випадку дії снаряду на захисний елемент ближче до його середини, одночасно для крайових умов (4) – ближче до кінця.

Що стосується модернізації захисних споруд, то зменшити динамічну дію на їх елементи можна шляхом використання пружного підкріплення чи зміни способу закріплення кінців захисного елемента: пружного або з певним кутом нахилу опорних поверхонь. У якості пружного підкріплення пропонується використовувати спеціальні пластмаси, шар ґрунту, гнучкі настили деревини тощо.

У випадку серії ударних дій, очевидно, амплітуда прогину захисного елемента після кожного удару з часом буде зростати, адже модель не враховує сили в'язко пружного тертя. Вказані задачі будуть предметом подальших досліджень.

Journal of Impact Engineering. 2021. Vol. 155. 103903 <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103903>

9. Weihong Hou, Feng Zhu, Guoxing Lu, Dai-Ning Fang Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum foam core. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. Vol. 37. Is. 10. pp. 1045–1055. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006>

10. Magnier S.A., Donze F.V. Numerical simulation of impact using a discrete element method. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. 1998. Vol. 3. Is. 3. pp. 257–276. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199807\)3:3<257::AID-CFM50>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199807)3:3<257::AID-CFM50>3.0.CO;2-Z)

11. Nair Rajesh P., Lakshmana Rao C. Numerical Simulation of Ballistic Impact on Particulate Composite Target using Discrete Element Method: 1-D and 2-D Models. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2014. Vol. 15. Is. 1. pp. 9–16. <https://doi.org/10.1080/15502287.2013.833997>

12. Дикань С. Д., Зима О. Є. Безпека в галузі та надзвичайних ситуаціях. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. 273 с.

13. Васильченко О.В., Квітковський Ю.В., Миргород О.В., Стельмах О.А. Будівельні конструкції та їх поведінка в умовах надзвичайних ситуацій: Навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2015. 488 с.

14. Андрухів А.І., Баранов А.В., Гузик Н.М., Сокіл Б.І., Сокіл М.Б. Про шляхи підвищення захищеності спеціальних споруд від ударних дій. *Військово-технічний збірник*. Львів: 2021. № 24. С. 52–57.

<https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.52-57>

15. Andrukiv A., Huzuk N., Soki B., Sokil M., Chahan Yu. Methodology of investigation of the influence of the explosion on the elements of protective structures. *Військово-технічний збірник* Львів: 2020. № 22. С. 32–37. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.32-37>

16. Andrukhiv A., Sokil B., Sokil M., Huzyk N. The justification of a way for improving the protection of special buildings form shock effect of the projectile. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2019. Вип. 20. С. 69–74. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.69-74>

17. Митропольский Ю.А., Мосеенков Б.И. Асимптотические решения уравнений в частных производных. Київ: Вища школа, 1976. 592 с.

18. Перестюк М.О., Чернікова О.С. Деякі сучасні аспекти асимптотики теорії диференціальних рівнянь з імпульсною дією. *Укр. мат. журн.* 2008. Т. 60. С. 81–90.

References

1. Albert I., Petrov V. and Skvorthova A. (2002), "Analiz dinamicheskoy reakcii konstruktivno nelinejnykh mekhanicheskikh sistem" [Analysis of the dynamic reaction of constructive-nonlinear mechanical systems]. *News VNIIG named after B. Vedeneeva*. V. 241. pp. 38-59. [in Russian].

2. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Kumplyak O.G. and Yugov N.T. (2004), "*Raschet-zhelezo-betonnykh-konstrukciy-navzryvnye-i-udarnye-zagruzki*" [Calculation of iron-concrete construction for rip and shock loading]. Tomsk STTT, 466 p. [in Russian].

3. Pakholyuk O.A. and Shymkiv T.F. (2016), "Analiz tekhnichnoho stanu, pidlyennia ta modernizatsiia sporud spetsialnoho pryznachennia" [Analysis of technical condition, strengthening and modernization of special purpose buildings]. *Urban Planning and Spatial Planning*. Vol. 61. pp. 369-373. [in Ukrainian].

4. Velychko L., Petruchenko O. and Kondrat V. (2015), "Dynamika zakhysnoi konstruktii pry udari kuli abo oskolka snariada" [Dynamics of a protective structure at impact of a bullet or a fragment of a projectile]. *Military technical collection*. V. 13. pp. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13-2015.13-19> [in Ukrainian].

5. Petruchenko O., Khytriak O. and Velychko L. (2015), "Zmenshennia efektyvnoi dii kuli, oskolka snariadu na ob'ekt zakhystu" [Reduction of effective bullets, shrapnel shells on object protection]. *Military technical collection*. V. 12. pp. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.12.2015.65-69> [in Ukrainian].

6. Frolov O.O. and S.V. Tour (2009), "Rozrakhunok znachen tysku na fronti udarnoi khvyli pry ruinuванні hirs'kykh porid vybukhom" [Calculation of the values of pressure at the shock wave front in the destruction of rocks by an explosion]. *Bulletin of NTUU "KPI". The Mining Series*. № 18. pp. 43-47. [in Ukrainian].

7. Peng Liua, Deju Zhua, Yiming Yao, Junwen Wang and Tinh Quo Bui (2016), Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system.

Materials & Design. Vol. 99. Is. 5. pp. 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.040>

8. George L. Blaisdell, Terry D. Melendy and Marin N. Blaisdell (2021), Ballistic protection using snow. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 155. 103903 <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103903>

9. Weihong Hou, Feng Zhu, Guoxing Lu and Dai-Ning Fang (2010), Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum foam core. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 37. Is. 10. pp. 1045-1055. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006>

10. Magnier S.A. and Donze F.V. (1998), Numerical simulation of impact using a discrete element method. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*. Vol. 3. Is. 3. pp. 257-276. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199807\)3:3<257::AID-CFM50>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199807)3:3<257::AID-CFM50>3.0.CO;2-Z)

11. Nair Rajesh P. and Lakshmana Rao C. (2014), Numerical Simulation of Ballistic Impact on Particulate Composite Target using Discrete Element Method: 1 -D and 2-D Models. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. Vol. 15. Is. 1. pp. 9-16. <https://doi.org/10.1080/15502287.2013.833997>

12. Dykan S.D. and Zyma O.Ye. (2015), "*Bezpeka v haluzi ta nadzvychainykh sytuatsiakh*" [Safety in the industry and emergency]. Poltava: TVO «ACMI». 273 p. [in Ukrainian].

13. Vasilchenko O.V., Kvitkovsky Yu.V., Myrgorod O.V. and Stelmach O.A. (2015) "*Budivelni konstrukcii ta jich povedinka v umovach nadzvychainykh sytuatsiakh. Navchalnyj posibnyk*" [Building constructions and their behavior in the conditions of emergency situations: Textbook]. Kharkiv : KhNADU. 488 p. [in Ukrainian].

14. Andrukhiv A., Baranov A., Huzyk N., Sokil B. and Sokil M. (2021), On ways to increase protection of special structures from impact action. *Military-technical collection*. Issue 24. pp. 52-57. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.52-57>

15. Andrukhiv A., Huzyk N., Soki B., Sokil M. and Chahan Yu. (2020), Methodology of investigation of the influence of the explosion on the elements of protective structures. *Military Technical Collection*. Issue 22. pp. 32-37. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.22.2020.32-37>

16. Andrukhiv A., Sokil B., Sokil M. and Huzyk N. (2019), The justification of a way for improving the protection of special buildings form shock effect of the projectile. *Military Technical Collection*. Issue. 20. pp. 69-74. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.69-74>

17. Mytropolsky Yu. and B. Moseenkov (1976), "Asimptoticheskie resheniya uravnenij v chastnykh proizvodnykh" [Asymptotic solutions of partial differential equations]. Kyiv: High school. 592 p. [in Russian].

18. Perestyuk M.O., Chernikova O.S. (2008), Some modern aspects of the asymptotics of the theory of differential equations with impulse action. *Ukr. math. j.* Vol. 60. pp. 81-90.

IMPACT ACTION OF A PROJECTILES ON SPECIAL PROTECTIVE STRUCTURES AND WAYS TO INCREASE THEIR PROTECTIVE CAPACITY

A. Andrukhiv, A. Baranov, N. Huzyk, B. Sokil, M. Sokil

A method for studying the reaction of elastic elements of protective structures to a series of impact actions of shells has been developed. In the work, the elastic elements of the protective structure are modeled by homogeneous beams, and the

dynamic action of the shells is simulated by instantaneous point-applied forces. A mathematical model of this dynamic process is constructed, which is a boundary value problem for a hyperbolic equation with an irregular right-hand side. The latter is described using Dirac delta functions. Cases of both fixed and free ends of protective elements are considered. The main ideas of perturbation methods are used for the researches carried out in the work. Analytical dependences for the description of elastic deformations of a protective element which are basic for definition of its strength characteristics are received. They and the graphical dependences built on their basis for specific cases show that the dynamic deformations of the protective element for the fixed ends are greater in the case of the projectile closer to its middle, at the same time for the free ends – closer to the end. With regard to the modernization of protective structures, the dynamic effect on their elements can be reduced by using elastic reinforcement or changing the method of fixing the ends of the protective element: elastic or with a certain angle of inclination of the bearing surfaces. It is proposed to use special plastics, soil layer, flexible wood flooring, etc. as elastic reinforcement. The technique used in the work is the basis for determining the strength characteristics of protective elements, and from so – to check the reliability of the protective structure; study of the dynamics of protective and similar types of structures, taking into account the nonlinear characteristics of the elastic elements of protective structures; study of more complex oscillations of elements of protective structures. In the case of a series of impacts, it is obvious that the amplitude of deflection of the protective element after each impact will increase over time, because the model does not take into account the force of viscoelastic friction. These tasks will be the subject of further research.

Keywords: *engineering structure, mathematical model of a series of impact actions of shells, assessment of protective ability.*

УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СНАРЯДОВ НА СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ

А.И. Андрухив, А.В. Баранов, Н.М. Гузык, Б.И. Сокил, М.Б. Сокил

Разработана методика исследования реакции упругих элементов защитных сооружений на серию ударных действий снарядов. В работе упругие элементы защитного сооружения моделируются однородными балками, а динамическое действие снарядов – мгновенными точно приложенными силами. Построена математическая модель указанного динамического процесса является краевой задачей для гиперболического уравнения с нерегулярной правой частью. Последнюю описано с помощью дельта-функций Дирака. Рассмотрены разные случаи крепления защитных элементов. Для исследований, проведенных в работе, использованы основные идеи методов возмущений. Получены аналитические зависимости для описания упругих деформаций защитного элемента, которые являются базовыми для определения его прочностных характеристик. Именно они и построенные на их базе графические зависимости для конкретных случаев показывают, что динамические деформации защитного элемента для закрепленных концов есть большими в случае действия снаряда на защитный элемент ближе к его середине, одновременно для краевых условий – ближе к концу. Что касается модернизации защитных сооружений, то уменьшить динамическое действие на их элементы можно путем использования упругого подкрепления или изменения способа закрепления концов защитного элемента: упругого или с определенным углом наклона опорных поверхностей. В качестве упругого подкрепления предлагается использовать специальные пластмассы, слой почвы, гибкие настилы древесины и тому подобное. Методика, использованная в работе, является базой для определения прочностных характеристик защитных элементов, а в последствии – проверки надежности защитной конструкции; исследование динамики защитных и подобного типа конструкций с учетом нелинейных характеристик упругих элементов защитных сооружений; изучение более сложных колебаний элементов защитных конструкций. В случае серии ударных действий, очевидно, амплитуда прогиба защитного элемента после каждого удара со временем будет расти, ведь модель не учитывает силы вязко-упругого трения. Указанные задачи будут предметом дальнейших исследований.

Ключевые слова: *инженерное сооружение, математическая модель серии ударных действий снарядов, оценка защитной способности.*