

УДК 539.3

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВІД УДАРУ ОСКОЛКІВ СНАРЯДУ

О.О. Лук'янченко,
д-р техн. наук

О.В. Костіна,
канд. техн. наук

О.М. Палій,
канд. техн. наук

Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.283-290

В статті досліджено вплив удару осколків осколко-фугасного снаряду на напружено-деформований стан захисної тонкостінної оболонкової конструкції. Характеристики осколків снаряду та їх розподіл в зоні ураження конструкції визначені згідно емпіричних формул і експериментальних даних. Статична і динамічна поведінка захисної споруди при ударі осколків снаряду досліджена в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN.

Ключові слова: захисна оболонкова споруда, осколки снаряду, ударна сила, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

ВСТУП. Питання моделі пошкоджень захисних тонкостінних оболонкових споруд від осколків боєприпасів є складним і не достатньо дослідженим. Це обумовлено наявністю широкого спектру конструктивних рішень споруд і різних видів боєприпасів. Боєприпаси мають різні фізико-технічні характеристики, такі як: діаметр, довжина і маса снаряду; тип і маса вибухової речовини в тротиловому еквіваленті; тип і механічні характеристики матеріалу захисної оболонки снаряду, час детонації, кількість і маса осколків з максимальною довжиною їх розльоту та швидкістю [1-3]. Кількість осколків залежить від конструкції снаряду, яка збільшується зі збільшенням калібру снаряду, потужності вибухової речовини, коефіцієнту наповнення та зменшенням міцності і в'язкості металу захисної оболонки снаряду. Тому формування моделі впливу осколків снарядів на захисні споруди є доволі складним і базується на методах теорії ймовірності та експериментальних даних випробувань.

Дослідження статичної і динамічної поведінки відповідальних конструкцій, до яких відносяться захисні споруди, виконуються за допомогою чисельних методів, реалізованих в існуючих програмних комплексах скінченно-елементного аналізу [4-8].

В роботі досліджено вплив удару осколків осколко-фугасного снаряду на напружено-деформований стан захисної тонкостінної оболонкової конструкції. Циліндрична оболонка представлена у вигляді тонкостінного сегменту висотою 5 м, шириною 17,32 м, довжиною 36 м і товщиною 0,015 м. Матеріал (сталь) задано ізотропним пружно-пластичним з білінійною залежністю напруження від деформації за критерієм Мізеса. Характеристики снаряду і осколків та їх розподіл в зоні ураження конструкції визначені згідно емпіричних формул і експериментальних даних наведених в роботі [3]. Статична і динамічна поведінка захисної споруди досліджена в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN [9].

1. Визначення імовірнісних характеристик осколків снаряду та побудова імовірнісної моделі ударного навантаження від осколків на конструкцію. Фізичні і математичні моделі різних видів снарядів наведено в [1-3]. Загальна кількість осколків, які утворюються під час вибуху снаряду, визначається за емпіричними залежностями або експериментально [3]. В даній роботі розглянуто 122 мм осколочно-фугасний снаряд, загальна кількість осколків якого може сягати 3000-4000 шт. За розрахункову загальну кількість осколків прийнято $N = 4000$. Середня вага осколку в даному снаряді визначена з вразу

$$q_{cp} = 1000Q_{ch}(1-(m_0/Q_{ch})) \cdot 0,9 / N = 1,58 \text{ г.} \quad (1)$$

Тут $Q_{ch} = 40$ кг – вага снаряду, $m_0 = 7$ кг – вага вибухової речовини в снаряді.

Кількість осколків в снаряді в залежності від ваги q осколку (табл. 1) обчислена за формулою

$$N_q = Ne^{1-(q/q_0)^n}, \quad (2)$$

де $q_0 = 0,5$ г – рекомендована мінімальна вага осколку, кількість яких складає $0,1 N$; показник степеня експоненти

$$n = \frac{0,79}{\ln q_{cp} + 0,69} = 0,71. \quad (3)$$

В розрахунках прийнята різна вага осколків q таким чином, щоб їх загальна кількість не перевищувала максимально рекомендованої N . До характеристик осколку належить середня площа його поперечного перетину (табл. 1), яка визначена згідно виразу

$$S_q = 1,831(q/\gamma)^{2/3}, \quad (4)$$

де $\gamma = 7,85$ г/см³ – щільність матеріалу (сталь) осколка.

Середня швидкість осколків від вибуху снаряду дорівнює

$$V_{cp} = \frac{\tilde{V}}{2,83\sqrt{(1/\nu)-0,5}} = 872 \text{ м/с,} \quad (5)$$

де $\nu = m_0/Q_{ch} = 0,156$, $\tilde{V} = 6000$ м/с – швидкість детонуючої речовини в снаряді 122 мм.

Важливою характеристикою осколку снаряду є його швидкість руху при ударі о конструкцію (табл. 1). Швидкість обчислена за формулою

$$V_{y0} = V_{cp} \cdot e^{\frac{C_x \rho_b 1,831 g}{20 q^{1/3} \gamma^{2/3}} R_0}, \quad (6)$$

де $C_x = 1,5$; $\rho_b = 0,125$ кгс·с²/м⁴; $g = 9,81$ м/с², $R_0 = 36$ м – прийнята в роботі відстань від епіцентру вибуху снаряду до конструкції.

Таблиця 1

Фізичні характеристики осколків снаряду

Вага осколку q , г	Кількість осколків за вагою N_q , шт	Площа поперечного перетину S_m , см ²	Швидкість руху осколка при ударі V_b , м/с
0,5	400	0,40	885,93
1	1810	0,46	883,28
2	640	0,74	880,83
3	257	0,96	879,72
4	116	1,17	879,00
5	2	1,36	878,57

Згідно даних, наведених в табл. 1, осколки вагою $q = [0,5; 1; 2; 3; 4; 5]$ г із загальною кількістю в снаряді $N = 3225$ і загальною площею поперечних перетинів $\sum S = 1851,36$ см² важили $\sum q = 4,536$ кг.

Згідно наведених в роботі [3] аналітичних і експериментальних даних розліт осколків рекомендовано представити у вигляді сфери з початком в центрі вибуху снаряду, яка поділена на чотири конуси з різною кількістю розльоту осколків. Основними є два конуси розльоту осколків з центральними кутами 90° , розташованими протилежно від центру вибуху перпендикулярно до довжини снаряду і які містять 88,1% всієї ваги осколків.

Для моделювання впливу осколків на захисну конструкцію при наземному вибуху снаряду достатньо розглянути половину одного з цих конусів розльоту, розташованому в бік захисної конструкції. Якщо задати нормальний закон розподілу щільності ймовірності розсіювання осколків на поверхні основи конусу розльоту [3], то 90% загальної кількості осколків і

відповідно загальної площі їх поперечного перетину буде розташовано всередині площі основи внутрішнього конусу з центральним кутом 59° .

У зв'язку з тим, що основою конусу розльоту є коло, то розрахункова кількість осколків снаряду, розташованих на півколі розсіювання складала

$$N_{yp} = \frac{N \cdot 0,881}{4} = \frac{3225 \cdot 0,881}{4} = 710. \quad (7)$$

Для заданої відстані між центром вибуху і конструкцією $R_0 = 36$ м площа півкола розсіювання, в якому зосереджено N_{yp} осколків, складала

$$F_{yp} = \pi (R_0 \cdot \operatorname{tg} 45^\circ)^2 / 2 = 2035,69 \text{ м}^2. \quad (8)$$

Для 90% осколків $N_{yp}^{0,9} = 0,9 \cdot N_{yp} = 639$, що розташовані на основі півконуса розльоту з центральним кутом 59° , площа півкола розсіювання складала

$$F_{yp}^{0,9} = \pi (R_0 \cdot \operatorname{tg} 29,5^\circ)^2 / 2 = 678,56 \text{ м}^2. \quad (9)$$

При цьому загальна площа поперечного перетину 90% осколків дорівнювала

$$\sum S_{yp}^{0,9} = \sum S \frac{0,9 \cdot 0,881}{4} = 366,57 \text{ см}^2 = 0,0367 \text{ м}^2. \quad (10)$$

Важливою динамічною характеристикою осколку є кінетична енергія і питома кінетична енергія, що віднесена до площі поперечного перетину осколку. Формули визначення цих характеристик відповідно мали вид

$$E_q = \frac{q \cdot V_b^2 \cdot 10^{-3}}{2g}, \quad \tilde{E}_q = \frac{q \cdot V_b^2 \cdot 10^{-3}}{2g \cdot S_m}. \quad (11)$$

Ударна сила осколку о конструкцію, яка є силовою характеристикою осколку, визначена з урахуванням повного пробивання стінки розглянутої в роботі оболонки товщиною $h = 0,015$ м за формулою

$$P_q = E_q / h. \quad (12)$$

Динамічні та силові характеристики осколів, розташованих на півколі розсіювання з центральним кутом 59° , наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики осколів, розташованих на півколі розсіювання з центральним кутом 59°

Характеристики	Вага осколку, г					
	0,5	1	2	3	4	5
$N_{yp}^{0,9}$, шт	79	357	127	52	23	1
E_q , Дж	20,01	39,76	79,09	118,33	157,52	196,71
$\tilde{E}_q \cdot 10^4$, Дж/м ²	50,01	86,45	106,88	123,27	134,63	144,64
P_q , кН	1,334	2,651	5,273	7,889	10,501	13,114

Згідно даних [3] тільки 0,09 % осколків снаряду 122 мм пробивають сталю перешкоду товщиною $h = 0,015$ м. В роботі врахована ударна дія 52 осколків вагою 3 г, 23 осколків вагою 4 г, 1-го – 5 г та 127 осколків вагою 2 г, тобто врахована ударна дія 203 осколків. Час дії удару осколків о конструкцію прийнято $\tau = 10^{-4}$ с, який згідно експериментальних даних міг змінюватись від 10^{-4} с до 10^{-6} с.

Момент часу, в який відбувся удар осколку о конструкцію, прийнято однаковим для всіх осколків

$$t_{y0} = R_0 / V_{cp} = 36/872 = 0,041 \text{ с}. \quad (13)$$

2. Скінченно-елементне моделювання захисної оболонкової споруди з урахуванням впливу осколків від вибуху снаряду. Побудова скінченно-елементного моделі оболонкової конструкції виконано в програмному комплексі NASTRAN [9]. Створені геометричні моделі

оболонки та півконус розльоту осколків з розбивкою на малі півконуси (рис. 1). Видно, що фронтальна поверхня оболонки повністю знаходиться в середині півконусу розльоту.

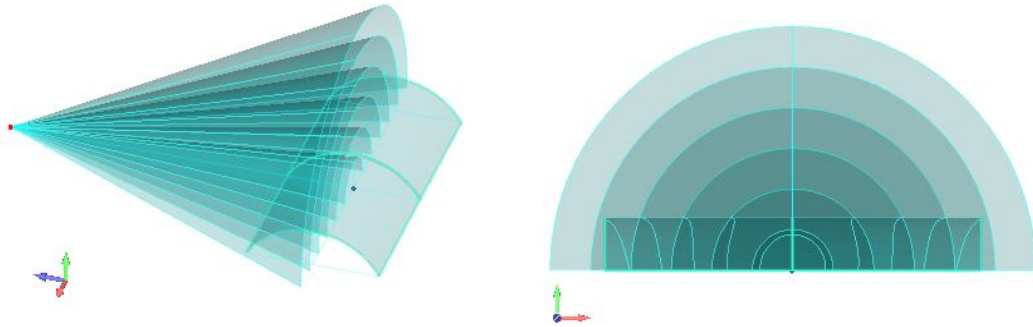


Рис. 1. Геометричні моделі оболонки та півконусу розльоту осколків

Скінченно-елементна модель оболонки (рис. 2) містить 3556 вузлів та 6876 трикутних оболонкових елементів з шістьма ступенями вільності у вузлі. Вузли на кромках оболонки защемлені. Ударна сила для кожного осколку задана згідно наведеним в табл. 2 значенням відповідно до його ваги. Моделювання випадкового розташування осколків на фронтальній поверхні оболонки виконано з урахуванням їх максимальної негативної дії на конструкцію, тобто осколки максимальної ваги розташовувались в центрі півкола розсіювання.

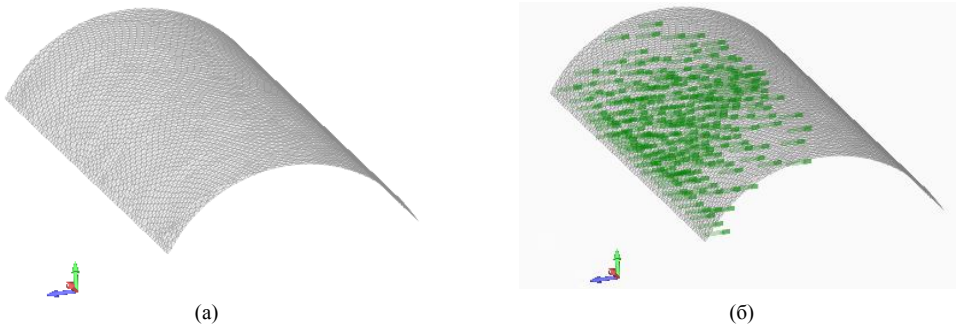


Рис. 2. Скінченно-елементна модель захисної оболонки (а), модель ударного впливу осколків (б)

3. Дослідження напружено-деформованого стану захисної оболонки при ударі осколків снаряду. Дослідження напружено-деформованого стану захисної оболонки при статичній дії ударної сили виконано в лінійній постановці (*Linear Static*) методом Гауса-Остроградського та в геометрично і фізично нелінійній (*Nonlinear Static*) постановці з урахуванням пружно-пластичної роботи матеріалу (*Elasto-Plastic*) стінки оболонки – методом Ньютона-Рафсона (табл. 3). На рис. 3 представлено деформований стан захисної оболонки при статичній дії ударної сили осколків.

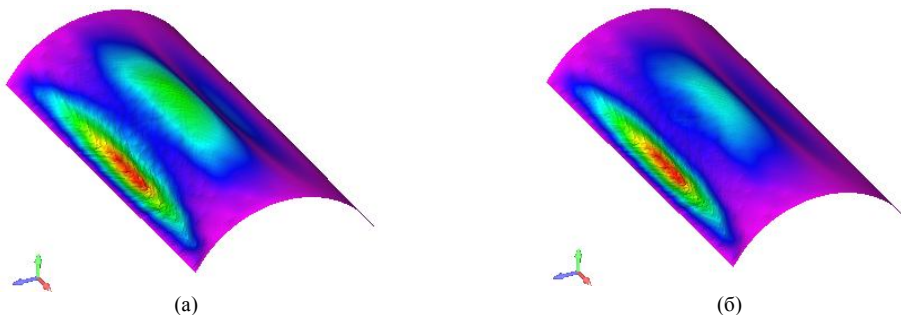


Рис. 3. Деформований стан оболонки при статичній дії осколків: лінійна (а) і нелінійна (б) постановки

Досліджена стійкість захисної оболонки від статичної дії удару осколків в лінійній постановці (*Buckling*) методом Ланцоша. Втрата стійкості конструкції відбулась при $2,695 P_q$, тобто виконана умова стійкості оболонки.

Динамічний розрахунок захисної оболонки розпочато з визначення перших десяти форм і частот власних коливань методом Ланцоша (*Normal Modes*) (рис. 4).

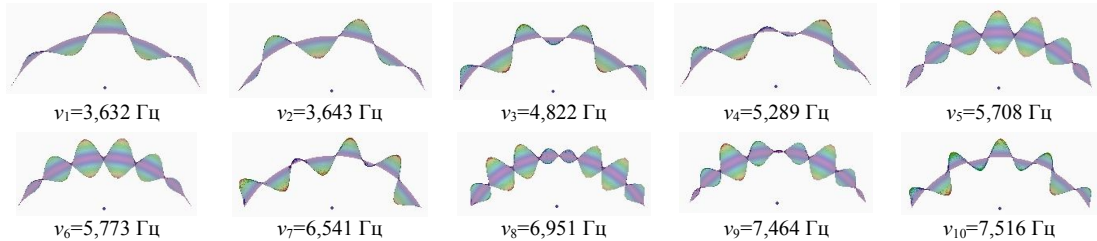
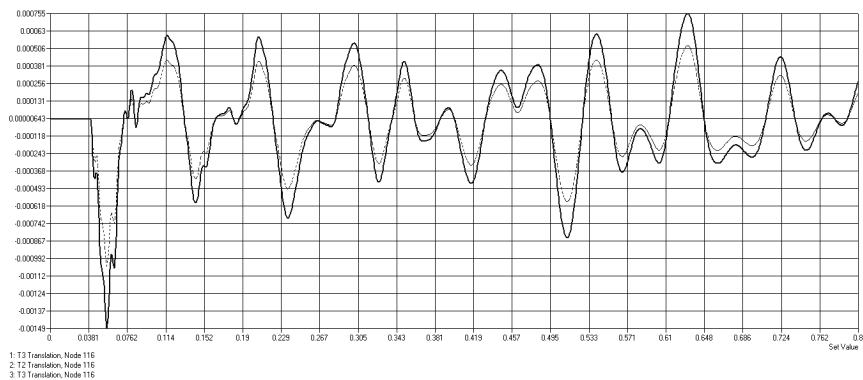


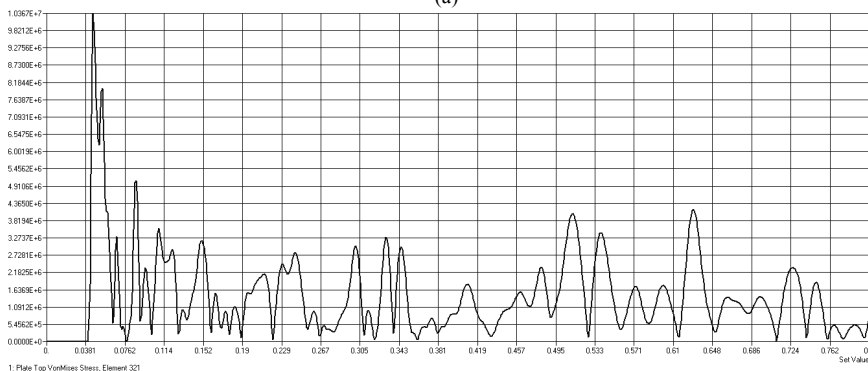
Рис. 4. Перші десять форм і частот власних коливань оболонки

Динамічний вплив удару осколків на фронтальну площину оболонки досліджено за допомогою розв'язання задачі на вимушені коливання методом прямого чисельного інтегрування Ньюмарка (*Modal Transient Dynamic*) з урахуванням перших десяти форм і частот власних коливань оболонки. Загальний час інтегрування прийнято рівним $t=0,8$ с, крок інтегрування – $\Delta t=0,0001$ с. Враховано модальне демпфірування з коефіцієнтом 0,005. Удар осколків відбувся в момент часу $t_{y0}=0,041$ с і діяв на протязі $\tau=10^{-4}$ с. Значення ударної сили для осколків різної ваги наведено в табл. 2.

На рис. 5 представлена зміна у часі вузлового переміщення вздовж осей глобальної системи координат і еквівалентного напруження в елементі моделі, в яких спостерігались максимальні значення від удару осколків.



(а)



(б)

Рис. 5. Зміна у часі вузлового переміщення (а) та еквівалентного напруження в елементі (б) моделі оболонки при ударі осколків

Максимальні вузлові переміщення і еквівалентні напруження в елементах моделі спостерігались в момент удару осколків о конструкцію (рис. 6).

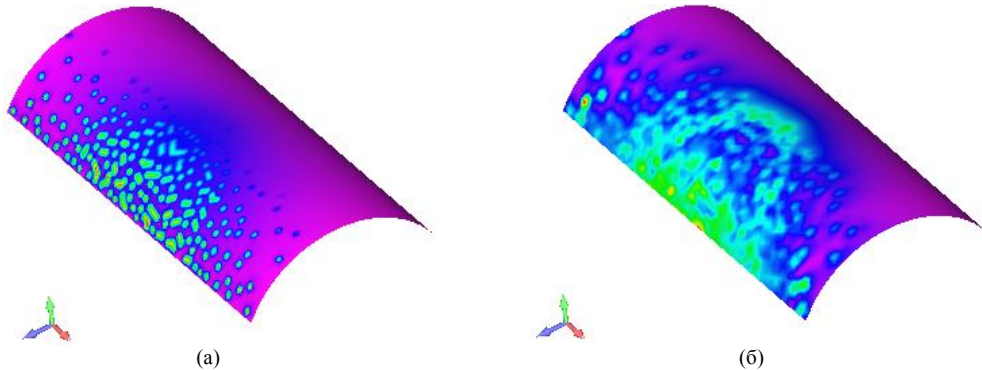


Рис. 6. Деформований (а) і напружений (б) стан оболонки в момент удару осколків

В табл. 3 наведені максимальні еквівалентні напруження за Мізесом в елементах моделі, максимальні вузлові переміщення, максимальні загальні деформації за Мізесом, які отримані при розв'язанні задач статичної та динамічної захисної оболонки.

Коефіцієнт динамічності склав $K_{дин} = \sigma_{дин} / \sigma_{ст} = 0,14$. Таким чином, на основі отриманих характеристик напружено-деформованого стану оболонки можна вважати, що оболонка витримала удар осколків розглянутого снаряду з виконанням умов міцності і стійкості.

Таблиця 3

Характеристики напружено-деформованого стану оболонки при дії удару осколків снаряду

Максимальні характеристики	Задача статичної		Динамічна задача
	Лінійна	Нелінійна	
Напруження, МПа	63,655	72,244	10,366
Переміщення, м	0,0143	0,0176	0,0018
Деформації	0,0002	0,00024	0,00001

Висновок. Дослідження впливу ударної дії осколків снаряду на стан захисної споруди є складним у зв'язку з ймовірнісними параметрами осколків, виду і площі їх розсіювання по поверхні конструкції. Наведена методика, яка базувалась на емпіричних формулах і експериментальних даних щодо осколків снаряду, спростила процес моделювання ударної дії осколків на захисну споруду і дозволила дослідити її напружено-деформований стан. В подальшому автори планують дослідити живучість захисної споруди з урахуванням отриманих ушкоджень від пробиття осколками поверхні оболонки та попередньо напруженого стану від дії ударної хвилі, яка досліджена авторами в статті [8].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Самохвалов Я.А., Левицький М.Я., Григораш В.Д. Справочник техника-конструктора. Изд. 3-е перераб. и доп. – Киев: Техника, 1978. – 592 с.
2. Майстренко О.А., Латицький С.В., Олійник Б.О., Петушков В.В. Модель оцінювання уражаючої дії боєприпасів ракетних військ і артилерії. Збірник наукових праць (ЦНДІ ОВД), 2018. – №2(73) – 170 – 182 с.
3. Полениця П., Науменко І., Ліцман А., Нестеров Д. Методика оцінювання ефективності дії осколково-фугасного снаряду по наземних цілях. Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії м. Суми, 2019. – 52 с.
4. Al-Yacoby A.M., Hao L.J., Liew M.S., Ratnayake R.M.S., Samarakoon S.M.K. Thin-Walled Shell Storage Tank under Blast Impacts: Finite Element Analysis // Materials, 2021. – Vol. 143. – 7100.
5. Aune V., Valsamos G., Casadei F., Larcher M., Langseth M., and Borvik T. Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates // International Journal of Impact Engineering, 2020. – Vol. 99. – pp. 131-144.
6. Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Vabyshchevych The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.

7. *Krivenko O.P., Lizunov P.P.* Investigation of nonlinear deformation, buckling and natural vibrations of elastic shells under thermomechanical loads using a universal three-dimensional finite element // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 114. – P. 35-43.
8. *Lukianchenko O.O., Geraschenko O.V., Kostina O.V.* Simulation of shock wave action from an explosive device on a protective shell // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 115.
9. *Jaechol Koh* Siemens NX Nastran: Tutorials for Beginners and Advanced Users. – ASIN: B0B19ZBZCM, 2022. – 566 p.

REFERENCES

1. *Samokhvalov Ya.A., Levytskyi M.Ia., Hryhorash V.D.* Spravochnyk tekhnika-konstruktora. Izd. 3-e pererab. i dop. (Handbook of a design technician. 3rd edition, revised and enlarged) – Kyiv: Tekhnika, 1978. – 592 s. (ukr)
2. *Maistrenko O.A., Lapytskyi S.V., Oliarnyk B.O., Petushkov V.V.* Model otsiniuvannia urazhachuoi dii boiepriypasiv raketnykh viisk i artylerii (Model for assessing the damaging effect of missile and artillery ammunition). Zbirnyk naukovykh prats (TsNDI OVT), 2018. – №2(73) – 170 – 182 s.(ukr)
3. *Polenytsia P., Naumenko I., Litsman A., Nesterov D.* Metodyka otsiniuvannia efektyvnosti dii oskolkovovo-fuhasnoho snariada po nazemnykh tsiliakh (Methodology for assessing the effectiveness of a high-explosive fragmentation projectile against ground targets). Naukovo-doslidnyi tsentr raketnykh viisk i artylerii m. Sumy, 2019. – 52 c. (ukr)
4. *Al-Yacoby A.M., Hao L.J., Liew M.S., Ratnayake R.M.S., Samarakoon S.M.K.* Thin-Walled Shell Storage Tank under Blast Impacts: Finite Element Analysis // Materials, 2021. – Vol. 143. – 7100.
5. *Aune V., Valsamos G., Casadei F., Larcher M, Langseth M., and Borvik T.* Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates // International Journal of Impact Engineering, 2020. – Vol. 99. – pp. 131-144.
6. *Bazhenov V.A., Lukianchenko O.A., Vorona Yu.V., Vabyshcheych* The influence of shape imperfections on the stability of thin spherical shells // Strength of Materials, 2021. – Vol. 53, №6. – P. 842-850.
7. *Krivenko O.P., Lizunov P.P.* Investigation of nonlinear deformation, buckling and natural vibrations of elastic shells under thermomechanical loads using a universal three-dimensional finite element // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 114. – P. 35-43.
8. *Lukianchenko O.O., Geraschenko O.V., Kostina O.V.* Simulation of shock wave action from an explosive device on a protective shell // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 115.
9. *Jaechol Koh* Siemens NX Nastran: Tutorials for Beginners and Advanced Users. – ASIN: B0B19ZBZCM, 2022. – 566 p.

Стаття надійшла 05.04.2026

Лук'яненко О.О., Костіна О.В., Палій О.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВІД УДАРУ ОСКОЛКІВ СНАРЯДУ

Моделювання впливу ударної дії осколків снаряду на стан захисної споруди є складним і не достатньо вивченим. Це обумовлено наявністю широкого спектру конструктивних рішень споруд і різних видів боеприпасів. Боеприпаси мають різні фізико-технічні характеристики, такі як: діаметр, довжина і маса снаряду; тип і маса вибухової речовини в тротиловому еквіваленті; тип і механічні характеристики матеріалу захисної оболонки снаряду, час детонації, кількість і маса осколків з максимальною довжиною їх розльоту та швидкістю. Кількість осколків залежить від конструкції снаряду, яка збільшується зі збільшенням калібру снаряду, потужності вибухової речовини, коефіцієнту наповнення та зменшенням міцності і в'язкості металу захисної оболонки снаряду. Тому, в зв'язку з імовірнісними параметрами осколків, виду і площі їх розсіювання по поверхні захисної конструкції необхідно застосовувати методи теорії ймовірності та експериментальні данні випробувань. В роботі досліджено вплив удару осколків осколко-фугасного снаряду на напружено-деформований стан захисної тонкостінної оболонкової конструкції. Характеристики осколків снаряду та їх розподіл в зоні ураження конструкції визначені згідно емпіричних формул і експериментальних даних. Статична і динамічна поведінка захисної споруди при ударі осколків снаряду досліджена в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN. Розв'язана нелінійна крайова задача статика і стійкості оболонки з урахуванням пружно-пластичної роботи матеріалу відповідно методами Ньютона-Рафсона і Ланцоша при статичній дії ударної сили осколків. Динамічний розрахунок захисної оболонки містив визначення форм і частот власних коливань методом Ланцоша та розв'язання задачі на вимушені коливання методом прямого чисельного інтегрування Ньюмарка. Отримано характеристики напружено-деформованого стану захисної споруди та реалізації її відгуків на удар осколків снаряду. Представлена чисельна методика спростила процес моделювання ударної дії осколків на захисну споруду і дозволила дослідити її напружено-деформований стан.

Ключові слова: захисна оболонкова споруда, осколки снаряду, ударна сила, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.

Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Palii O.M.

RESEARCH OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF A PROTECTIVE SHELL STRUCTURE UPON IMPACT OF SHELL FRAGMENTS

Modeling of influence of shell fragments on the protective structure state is difficult and not sufficiently studied. This is due to the presence of wide spectrum of structural decisions of the constructions and different types of ammunitions. Ammunitions have different physical and technical characteristics, such as: a diameter, length and mass of the shell; a type and mass of explosive in TNT equivalent; a type and mechanical characteristics of shell material; time of detonation; amount and mass of fragments with maximal flight length and velocity. The amount of fragments depends on a construction a shell, which is

increased with the increase of shell caliber, power of explosive, coefficient of filling and diminishing of strength and viscosity of shell metal. Therefore, in connection with the probabilistic parameters of shell fragments, kind and dispersion area on the surface of protective construction, it is necessary to apply the methods of probability theory and experimental test data. In article the stress-deformed state of the protective shell structure upon impact of shell fragments was investigated. Characteristics of shell fragments and their distributing on the affected construction area according to empiric formulas and experimental test data were determined. Static and dynamic behavior of protective shell structure upon impact of shell fragments was investigated in the software of finite element analysis NASTRAN. The nonlinear static problem and static stability of shell structure taking into account elastic-plastic property of its material were solved by the Newton-Raphson method and the Lanczos method respectively. The dynamic calculation of protective shell structure contained determination of forms and frequencies of natural vibrations using the Lanczos method and investigation of forced vibrations by the Newmark method. Characteristics of the stress-deformed state of protective shell structure and realizations of its reactions on the action of shell fragments were received. The presented numeral method simplified the process of modeling of shell fragments action on the protective construction and allowed to research its stress-deformed state.

Keywords: protective shell structure, shell fragments, impact force, finite element method, stress-deformed state.

УДК 539.3

Лук'яненко О.О., Костіна О.В., Палій О.М. Дослідження напружено-деформованого стану захисної оболонкової конструкції від удару осколків снаряду // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 283-290.

Моделювання впливу ударної дії осколків снаряду на стан захисної споруди є складним і не достатньо вивченим. Це обумовлено наявністю широкого спектру конструктивних рішень захисних споруд і різних видів боєприпасів. В статті досліджено вплив удару осколків осколко-фугасного снаряду на напружено-деформований стан захисної тонкостінної оболонкової конструкції. Характеристики осколків снаряду та їх розподіл в зоні ураження конструкції визначені згідно емпіричних формул і експериментальних даних. Статична і динамічна поведінка захисної споруди при ударі осколків снаряду досліджена в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу NASTRAN.

Табл. 3. Іл. 6. Бібліогр. 9 назв.

UDC 539.3

Lukianchenko O.O., Kostina O.V., Palii O.M. **Research of the stress-deformed state of a protective shell structure upon impact of shell fragments** // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2026. – Issue. 116. – P. 283-290.

Modeling of influence of shell fragments on the protective structure state is difficult and not sufficiently studied. This is due to the presence of wide spectrum of structural decisions of the constructions and different types of ammunitions. In article the stress-deformed state of the protective shell structure upon impact of shell fragments was investigated. Characteristics of shell fragments and their distributing on the affected construction area according to empiric formulas and experimental test data were determined. Static and dynamic behavior of protective shell structure upon impact of shell fragments was investigated in the software of finite element analysis NASTRAN.

Tab. 3. Fig. 6. References 9 items.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА, професор кафедри будівельної механіки ЛУК'ЯНЧЕНКО Ольга Олександрівна.

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ЛУК'ЯНЧЕНКО Ользі Олександрівні.

Тел.: +38(044) 241-54-20

E-mail: lukianchenko.oo@knuba.edu.ua, lukianch0907@meta.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1794-6030>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА, КОСТІНА Олена Володимирівна.

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, КОСТІНІЙ Олені Володимирівні.

Тел.: +38(044) 241-54-20

E-mail: kostina.ov@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6692-6231>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки КНУБА, ПАЛІЙ Оксана Миколаївна.

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, ПАЛІЙ Оксані Миколаївні.

Тел.: +38(044) 241-55-72

E-mail: palii.om@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5958-4862>