

УДК 624.01

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЛИСТОВОЇ СТАЛЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНОЇ СПОРУДИ ПІД ЧАС ВЛУЧАННЯ УЛАМКУ ВІД УДАРНОГО БПЛА

**С.І. Білик<sup>1</sup>,**

д-р техн. наук, професор

**М.К. Дауров<sup>1</sup>,**

д-р філософії, доцент

**А.С. Білик<sup>2</sup>,**

канд. техн. наук, доцент

**О.В. Павловський<sup>2</sup>,**

д-р військових наук, професор

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ<sup>2</sup> Науково-дослідний інститут воєнної розвідки Головного управління розвідки Міністерства оборони України, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.35-40

Проведено чисельне моделювання проникнення уламку від ударного БпЛА в сталеві конструкції захисних споруд в умовах України. Визначено достатню товщину для недопущення проникнення уламку для сталевих листів з броньованої та низьколегованої сталі. Встановлено, що замість багат шарових листових конструкцій з броньованої сталі у захисних спорудах можливо застосовувати одношарові з низьколегованої сталі, що є в рази дешевшою. Результати цих досліджень дозволяють застосовувати в проектуванні захисних споруд більш економічні та менш трудомісткі до виконання конструкції з меншою кількістю монтажних зварних з'єднань.

**Ключові слова:** метод скінчених елементів, динамічний розрахунок, проникнення, захисні споруди, листові конструкції, броньована сталь, низьколегована сталь.

**Вступ.** В умовах війни російської федерації проти України актуальним є питання розробки ефективних та економічно доцільних конструктивних рішень захисних споруд об'єктів, що мають бути захищеними від влучання ударних БпЛА згідно державної концепції "Країна-Фортеця" [1-3], зокрема об'єктів критичної інфраструктури. Оцінка безпеки сталевих конструкцій об'єктів критичної інфраструктури [4-5]. Теоретичні основи розрахунку захисних споруд на проникнення були розглянуті в [6-11]. В раніше проведених дослідженнях в Україні та закордоном розглядалося влучання куль стрілецької зброї [12-13]. Моделювання руйнування сталевих конструкцій раніше було досліджено в публікаціях [14-15]. Робота сталевих конструкцій під дією динамічних навантажень була досліджена в [16-17]. Числових досліджень щодо влучання уламків ударних БпЛА раніше не розглядалося.

Захисні конструкції із сталевих листів є вигідні з точки зору швидкості монтажу в порівнянні із монолітними залізобетонними, але їхнім недоліком є багат шаровість та велика кількість монтажних зварних з'єднань. Багат шарові конструкції були в дослідженні в [11, 18-19]. Сортамент товщин низьколегованих сталей має менші обмеження, ніж бронесталей. З використанням захисних конструкцій з листів більшої товщини із низьколегованої сталі потенційно можливо уникнути багат шаровості, зменшити кількість зварних з'єднань та зменшити вартість самих листів.

**Мета дослідження.** Визначити можливість застосування в захисних спорудах об'єктів, що мають бути захищені від влучання уламків ударних БпЛА, сталевих листів із низьколегованих сталей, а не із бронесталей.

**Розрахункова модель.** Захисна конструкція складається зі зварних балок, а між ними розташовані захисні листи (рис. 1). Прийнято, що ця конструкція уражується уламком зі швидкістю та напрямком, що відповідають наслідкам підриву бойової частини БпЛА типу «Шахед-136». Балки прийняті із вуглецевої сталі. Захисні листи розглядалися для порівняння зі низьколегованої сталі (із твердістю, що складає 50% від твердості уламка за шкалою Брінелля)

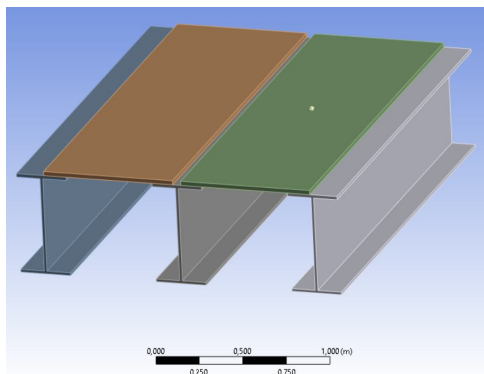


Рис. 1. Розрахункова модель в середовищі ANSYS

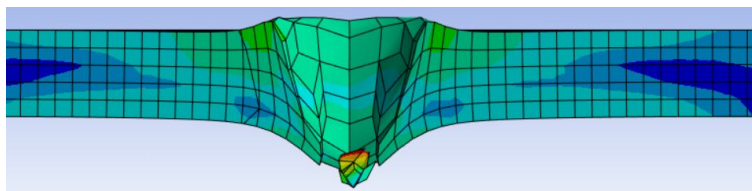
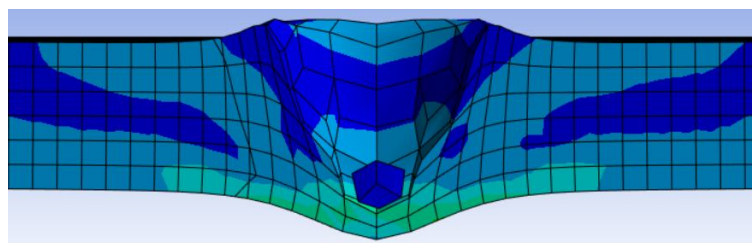
або бронесталі (із твердістю, що складає 173% від твердості уламка за шкалою Брінелля). Розрахунок виконано методом скінченних елементів в програмному комплексі ANSYS.

**Фізико-механічна модель роботи сталі і металевих уламків.** Для сталей було прийнято модель Джонсона-Кука – емпірична модель матеріалів, яка використовується для опису поведінки металів в умовах великих деформацій, високих швидкостей деформації та підвищених температур. Модель описується рівнянням для еквівалентного пластичного напруження:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0))(1 - T^m),$$

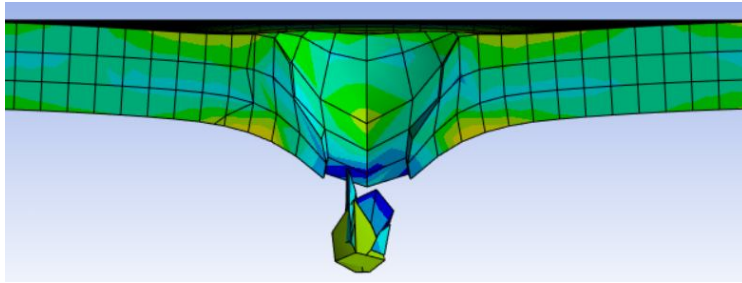
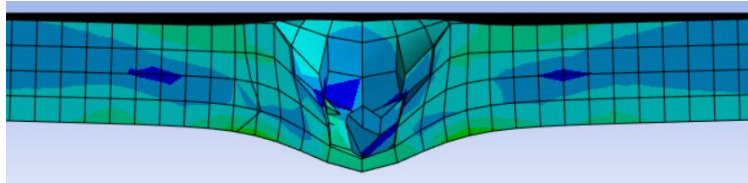
де  $\epsilon$  – еквівалентна пластична деформація;  $\dot{\epsilon}^*$  – нормалізована швидкість пластичної деформації (відношення поточної швидкості деформації  $\dot{\epsilon}$  до еталонної швидкості  $\dot{\epsilon}_0$ );  $T^*$  – нормалізована температура, яка враховує температуру плавлення ( $T_m$ ) і кімнатну (еталонну) температуру матеріалу ( $T_r$ );  $A$  – межа текучості матеріалу в умовах квазістатичного навантаження при кімнатній температурі;  $B$  – коефіцієнт деформаційного зміцнення;  $n$  – показник деформаційного зміцнення;  $C$  – коефіцієнт чутливості до швидкості деформації;  $m$  – показник термічного розм'якшення.

**Результати розрахунку.** Було проведено розрахунок захисної конструкції із листами з низьколегованої сталі 09Г2С товщиною  $0,83t_{\max}$  та  $t_{\max}$ , де  $t_{\max}$  – максимальна товщина листа на ринку. Результат розрахунку із листами товщиною  $0,83t_{\max}$  показано на рис. 2. З рисунку видно, що пробиття листа уламком відбулося. Результат розрахунку із листами найбільшої на ринку товщини показано на рис. 3. В цьому випадку пробиття не відбулося.

Рис. 2. Влучання уламка в лист з товщиною товщиною  $0,83t_{\max}$ Рис. 3. Влучання уламка в лист з товщиною  $t_{\max}$ 

Отже, захисні конструкції можна виконувати з одинарних листів із низьколегованої сталі. Для визначення економічної доцільності використання таких листів було виконане порівняння вартості матеріалу із листами із бронесталі. Був виконаний розрахунок для листів з товщиною  $0,8t_{\max}$  та  $t_{\max}$ .

Результат розрахунку для листа товщиною  $0,8t_{\max}$  показано на рис. 4. Уламок пробив захисний лист. Результат розрахунку для листа товщиною  $t_{\max}$  показано на рис. 5. Захисний лист не було пробито.

Рис. 4. Влучання уламка в лист товщиною  $0,8t_{\max}$  із броньованої сталі MARS 500Рис. 5. Влучання уламка в лист товщиною  $t_{\max}$  із броньованої сталі MARS 500

**Висновки.** В цій статті було проведено чисельне дослідження з моделювання проникнення в захисні споруди з сталевих листів уламків від ударних БПЛА, що є новизною роботи. Раніше були проведені подібні дослідження лише щодо влучання куль стрілецької зброї в Україні та закордоном. В результаті розрахунку встановлено, що замість захисних листів із бронесталі можна використовувати листи із низьколегованої сталі більшої товщини, що є практичним значенням роботи. Це дозволяє застосовувати одношарові листові конструкції без зварних швів, які збільшують трудомісткість та вартість зведення захисних споруд а також знижують міцність бронесталі в місці з'єднання. Навіть у випадках, де багатошаровості уникнути не можна, можливо застосовувати композитні конструкції листами з різних марок сталі. За результатами розрахунку необхідна для захисту від уламку ударного від БПЛА товщина захисного листа зі сталі 09Г2С в 1,5 рази більше, ніж товщина захисного листа зі сталі MARS 500. Ринкова вартість листа за 1 т із бронесталі сталі в 5,52 дорожче, ніж із низьколегованої. З урахуванням товщин вартість матеріалів на захисні листи зі сталі 09Г2С буде в  $5,52/1,5=3,68$  рази економічно вигідніша, ніж зі сталі MARS 500.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Постанова Кабінету Міністрів України “Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури” від 26 квітня 2024 р. № 471.
2. Білик А.С., Михайловський Д.В. Реалізація державної концепції України із захисту критичної інфраструктури – «Країна-фортеця» // *Military Strategy and Technology*. – 2025. – № 2(2). – С. 18–29. – DOI: 10.63978/3083-6476.2025.2.2.02.
3. Коваль М.В., Коваль В.В., Білик А.С., Коцюруба В.І., Кубраков О.М. Основи інженерного захисту об’єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України від засобів повітряного нападу противника: монографія/заред. А.С. Білика. Київ: ГШ ЗСУ, 2023. 180 с.
4. Шугайло О.П., Білик С.І. Оцінка безпеки сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2023. – Вип. 111. – С. 113–124. – DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.113-124.
5. Шугайло О.П., Білик С.І. Розвиток методів оцінки безпеки сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій за сейсмічних навантажень // *Ядерна та радіаційна безпека*. – 2023. – № 1(97). – С. 20–30. – DOI: 10.32918/nrs.2023.1(97).03.
6. Oucif C., Kalyana Rama J. S., Shankar Ram K., Abed F. Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities // *Defence Technology*. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 89–98. – DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.013.
7. Pu B., Wang X., Li W., Feng J. Analytical Model Formulation of Steel Plate Reinforced Concrete Walls against Hard Projectile Impact // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12, № 1. – Ст. 518. – DOI: 10.3390/app12010518.
8. Abdel-Kader M., Fouda A. Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles // *International Journal of Impact Engineering*. – 2014. – Т. 63. – С. 1–17. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.07.005.
9. Horbachova Y. Laboratory studies of the influence of weapons on an armored obstacle // *Social Development and Security*. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 70–80. – DOI: 10.33445/sds.2022.12.1.8.

10. Методика оцінювання ефективності дії осколково-фугасного снаряда по наземних цілях : ВП 7-07(01).01. – К. : Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії спільно з Ракетними військами і артилерією Командування Сухопутних військ Збройних Сил України та Центром оперативних стандартів і методики підготовки ЗС України, 2019. – 48 с. – Обмеження розповсюдження: обмежень для розповсюдження немає.
11. Wen H. M. Predicting the penetration and perforation of targets struck by projectiles at normal incidence // *Mechanics of Structures and Machines*. – 2002. – Vol. 30, No. 4. – P. 543–577. – DOI: 10.1081/SME-120015076.
12. Mykhailovskiy D. V., Skliarov I. O., Khomik M. M., Vavilova N. V., Skliarova T. S. Analysis of methods for calculating the penetrating effect of the main types of missiles and fragmentation damage to the structures of protective constructions // *Опір матеріалів і теорія споруд / Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2024. – № 113. – С. 171–182. – DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.171-182.
13. Бісик С. П., Наконечний О. В. Дослідження пробиття сердечником 7,62-мм кулі Б-32 багатощарового захисного елемента // *Social Development and Security*. – 2025. – Т. 15, № 6. – С. 323–335. – DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.28>
14. Daurov M. K. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire / M. K. Daurov, A. S. Bilyk // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 102. – P. 62–68. DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.
15. Daurov M.K., Bilyk A.S. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – Kyiv: KNUBA, 2022. – Issue 108. – P. 325–336. – DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.325-336.
16. Ternoviy M. I., Bilyk A. S. Вибір раціональної висоти сталевोї ферми покриття для будівель і споруд з урахуванням дії зосередженого імпульсного навантаження // *Опір матеріалів і теорія споруд / Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2025. – № 114. – С. 231–240. – DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.231-240.
17. Nuzhnyi V. I., Bilyk S. I. Revealing the influence of wind vortex shedding on the stressed-strained state of steel tower structures with solid cross-section // *Engineering technological systems*. – 2024. – Vol. 3, No. 1 (129). – P. 69–79. – DOI: 10.15587/1729-4061.2024.306181.
18. Баулін Д.С., Манжура С.А., Одейчук М.П., Одейчук А.М., Горелишев С.А., Ільченко М.І. Розрахунок бронестійкості металевих багатощарових броньованих структур за допомогою методу скінченних елементів / *Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн.*– К.: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 145–164. – DOI: 10.32347/2410-2547.2019.103.145-164
19. Петрученко О.С. Обґрунтування параметрів багатощарової захисної конструкції бойових машин на основі нелінійних математичних моделей: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 – динаміка та міцність машин / Петрученко Оксана Степанівна ; Нац. акад. сухопут. військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – 160 с.

## REFERENCES

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy “Deiaki pytannia inzhenerneho zakhystu krytychnoi infrastruktury (Selected issues of engineering protection of critical infrastructure)” vid 26 kvitnia 2024 r. No 471.
2. Bilyk A. S., Mykhailovskiy D. V. Realizatsiia derzhavnoi kontseptsii Ukrainy iz zakhystu krytychnoi infrastruktury (Implementation of Ukraine’s national strategy for critical infrastructure protection: the “fortress nation” concept) – «Kraina-fortetsia» // *Military Strategy and Technology*. – 2025. – № 2(2). – S. 18–29. – DOI: 10.63978/3083-6476.2025.2.2.02.
3. Koval M.V., Koval V.V., Bilyk A.S., Kotsiuruba V.I., Kubrakov O.M. Osnovy inzhenerneho zakhystu ob’ektiv krytychnoi infrastruktury enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid zasobiv povitrianooho napadu protyvnyka (Fundamentals of engineering protection of Ukraine’s energy sector critical infrastructure against enemy air attacks): monohrafiia/zared. A.S. Bilyka. Kyiv : HSh ZSU, 2023.180 s.
4. Shuhailo O. P., Bilyk S. I. Otsinka bezpeky stalevykh konstrukttsii enerhoblokiv atomnykh stantsii z urakhuvanniam osoblyvykh umov yikh ekspluatatsii (Safety assessment of the steel structures of nuclear power plants units considering special operation conditions) // *Opir materialiv i teoriia sporud*. – 2023. – Vyp. 111. – S. 113–124. – DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.113-124.
5. Shuhailo O. P., Bilyk S. I. Rozvytok metodiv otsinky bezpeky stalevykh opornykh konstrukttsii obladdannia i truboprovodiv enerhoblokiv atomnykh stantsii za seismichnykh navantazhen (Development of Safety Assessment Methods for Steel Support Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping under Seismic Loads)// *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*. – 2023. – № 1(97). – S. 20–30. – DOI: 10.32918/nrs.2023.1(97).03.
6. Oucif C., Kalyana Rama J. S., Shankar Ram K., Abed F. Damage modeling of ballistic penetration and impact behavior of concrete panel under low and high velocities // *Defence Technology*. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 89–98. – DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.013.
7. Pu B., Wang X., Li W., Feng J. Analytical Model Formulation of Steel Plate Reinforced Concrete Walls against Hard Projectile Impact // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12, № 1. – Ст. 518. – DOI: 10.3390/app12010518.
8. Abdel-Kader M., Fouda A. Effect of reinforcement on the response of concrete panels to impact of hard projectiles // *International Journal of Impact Engineering*. – 2014. – Т. 63. – С. 1–17. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.07.005.
9. Horbachova Y. Laboratory studies of the influence of weapons on an armored obstacle // *Social Development and Security*. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 70–80. – DOI: 10.33445/sds.2022.12.1.8.
10. Metodyka otsiniuvannia efektyvnosti dii oskolkovo-fugasnoho snariada po nazemnykh tsiliakh (Methodology for assessing the effectiveness of high-explosive fragmentation projectiles against ground targets) : VP 7-07(01).01. – К. : Naukovodoslidnyi tsentr raketykh viisk i artylerii spilno z Raketynymi viiskamy i artyleriei Komanduvannia Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy ta Tsentrom operatyvnykh standartiv i metodyky pidhotovky ZS Ukrainy, 2019. – 48 s. – Obmezhenia rozpovsiudzhennia: obmezhen dla rozpovsiudzhennia nemaie.

11. Wen H. M. Predicting the penetration and perforation of targets struck by projectiles at normal incidence // *Mechanics of Structures and Machines*. – 2002. – Vol. 30, No. 4. – P. 543–577. – DOI: 10.1081/SME-120015076.
12. Mykhailovskyi D. V., Skliarova I. O., Khomik M. M., Vavilova N. V., Skliarova T. S. Analysis of methods for calculating the penetrating effect of the main types of missiles and fragmentation damage to the structures of protective constructions // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2024. – № 113. – С. 171–182. – DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.171-182.
13. Bisyk S. P., Nakonechnyi O. V. Doslidzhennia probyttia serdechnikom 7,62-mm kuli B-32 bahatosharovoho zakhysnoho elementa (Research on the Penetration of a Multilayer Protective Element by a 7,62-mm Bullet B-32) // *Social Development and Security*. – 2025. – Т. 15, № 6. – С. 323–335. – DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.6.28>
14. Daurov M. K. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire / M. K. Daurov, A. S. Bilyk // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2019. – Issue 102. – P. 62–68. DOI: 10.32347/2410-2547.2019.102.
15. Daurov M.K., Bilyk A.S. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2022. – Issue 108. – P. 325–336. – DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.325-336.
16. Ternovyi M. I., Bilyk A. S. Vybir ratsionalnoi vysoty stalevoi fermi pokryttia dlia budivel i sporud z urakhuvanniam dii zoseredzhenoho impulsnoho navantazhennia (Selection of the rational height of the steel roof trusses taking into account the effect of the impulse load) // *Opir materialiv i teoriia sporud*. – 2025. – № 114. – С. 231–240. – DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.231-240.
17. Nuzhnyi V. I., Bilyk S. I. Revealing the influence of wind vortex shedding on the stressed-strained state of steel tower structures with solid cross-section // *Engineering technological systems*. – 2024. – Vol. 3, No. 1 (129). – P. 69–79. – DOI: 10.15587/1729-4061.2024.306181.
18. Baulin D.S., Manzhura S.A., Odeichuk M.P., Odeichuk A.M., Horielyshev S.A., Ilchenko M.I. Rozrakhunok bronestiikosti metalevykh bahatosharovykh bronovanykh struktur za dopomohoiu metodu skinchennykh elementiv (Calculation of armor-resistant metal multilayer armored structures using the finite element method) / *Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirn.* – K.: KNUBA, 2019. – Vyp. 103. – S. 145-164. – DOI: 10.32347/2410-2547.2019.103.145-164
19. Petruchenko O. S. Obgruntuvannia parametriv bahatosharovoi zakhysnoi konstruktsii boiovykh mashyn na osnovi nelineinykh matematychnykh modelei : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.09 – dynamika ta mitsnist mashyn (The substantiation of parameters of a multi-layered protective construction for combat vehicles on the basis of nonlinear mathematical models) / Petruchenko Oksana Stepanivna ; Nats. akad. sukhopot. viisk im. hetmana Petra Sahaidachnoho, Nats. un-t «Lvivska politekhnika». – Lviv, 2018. – 160 s.

*Стаття надійшла 09.02.2026*

*Білик С.І., Дауров М.К., Білик А.С., Павловський О.В.*

#### **ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЛИСТОВОЇ СТАЛЕВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗАХИСНОЇ СПОРУДИ ПІД ЧАС ВЛУЧАННЯ УЛАМКУ ВІД УДАРНОГО БПЛА**

Визначено, що в умовах війни російської федерації проти України проблема вибору економічних та ефективних рішень для проектування захисних споруд є актуальною. З огляду літератури визначено, що раніше досліджувалася робота захисних конструкцій у випадку влучання куль стрілецької зброї, а влучання уламків від ударних БПЛА не розглядалося. Зазначено, що сталеві листові захисні конструкції є вигідними за рахунок швидкості зведення. З практики проектування захисних споруд відомо, що через обмеженість сортаменту листів із броньованої сталі необхідно проектувати листові конструкції двошаровими. Запропоновано використовувати одношарові листові конструкції більшої товщини із низьколегованої сталі, що має меншу міцність. Проведено чисельне моделювання проникнення уламку від ударного БПЛА в сталеві конструкції захисних споруд в умовах України. Параметри розміру, швидкості та матеріалу уламку прийняті відповідно до ударного БПЛА, що застосовується противником. Виконано динамічний розрахунок методом скінчених елементів за допомогою програмного комплексу ANSYS. Для моделювання роботи матеріалу сталі прийнято модель Джонсона-Кука – емпірична модель матеріалів, яка використовується для опису поведінки металів в умовах великих деформацій, високих швидкостей деформації та підвищених температур. Проведено по два розрахунки для різних товщин сталевих листів для броньованої та низьколегованої сталі. Визначено достатню товщину для недопущення проникнення уламку для сталевих листів з броньованої та низьколегованої сталі. Встановлено, що замість багатшарових листових конструкцій з броньованої сталі у захисних спорудах можливо застосовувати одношарові з низьколегованої сталі, які є в рази дешевшими за вартістю матеріалів. Результати цих досліджень дозволяють застосовувати в проектуванні захисних споруд більш економічні та менш трудомісткі до виконання конструкції з меншою кількістю монтажних зварних з'єднань.

**Ключові слова:** метод скінчених елементів, динамічний розрахунок, проникнення, захисні споруди, листові конструкції, броньована сталь, низьколегована сталь.

*Bilyk S.I., Daurov M.K., Bilyk A.S., Pavlovskiy O.V.*

#### **A PROTECTIVE SHELTER SHEET STEEL STRUCTURAL BEHAVIOUR NUMERICAL SIMULATION WHEN HIT BY A FRAGMENT FROM AN IMPACTING UAV**

It has been determined that, under the conditions of the war of the Russian Federation against Ukraine, the problem of selecting cost-effective and efficient solutions for the design of protective shelters is highly relevant. A review of the literature has shown that previous studies focused on the behaviour of protective structures subjected to small-arms bullet impacts, while the impact of fragments from strike UAVs has not been considered. It is noted that steel plate protective structures are advantageous due to the high speed of construction. From practical experience in the design of protective shelters, it is known that, due to the limited availability of armored steel plate sizes, plate structures must be designed as multilayer systems.

It is proposed to use single-layer plate structures of greater thickness made of low-alloy steel with lower strength. Numerical modeling of fragment penetration from a strike UAV into steel structures of protective shelters under the conditions of Ukraine

was carried out. The size, velocity, and material parameters of the fragment were adopted in accordance with the strike UAV used by the adversary. A dynamic analysis was performed using the finite element method with the ANSYS software package. To model the material behaviour of steel, the Johnson–Cook model was adopted—an empirical material model used to describe the behaviour of metals under large deformations, high strain rates, and elevated temperatures.

Two numerical simulations were conducted for different thicknesses of steel plates for both armored steel and low-alloy steel. The sufficient thickness required to prevent fragment penetration was determined for steel plates made of armored and low-alloy steel. It was established that, instead of multilayer armored steel plate structures, single-layer structures made of low-alloy steel can be used in protective shelters, providing several-fold reductions in material cost. The results of this study make it possible to apply more economical and less labor-intensive structural solutions in the design of protective shelters, with a reduced number of welded assembly connections.

**Keywords:** finite element method, dynamic analysis, penetration, protective shelters, plate structures, armored steel, low-alloy steel.

УДК 624.01

*Білик С.І., Дауров М.К., Білик А.С., Павловський О.В. Чисельне моделювання роботи листової сталеві конструкції захисної споруди під час влучання уламку від ударного БпЛА // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2026. – Вип. 116. – С. 35 – 40.*

*Проведено чисельне моделювання проникнення уламку від ударного БпЛА в сталеві конструкції захисних споруд в умовах України.*

Табл. 0. Іл. 5. Бібліогр. 19 назв.

UDC 624.01

*Bilyk S.I., Daurov M.K., Bilyk A.S., Pavlovskiy O.V. A protective shelter sheet steel structural behaviour numerical simulation when hit by a fragment from an impacting UAV // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-& Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 35-40.*

*A numerical simulation of fragment penetration from an impact UAV into steel structures of protective shelters under Ukrainian conditions was performed.*

Tab. 0 Fig. 5. Ref. 19.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих і дерев'яних конструкцій БІЛІК Сергій Іванович

**Адреса:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**Тел.** +38(044) 333-33-33

**E-mail:** bilyk.si@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-8783-5892>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор філософії, доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ДАУРОВ Михайло Костянтинович

**Адреса:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**Тел.** +38(044) 333-33-33

**E-mail:** daurov.mk@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-6338-4326>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури, начальник науково-дослідної лабораторії Науково-дослідного інституту воєнної розвідки Головного управління розвідки Міністерства оборони України БІЛІК Артем Сергійович

**Адреса:** 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

**Тел.** +38 (044) 241-54-89

**E-mail:** artem.bilyk@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-9219-920X>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор військових наук, професор, полковник, начальник науково-дослідного відділу Науково-дослідного інституту воєнної розвідки Головного управління розвідки Міністерства оборони України ПАВЛОВСЬКИЙ Олег Володимирович

**Адреса:** 04050, м. Київ, вул. Юрія Іллєнка, 81, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки Головного управління розвідки Міністерства оборони України

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0003-2689-3663>