

ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ЗАХИСНОЇ КОНСТРУКЦІЇ АНГАРА ПРИ ВИБУХОВИХ ВПЛИВАХ

*Марія БАРАБАШ¹, Валерій МАКСИМЕНКО², Наталія КОСТИРА³,
Ілля БАРМІН⁴*

^{1,3,4} Державний університет Київський авіаційний інститут,
1, просп. Любомира Гузара, Київ, Україна, 03058
¹ТОВ «ЛІРА САПР», Київ

²Державне підприємство Науково-дослідний інститут будівельного виробництва,
51, просп. Валерія Лобановського, Київ, Україна, 03037

¹ bmari.lira@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2157-521X>

²valeriy.max@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2835-026X>

³ nataliia.kostyra@npp.kai.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5934-9563>

⁴ barmin499@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-2610-3271>

Анотація. Робота присвячена аналізу експлуатаційної придатності споруди укриття для літаків під впливом вибухових та сейсмічних навантажень з урахуванням особливостей їх поширення через ґрунтове покриття. У дослідженні розглядається зниження несучої здатності конструкцій покриття в залежності від ступеня армування конструктивних елементів. Особливу увагу приділено розробці заходів, спрямованих на запобігання прогресивному обваленню плит покриття ангарної споруди у випадку можливого ракетного удару. Стаття аналізує кілька сценаріїв вибухового впливу, що дозволяє визначити найбільш критичні умови для забезпечення надійності ангара в надзвичайних ситуаціях. Розглянуто механізми поширення вибухових хвиль при наземному вибуху. Також представлено приклад розрахунку арочної конструкції ангара на дію вибухової хвилі з використанням програмного комплексу ЛІРА-FEM у випадку поверхневого вибуху. Приведені результати нелінійного розрахунку арки та плит покриття при додатковому ударному навантаженні до 20 тс/м². Моделювання нелінійного процесу навантажень проводилося при врахуванні демпфування ґрунтової основи до 10% на площі до 80 м² з коефіцієнтом динамічності 1.2 в ПК «ЛІРА-FEM», розрахунок на аварійне



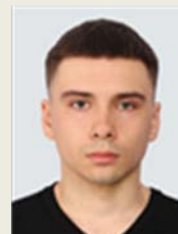
Марія БАРАБАШ
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
Директор ТОВ ЛІРА САПР,
д.т.н., професор



Валерій МАКСИМЕНКО
зав. лабораторією «Висотного і експериментального будівництва»,
к.т.н., с.н.с.,



Наталія КОСТИРА
доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва,
к.т.н., доцент



Ілля БАРМІН
аспірант кафедри комп'ютерних технологій будівництва

навантаження виконано при заданих ТА (тип армування).

Ключові слова: аварійний вибуховий вплив, оболонкові конструкції, захисні споруди, стійкість, прогресуюче обвалення, ЛІРА-FEM, нелінійний розрахунок, метод скінченних елементів, критичні навантаження, тріщиностійкість.

ВСТУП

У військовий час стає необхідним розраховувати захисні споруди для бойової авіації на аеродромах базування на дію ударних хвиль при вибухах.

На сьогодні застосовуються такі основні типи захисних укриттів для авіаційної техніки, наземного обладнання, матеріальних засобів та особового складу:

- залізобетонні захисні укриття аркового типу;
- земляні вали;
- швидкокомтовані укриття;
- підземні авіаційні бази.

У багатьох країнах для укриття бойових літаків широко застосовуються швидкокомтовані укриття – ангари.

Стандартне арочне укриття являє собою конструкцію з напіварок із ребрами, товщина яких становить 60 - 100 см. Зверху воно засипане землею та покрите верхнім шаром ґрунту вкритим травою, що водночас забезпечує гарне маскування. Основне приміщення, де розміщується бойовий літак, має розміри $\sim 20 \times 28,0$ метрів (є також коротші або довші варіанти).

Передня частина арки закривається залізобетонною торцевою стіною з металевими або залізобетонними воротами, які бувають двох типів: відкатні та розпашні.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В статті розглядається захисна споруда ангара арочного типу для літаків. Головним завданням і основоположним критерієм при проєктуванні подібних конструкцій є конструктивна безпека, а також необхідність оцінки стійкості ангарної споруди до критичних впливів і визначення резервів її несучої здатності. Розрахункова модель ангара представлена у вигляді

просторового залізобетонного каркасу з металевими несучими оболонками. Для оцінки стійкості споруди ангара при виникненні форс-мажорної ситуації необхідно виконати чисельне моделювання процесу деформацій і руйнування конструкцій ангара.

Схема споруди при розрахунку на сейсмічне навантаження прийнята рамно-в'язевою. Враховується ефект закручування споруди, викликаний неспівпадінням центру жорсткості споруди з центром прикладання мас при сейсміці.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Оскільки в конструкції ангара використовуються оболонкові покриття, то варто приділити увагу в тому числі розрахунку цих конструкцій. Результати наукових досліджень в галузі розрахунку оболонкових просторових конструкцій свідчать, що на стадії передпроектних досліджень таких споруд потрібні: уточнений чисельний розрахунок на основі методів нелінійної теорії пружності та пластичності. розробка нових методів розрахунку.[1, 2, 3].

Для математичного описання нелінійних процесів деформування таких конструкцій широко використовується підхід формулювання визначальних рівнянь у приростах, або у формі диференціальних залежностей [4]. Виходячи з цього підходу, конструкція, що розглядається в заданий момент часу, знаходиться в стані статичної рівноваги, причому напружений стан відомий на фіксованих інтервалах часу.

Скінченні нелінійно-пружні та пластичні деформації описані інтегруванням отриманих співвідношень вздовж заданого шляху інтегрування з використанням апроксимації функціонала для опису напруженого стану [4]. З точки зору кінематичних обмежень, що накладаються на розрахункові фрагменти цих конструкцій, відноситься до класу задач взаємодії сталевих оболонок (незнімної опалубки) з залізобетонною

аркою. Пружно-нелінійні властивості композитних, або анізотропно-конструктивних (умовних) матеріалів досліджуваних оболонкових конструкцій при наявності значних (великих) деформацій апроксимуються у процесі еволюції деформації інтегральним законом стану з використанням узагальненого закону Гука, розповсюдженого на область скінченних деформацій для ізотропного та “еквівалентного” ортотропного матеріалу (прямолінійна або криволінійна ортотропія) [5].

Зазначений клас задач відноситься до нелінійних і у загальному випадку у тривимірному просторі ці задачі розв’язуються на основі чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів (МСЕ). [6].

При виборі базової схеми МСЕ звертається увага на проблему врахування горизонтальних пружно-пластичних зміщень споруди при максимальному розрахунковому землетрусі (МРЗ) для сейсмічних навантажень по трьох-компонентних синтезованих акселерограмах. Для вирішення цієї проблеми використовуються нелінійні скінченні елементи.

Уточнення теорії оболонок із застосуванням чисельних методів набули розвитку в роботах О.С. Сахарова [7], В.А. Баженова, В.М. Кислоогого, О.І. Оглоблі, В.К. Цихановського [8], О.В. Шимановського [8].

Питанням розробки методів дослідження конструкційної безпеки будівель та споруд присвячені праці М.С.

Барабаш [9, 10, 11, 12], О.С. Городецького [6], В.П. Максименко, [11], Немчинова Ю.І. [13, 14] та інших вчених. У працях показаний вплив динамічного ефекту під час прогресуючого обвалення, яке зменшується при збільшенні пластичних деформацій [15, 16, 17, 18, 19].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Було виконано комп’ютерне моделювання комбінованої захисної споруди для літаків і розрахунки комбінованої просторової системи на сейсмічні, аварійні, навантаження та вибухові впливи з врахуванням ґрунтової основи.

Процеси деформації, руйнування і обвалення конструкцій за своєю суттю є розвиненими сильно нелінійними процесами, що супроводжуються, великими пластичними деформаціями та переміщенням, контактною взаємодією між групами елементів, впливом динамічного ефекту в момент відмови елементів конструкцій.

У якості вихідних співвідношень для скінченноелементної дискретизації розрахункового фрагменту оболонкових конструкцій, що використовуються в споруді ангара, використовуємо перший вираз принципу віртуальної роботи для динамічної задачі, виходячи із положень теорії у приростах, співвідношень інтегрального закону стану та розкладання функцій напружень і деформацій у ряд Тейлора в елементарному ряді, тобто для довільного моменту часу “ τ ” маємо:

$$\int_v \left[\hat{N}'|_{x=0} + \hat{M}'(x) + \hat{P}'(x) + \hat{C}_p^{(e,p)} \right]_{x=0} \cdot \left(\hat{\xi} \Big|_{x=0} + \hat{\phi}^{**}(x) + \hat{\psi}^{**}(x) \right) \cdot \left(\hat{\xi} \Big|_{x=0} + \hat{\phi}^{*}(x) + \hat{\psi}^{*}(x) \right) dv + \int_v \rho \vec{u} \cdot \delta \vec{u} dv - \int_v \vec{p} \cdot \delta \vec{u} dv - \int_S \vec{q} \cdot \delta \vec{u} dS = 0 \quad (1)$$

де $\hat{N}'|_{x=0}$, $M^{\hat{i}(x)\hat{j}(x)}$ - члени розкладання тензорної функції початкових напружень;

$\hat{C}_p^{(e,p)}|_{x=0}$ - тензор пружностей четвертого рангу з урахуванням розвитку пружних і пластичних деформацій;

$\xi \Big|_{x=0}^{\wedge}$, $\phi(x)$, $\psi(x)$ - члени розкладання тензорної функції приростів деформацій Коші-

Грина;

$\delta \xi \Big|_{x=0}^{\wedge}$, $\delta \phi(x)$, $\delta \psi(x)$ - члени розкладання варіації тензорної функції приростів

деформацій Коші-Гріна;

$\vec{u}$, $\vec{\ddot{u}}$ - відповідно вектори приростів переміщень і прискорень;

$\vec{p}$, $\vec{q}$ - відповідно вектори узагальнених об'ємних і поверхневих сил.

Використовуючи співвідношення схеми скінченних елементів і знаходячи стаціонарну точку модифікованого функціоналу при варіюванні вектора приросту переміщень $\{u(t)\}$ на полі можливих переміщень (кінематично допустимих в'язях), остаточно отримаємо диференціальне рівняння руху скінченно-елементної моделі (СЕ-моделі) розрахункового фрагменту досліджуваної конструкції:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + \{R(u, t)\} - \{Q(u, t)\} = 0 \quad (2)$$

де $[M]$ - узгоджувана матриця мас СЕ-моделі;

$\{R(u, t)\}$ - вектор нелінійних реакцій узагальнених внутрішніх сил;

$\{Q(u, t)\}$ - вектор узагальнених зовнішніх сил;

u , $\ddot{u}$ - вектори приростів переміщень і прискорень.

Результати комплексного чисельного моделювання істотно залежать від методів вирішення задач, які застосовуються:

- нелінійні динамічні задачі;
- геометрично нелінійні задачі з великими переміщеннями та з великими деформаціями;
- фізично нелінійні задачі з розвинутою пластикою і накопиченням пошкоджень матеріалом;
- задачі контактної взаємодії різних груп елементів конструкцій.

Розрахунок конструкцій на динамічні навантаження проводиться за методом

граничних станів - за несучою здатністю (граничні стани першої групи).

Повне руйнування характеризується обваленням конструкції і може бути викликано обривом розтягнутої арматури, зміщенням конструкцій з опор або їх руйнуванням. Обрив арматури зазвичай має місце при невеликій її наявності або застосуванні високоміцної арматури.

Для неповного руйнування характерно руйнування бетону стиснутої зони в одному або декількох перетинах і зниженні несучої здатності, однак, обвалення конструкцій не відбувається. Конструкція здатна ще витримати навантаження від власної ваги і тимчасового тривалого навантаження. Переміщення конструкції не обмежуються. Інтенсивність зниження несучої здатності залежить від вмісту арматури в елементі - μ (%): чим більше відсоток армування, тим швидше відбувається зниження несучої здатності і навпаки.

Нормуючі величини при динамічному навантаженні вибираються таким чином, щоб їх можна було обчислити за допомогою існуючих методів розрахунку, а також, щоб вони були зручні для експериментального визначення.

Оскільки застосовувані в даний час методи розрахунку дозволяють визначати згинальні моменти, прогини, кути розкриття в шарнірах пластичності, то граничні значення цих величин і приймаються в якості нормуючих.

Відсутність пластичних деформацій в арматурі буде забезпечена за умови:

$$M \leq M_{ud} \quad (3)$$

де M - згинальний момент в конструкції, M_{ud} - момент, при якому напруження в розтягнутій арматурі досягнуть динамічної границі текучості [20].

Пропонується наступна методика проведення чисельного моделювання і аналізу аварійної ситуації:

- оцінка жорсткісних характеристик, дійсних схем роботи і залишкових ресурсів здатності несучих конструктивних вузлів при миттєвому і тривалому типах навантаження в умовах нормального режиму експлуатації;
- оцінка зміни схеми роботи і жорсткісних характеристик конструктивних вузлів при дії підвищених навантажень і розвитку пластичних деформацій до повної втрати несучої здатності при аварійних впливах;
- оцінка впливу виявлених схем роботи вузлів на локальні зони конструкції;
- оцінка стану споруди на введення можливих виявлених конструктивних змін.

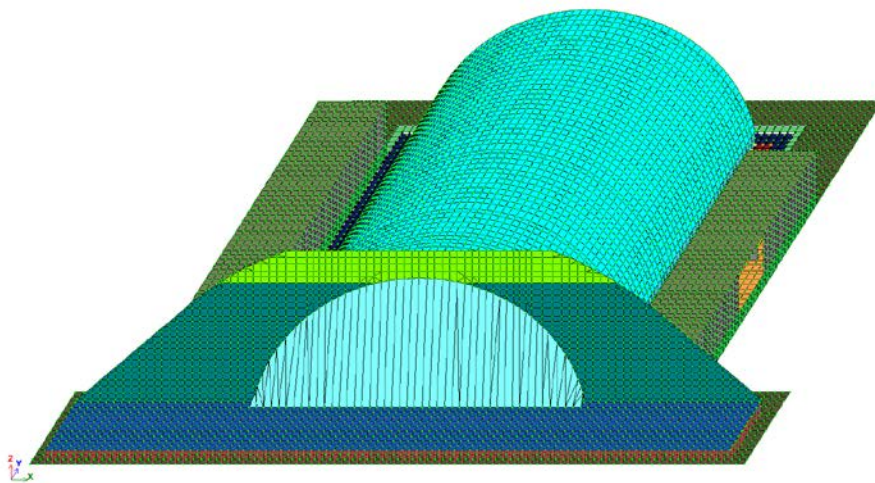


Рис. 1. Тривимірний загальний вид ангару та допоміжних споруд
Fig. 1. Three-dimensional general view of the hangar

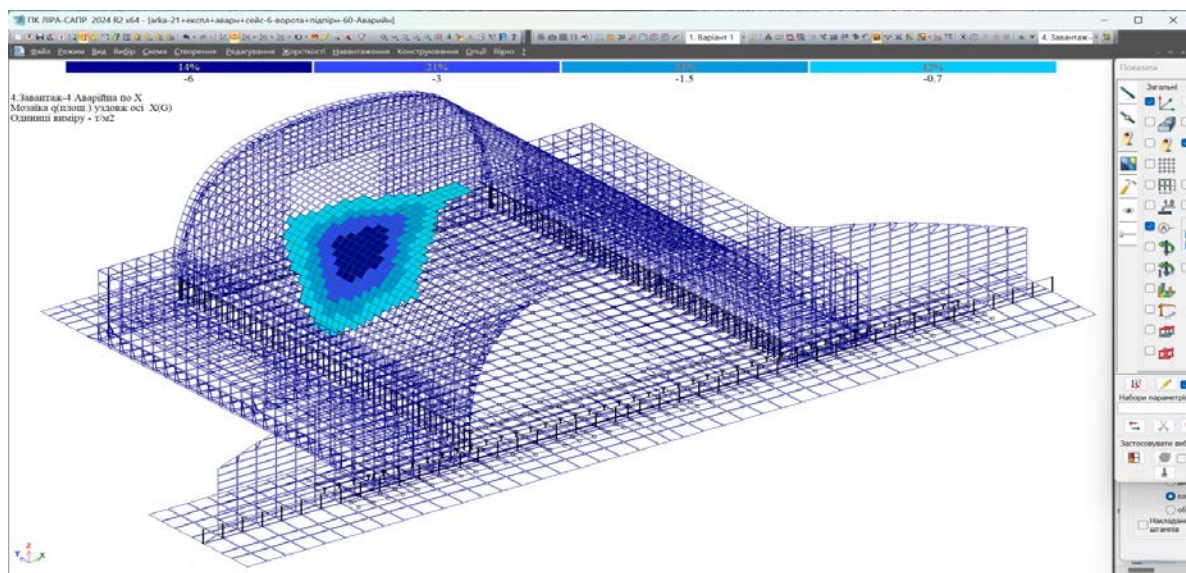


Рис. 2. Розрахункова схема МСЕ при вибуховому впливу на арку та додаткове аварійне нерівномірне навантаження по X
Fig. 2. Calculation scheme of MFE in case of explosive impact on the arch and additional emergency uneven load along X

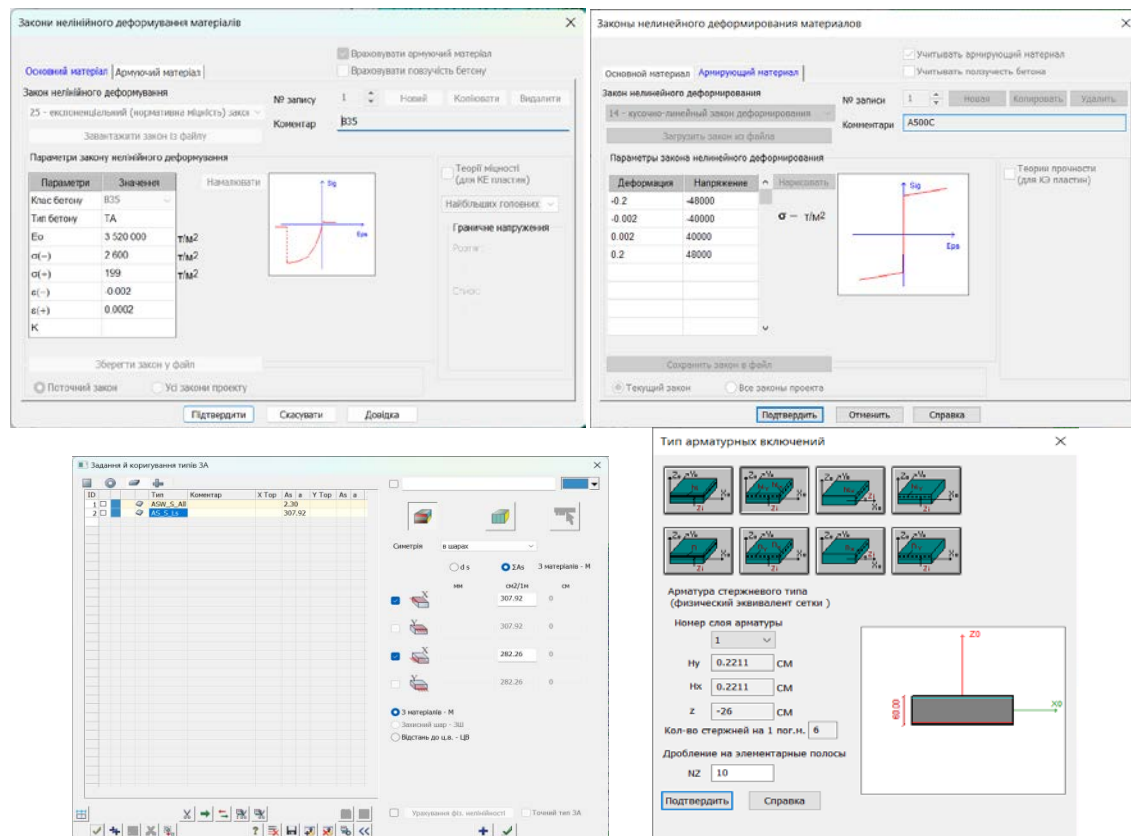


Рис. 3. Нелінійні закони армування бетону, арматури та типи армування арки по технології заданого армування (ТЗА)

Fig. 3. Nonlinear stress-strain diagrams of concrete reinforcement, reinforcement and types of arch reinforcement using the given reinforcement technology (TR)

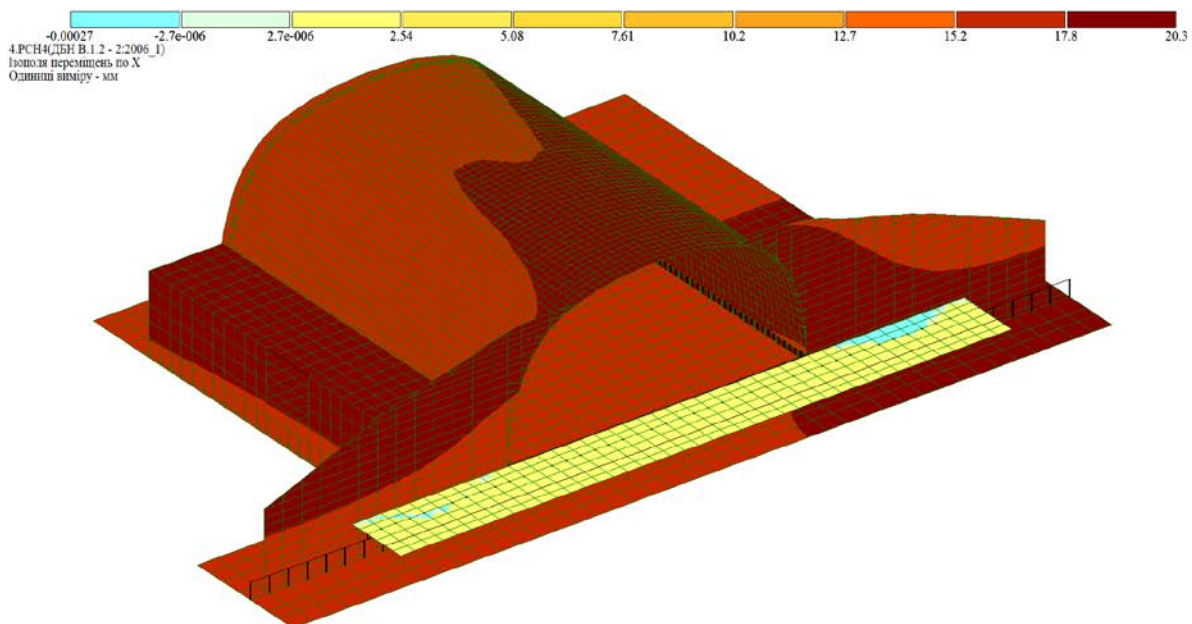


Рис. 4. Ізополі пружно-пластичних вертикальних деформацій ангару від аварійного навантаження (РСН-4, Постійне+Довготривале+Аварійне)

Fig. 4. Diagrams of elastic-plastic vertical deformations of the hangar from an emergency load (RCL-4, Constant + Long-term + Emergency)

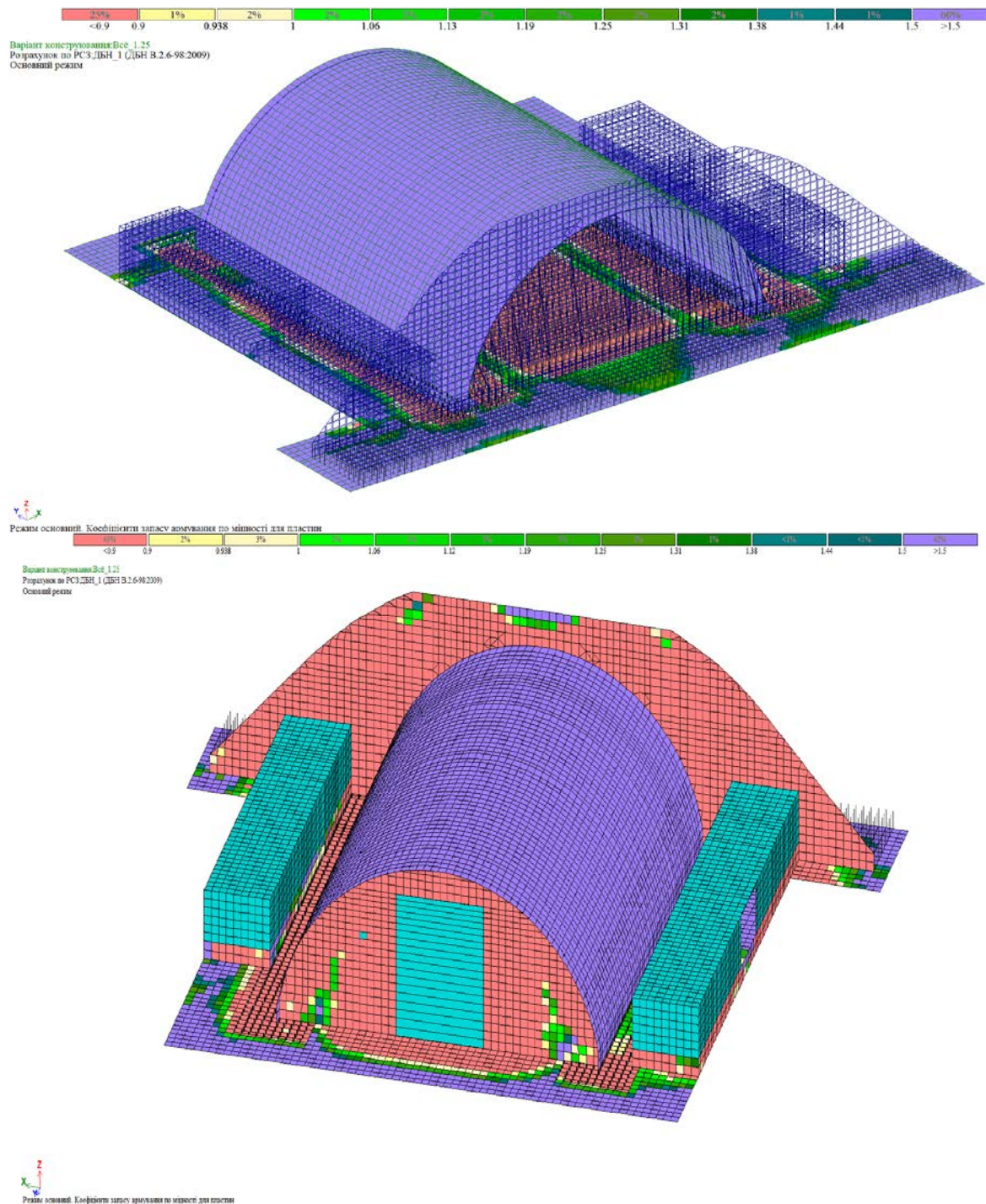


Рис. 5. Коefіцієнти запасу міцності ангару при впливі по +Y, +Z, демпфування ґрунту не більше 20%

Fig. 5. Safety factors of the hangar when exposed to +Y, +Z, soil damping no more than 20%

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Отримані результати свідчать, що експлуатаційна придатність споруди забезпечується з коefіцієнтом надійності в межах 0.9 - 1.5 та більше 5, прогресуюче обвалення плит допоміжних споруд ангару не відбувається при забезпеченні

армування: в нижньому шарі плит в середині прольоту не менше $15.4 \text{ см}^2/\text{пм}$ ($\text{Ø}14\text{мм}$ кроком 100мм при товщині плити 40см); в верхньому шарі плит над стінами не менше $28.1 \text{ см}^2/\text{пм}$ ($\text{Ø}14\text{мм}$ кроком $200\text{мм} + \text{Ø}20\text{мм}$ кроком 200мм) та при забезпеченні необхідної за розрахунком зони анкерування арматури.

Максимальний непружний перекіс споруди при аварійному вибуховому впливові на споруду становить 0.00537 (1/186), що менше допустимого за ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд [23].

ЛІТЕРАТУРА

1. **Han Sung-Cheon** Geometrically nonlinear analysis of laminated composite thin shells using a modified first-order shear deformable element-based Lagrangian shell element / *Han Sung-Cheon, Tabiei Ala, Park Weon-Tae* // *Compos. Struct.* – 2008. – 82, № 3. – P. 465-474.
2. **Dung Nguyen Tien** Geometrically nonlinear formulation for thin shells without rotation degrees of freedom / *Dung Nguyen Tien, Wells Garth N.* // *Comput. Meth. Appl. Mech. And Eng.* – 2008. – 197, № 33-40. – P. 2778-2788.
3. **Plunkett B.** Orthotropic yield criteria for description of the anisotropy in tension and compression of sheet metals / *B. Plunkett, O. Caracu, F. Barlat* // *Int. J. Plast.* – 2008. – 24, № 5. – P. 847-866.
4. **Washizu K.** Variational Methods in the Theory of Elasticity and Plasticity / *Kyuichirou Washizu*; Pergamon Pr; Subsequent edition, 1987. – 542 p.
5. **Green, A. E.** Large elastic deformations and nonlinear mechanics of continuous media / *A. Green, A. E., Adkins, J. E.*; Oxford, Clarendon Press, 1965. – 455 p.
6. **Барабаш М.С.** Дослідження стійкості конструкцій будівель та споруд до прогресуючого руйнування при аварійних впливах / *М.С. Барабаш, О.С. Городецький* // *Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві.* – 2010. – №2(20). – С.19–23.
7. **Сахаров О.С.** Моментна схема методу скінчених елементів (МСКЕ) з урахуванням жорстких зсувів // *Опір матеріалів і теорія конструкцій.* – Київ: Будівельник, 1974. – Вип. XXIV. – с.147-156.
8. Метод скінчених елементів в механіці твердих тіл / [О. С. Сахаров, В. М. Кислюк, В. В. Киричевський и др.]; під ред. О. С. Сахарова. – Київ: Вища школа, Головне вид-во, 1982. – 480 с.
9. **Шимановський О.В., Цихановський В.К., Талах С.М.** Оптимізація комбінованих просторових систем / *під ред.* Шимановського А.В. – К.: Вид-во «Сталь», 2012. – 462 с.
10. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Pysarevskiy B.Y.** Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
11. **Барабаш М.С., Костира Н.О., Томашевський А.В.** Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САПР». *Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро.* – № 1(007). – 2022. – С. 7-14. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.22022.7.827>
12. **Максименко В.П., Барабаш М.С., Писаревський Б.Ю.** Методика оцінки напружено-деформованого стану конструкцій будівлі на основі методу підсистем. / *Науково техн. журнал «Будівельне виробництво», К.:НДІБВ, 2021р, №71, ISSN: 2524-2555*
13. **Barabash M., Pisarevskiy B., Bashinsky Ya.** Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program) / *Civil and Environmental Engineering, 2020. – Vol. 16, Issue 1, P. 63-70.*
14. **Nemchynov, I.** (2021). Building Science and Seismic Safety Provision in Ukraine Considering Eurocode Recommendations. *Science and Construction, (29)3, 3-14.* Retrieved from <https://doi.org/10.33644/2313-6669-14-2021-12>
15. **Немчинов Ю.І, Мар'єнков Н.Г. Хавкін А.К., Бабік К.М.** Проектування будівель із заданим рівнем забезпечення сейсмостійкості / *За ред. Ю.І. Немчинова. Київ: Гудименко С.В., 2012. 384 с.*
16. **Powell, Graham.** Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. *SEAOC Annual Convention, Monterey, August, 2004.*
17. **Gilmour J.R. and Viridi K.S.** Numerical modelling of the progressive collapse of a framed structures as a result of impact or explosion. 2nd int. PhD. Symposium in civil engineering, Budapest 1998.
18. **Kaewkulchai G. and Williamson E.B.** Beam element formulation and solution procedure dynamic progressive collapse analysis, *Journal*

"Computer and Structures" 82 (2004). – P. 639–651.

19. **Pretlove A.J., Ramsden M. and Atkins A. G.**, 1991, "Dynamic Effects in Progressive Failure of Structures", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.11, No.4, pp.539–546.
20. **Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss, Part I, *Engineering structures* 20 (2008), 1308–1318; part II, *Engineering structures* 30 (2008). – P. 1424–1438.
21. **ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012** Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Загальні положення. [Чинні від 01.07.2013] Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 115с,
22. **ДБН В.2.2-5:2023** Захисні споруди цивільного захисту. [Чинні від 01.11.2023] Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 119с,
23. **ДБН В.2.1-10:2018** Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. [Чинні від 01.11.2023] Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 36с,

REFERENCES

1. **Han Sung-Cheon** Geometrically nonlinear analysis of laminated composite thin shells using a modified first-order shear deformable element-based Lagrangian shell element / *Han Sung-Cheon, Tabiei Ala, Park Weon-Tae // Compos. Struct.* – 2008. – 82, № 3. – P. 465–474.
2. **Dung Nguyen Tien** Geometrically nonlinear formulation for thin shells without rotation degrees of freedom / *Dung Nguyen Tien, Wells Garth N. // Comput. Meth. Appl. Mech. And Eng.* – 2008. – 197, № 33–40. – P. 2778–2788.
3. **Plunkett B.** Orthotropic yield criteria for description of the anisotropy in tension and compression of sheet metals / *B. Plunkett, O. Caracu, F. Barlat // Int. J. Plast.* – 2008. – 24, № 5. – P. 847–866.
4. **Washizu K.** Variational Methods in the Theory of Elasticity and Plasticity / *Kyuichirou Washizu; Pergamon Pr; Subsequent edition, 1987. – 542 p.*
5. **Green, A. E.** Large elastic deformations and nonlinear mechanics of continuous media / *A. Green, A. E., Adkins, J. E.; Oxford, Clarendon Press, 1965. – 455 p.*
6. **Barabash M. S.** Continuing the stability of structures built up before the progressive collapse during emergency inflows / *M. S. Barabash, A. S. Gorodetsky O. S. // Scientific and technical journal: New technologies in everyday life.* – 2010. – No. 2(20). – P.19–23.
7. **Sakharov O. S.** Moment scheme of finite elements (MSFE) taking into account rigid shears / *O. S. Sakharov // Resistance of materials and theory of structures.* – Kyiv: Builder, 1974. – Issue XXIV. – P. 147–156.
8. Finite element method in mechanics of solids / [O. S. Sakharov, V. M. Kyslooki, V. V. Kyrychevskiy et al.]; edited by O. S. Sakharov. – Kyiv: Higher School, Main Publishing House, 1982. – 480 p.
9. **Szymanovskiy O.V., Tsykhanovskiy V.K., Talakh S.M.** Optimization of combined spatial systems / edited by Szymanovskiy A.V. – K.: Publishing house "Stal", 2012. – 462 p.
10. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Pysarevskiy B. Y.** Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
11. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Tomashevsky A.V.** The value of stress-strain resistance of damaged load-bearing structures using PC "LIRA-SAPR" tools. Ukrainian magazine of everyday life and architecture. *Dnipro.* – No. 1(007). –2022. –P. 7-14. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827>
12. **Maksimenko V. P., Barabash M. S., Pisarevsky B. Yu.** Methodology for assessing the stress-strain structure of a structure based on the Subsystem method. *Naukovo Tekhn. magazine "Budivselne Virobnitstvo", K.:NDIBV,* 2021, No. 71, ISSN: 2524-2555
13. **Barabash M., Pisarevskiy B., Bashinsky Ya.** Material damping in dynamic analysis of structures (with LIRA-SAPR program) / *Civil and Environmental Engineering, 2020. – Vol. 16, Issue 1, P. 63–70.*
14. **Nemchynov, I.** (2021). Building Science and Seismic Safety Provision in Ukraine Considering Eurocode Recommendations.

Science and Construction, (29)3, 3-14.
Retrieved from
<https://doi.org/10.33644/2313-%206669-14-2021-12>

15. **Nemchinov, Y.I., Marienkov, N.G., Khavkin, A.K., Babik, K.M. (Ed.).** (2012). Design of Buildings with a Specified Level of Seismic Resistance. Kyiv: Hudymenko S.V.
16. **Powell, Graham.** Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. SEAOC Annual Convention, Monterey, August, 2004.
17. **Gilmour J.R. and Virdi K.S.** Numerical modelling of the progressive collapse of a framed structures as a result of impact or explosion. 2nd int. PhD. Symposium in civil engineering, Budapest 1998.
18. **Kaewkulchai G. and Williamson E.B.** Beam element formulation and solution procedure dynamic progressive collapse analysis, *Journal "Computer and Structures"* 82 (2004). – P. 639–651.
19. **Pretlove A.J., Ramsden M. and Atkins A.G.,** 1991, "Dynamic Effects in Progressive Failure of Structures", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 11, No.4, pp.539–546.
20. **Izzudin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss, *Part I, Engineering structures* 20 (2008), 1308–1318; *part II, Engineering structures* 30 (2008). – P. 1424–1438.
21. **DSTU N B EN 1992-1-2:2012** (2013) Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. [Valid from 2013-07-01]
22. **DBN V.2.2-5:2023** (2023) Civil defense protective structures. Kyiv: Ministry of Community, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. [Valid from 2025-04-01].
23. **DBN V.2.1-10:2018** (2018) Bases and foundations of buildings and structures. Basic provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and

Communal Services of Ukraine.[Valid from 2019-01-01].

ASSESSMENT OF THE RESISTANCE OF THE HANGAR PROTECTIVE STRUCTURE TO EXPLOSIVE IMPACTS

Mariia BARABASH,
Valeriy MAKSYMENKO,
Nataliia KOSTYRA,
Illia BARMIN

Summary. The study is dedicated to analyzing the operational suitability of an aircraft shelter structure under explosive and seismic loads, taking into account the specific characteristics of wave propagation through the soil cover. The research examines the reduction in the load-bearing capacity of the roof structures depending on the degree of reinforcement in the structural elements. Particular attention is given to the development of preventive measures against progressive collapse of the shelter's roof slabs in the event of a potential missile strike. The article explores several explosive impact scenarios to identify the most critical conditions for ensuring the reliability of the hangar structure under emergency situations. The mechanisms of blast wave propagation resulting from a surface explosion are also analyzed. An example calculation of the hangar's arched structure under explosive wave loading is provided using the LIRA-FEM software for a surface explosion scenario. Results are presented for a nonlinear analysis of the arch and roof slabs under additional impact loading of up to 20 tf/m². The nonlinear loading process was modeled considering soil base damping up to 10% over an area of 80 m², with a dynamic coefficient of 1.2 using the LIRA-FEM software. Emergency load calculations were performed based on specified reinforcement types (TA).

Keywords: emergency explosive impact, shell structures, defense structure, stability, progressive collapse, LIRA-FEM, nonlinear calculation, finite element method, critical loads, crack resistance

Стаття надійшла до редакції 09.01.2025 р.