

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АНІЗОТРОПНИХ ОБОЛОНОК У ПК «AUTODESK INVENTOR»

Гапонова Л. В., Архіпов О.В., Сумінов А. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Проведено чисельний експеримент процесів конструктивно-анізотропних конструкцій за впливу на них рівномірно-розподіленого 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 . Для вивчення напружено-деформованого стану елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з кроком бетонних ребер 1 м з полістирольними вкладками та конструктивно-анізотропною оболонкою розміром $9 \text{ м} \times 9 \text{ м}$ з металевим листом у нижньому поясі.

Ключові слова: анізотропна конструкція, дизайн середовища, ПК «Autodesk Inventor», напружено-деформований стан.

Вступ

Проектування дизайну середовища у створенні закритих просторів малих архітектурних форм, а саме невеликих наземних модульних укриттів для захисту людей у громадських місцях від вибухових хвиль та осколкових уражень для розміщення на зупинках транспорту, у парках, скверах та в інших місцях перебування людей у населених пунктах, територіях підприємств є на сьогодні актуальним питанням.

Аналіз публікацій

Раніше проведені наукові дослідження впливу між параметрами вибуху та огорожувальними конструкціями [1–6]. Наводячи приклади уявлення особливостей моделювання напружено-деформованого стану складних об'єктів, варто процитувати А. В. Перельмута: «Робота несної конструкції багато в чому визначається плечем внутрішньої пари.

У сфері воно дорівнює відстані між поясами, в арці – відстані від замка до затягування, у куполі – приблизно відстані між вершиною й опорним кільцем. А яке плече внутрішньої пари в оболонці двоякої кривизни на прямокутному плані? Відповідь на це запитання вимагає розуміння роботи конструкції «загалом», що багато в чому протилежно детальному аналізу напружено-деформованого стану (НДС). Такий аналіз спрямований на вивчення деталей (пошук піків напруг, місць зі максимальними прогинами тощо) [7].

Метод скінченних елементів заснований на дискретизації самого об'єкта у вигляді окремих кінцевих елементів [8].

Впровадженню в проектування прямих методів сприяли способи трактування поняття

«раціональне рішення», а також використання методу скінченних елементів (МСЕ).

Поняття «раціональна конструкція» вдалося дещо конкретизувати й і трансформувати за допомогою цікавих ідей і досліджень Г. В. Василькова та В.С. Шмуклера [9].

Розрізняють такі типи анізотропії:

- 1) анізотропія пружних властивостей;
- 2) анізотропія меж пружності, плинності, інших властивостей, які визначаються в області малих пластичних деформацій;
- 3) анізотропія характеристик значної пластичної деформації (межа міцності за наявності шийки, рівномірна пластичність тощо);
- 4) анізотропія характеристик, пов'язаних із руйнуванням (характеристики опору руйнуванню за різних видів навантаження, гранична пластичність тощо).

Розрізняють анізотропію характеристик, які визначаються за статичних навантажень, анізотропію тривалої міцності та повзучості, анізотропію ударної в'язкості, тріщиностійкості, твердості й мікротвердості тощо. За структурною ознакою розрізняють гомогенну та гетерогенну анізотропію, викликану орієнтованими залишковими мікронапругами або пов'язану з особливостями дислокаційної структури.

Велика кількість металевих матеріалів квазіізотропна в пружних і пластичних областях, а також під час руйнування способом зрізу, але анізотропна в опорі відриву. У листових матеріалах розрізняють «площинну» і «нормальну» пластичну анізотропію.

Перша визначається залежністю характеристик від напрямку в площині листа, друга – різницею між властивостями в площині листа і в напрямку, перпендикулярному до неї (за товщиною). У цьому випадку

«площинна» анізотропія пов'язана з утворенням фестонів, а «нормальна» впливає на величину утонення в зоні максимальної деформації у процесі глибокої витяжки. За геометричним типом розрізняють прямолінійну та криволінійну анізотропію.

Мета та постановка завдання

Мета – створення науково-обґрунтованого розрахунку конструктивно-анізотропних конструкцій у програмному комплексі «Autodesk Inventor».

Для досягнення поставленої мети визначено **завдання** – здійснити розрахування напружено-деформованого стану конструктивно-анізотропних конструкцій у вигляді оболонки $9\text{ м} \times 9\text{ м}$.

З цією метою застосовано енергетичний критерій щодо раціоналізації зовнішніх конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок.

У процесі дослідження визначено, що, якщо $H \approx 3,8\text{ м}$ (для розглянутих конкретних умов), потенційна енергія деформації (ПЕД) досягає нижньої межі, враховані дослідження, що взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропній оболонці між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів за величини кроку ребер орієнтовно до $l \approx 1000\text{ мм}$ ПЕД досягає нижньої межі.

Необхідно провести чисельний експеримент поведінки конструктивно-анізотропної конструкції за впливу на них рівномірно-розподіленого снігового навантаження 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 . **Об'єктом дослідження** є робота анізотропної конструкції оболонки для малих архітектурних форм.

Методи дослідження – метод скінчених елементів у процесі чисельного моделювання роботи конструкції, класичні та чисельні методи механіки твердого тіла, що деформується.

Виклад основного матеріалу. Для вивчення напружено-деформованого стану елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром $9\text{ м} \times 9\text{ м}$ із кроком бетонних ребер 1 м та з полістирольними вкладками. Конструкція монолітної оболонки містить арматурні каркаси, між якими розташовані бетонні ребра та вкладки, що забезпечують вирівнювання зусиль і спільну роботу зовнішньої і внутрішньої обшивок [10]. Раніше [11] здійснено чисельний аналіз поведінки

конструктивно-анізотропної конструкції у нестационарних умовах під впливом на неї стандартної пожежі. Визначено, що в розглянутій конструкції товщиною 300 мм діють температури за бетонного перерізу $395\text{ }^\circ\text{C}$ і за утеплювачем $520\text{ }^\circ\text{C}$. Також визначена вогнестійкість конструктивно-анізотропних оболонок, яка дорівнює REI 60.

Моделювання схем навантажень на анізотропні конструкції різної гаусової кривизни є досить актуальними, отримані результати розглянуті в роботах [12, 13].

Розрахування здійснювались у програмному комплексі «Ansys» з використанням модуля «Static Structural». Побудовано тривимірну кінцево-елементну модель [14], яка дозволяє проаналізувати напружено-деформований стан конструкцій. Модель оболонки налічує 45644 вузлів і 7484 кінцевих елементів.

Реалізоване 3D-моделювання арочної конструкції (рис. 1, 2).



Рис. 1. Арочна конструкція з металевим листом

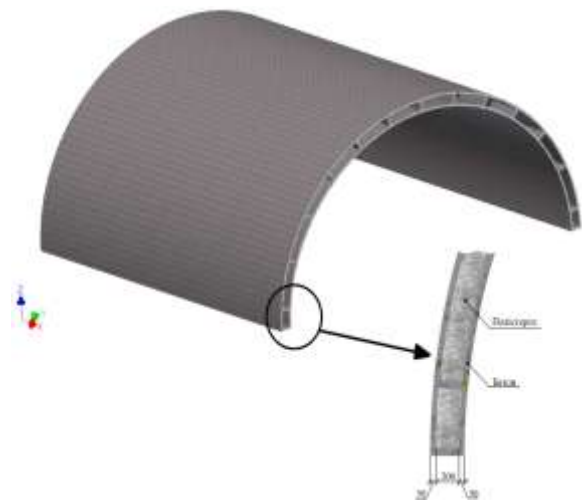


Рис. 2. Конструктивно-анізотропна оболонка $9\text{ м} \times 9\text{ м}$ з полістирольними вкладками

Модель розраховувалась за навантаження від власної ваги конструкції (рис. 3, 4), від снігового покриття 1600 Па/м^2 (рис. 5) та з-

середнього навантаження 1 т/м^2 (рис. 6, 7). Обпирання має бути шарнірно нерухомим за чотирма кутовими точками оболонки в плані.

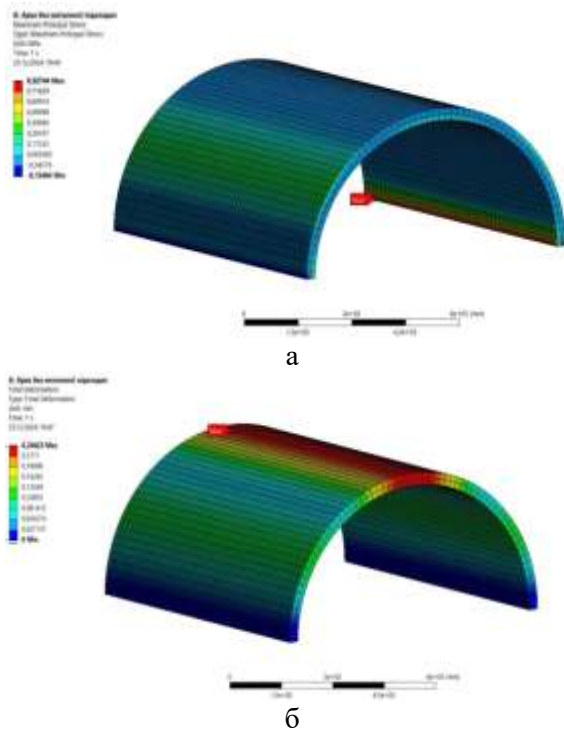


Рис. 3. Напруги (а) та деформація (б) конструкції без металевго листа від власної ваги

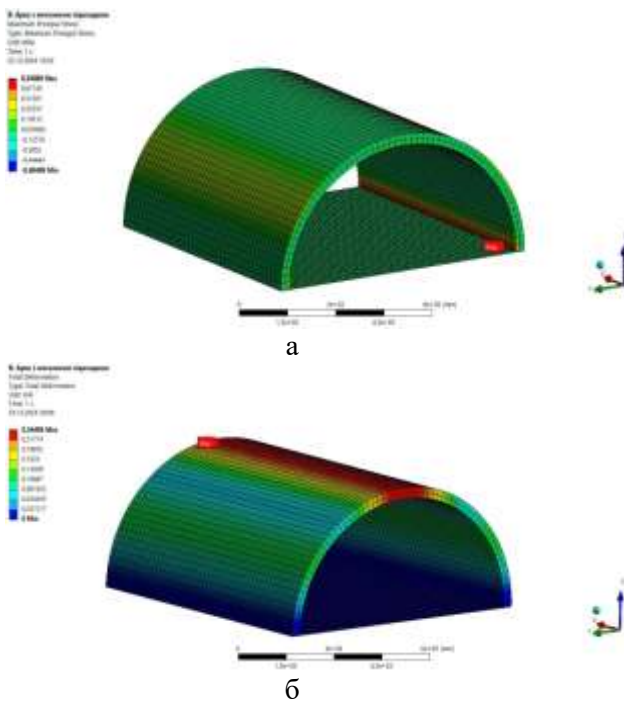


Рис. 4. Напруги (а) та деформація (б) конструкції з металевим листом від власної ваги

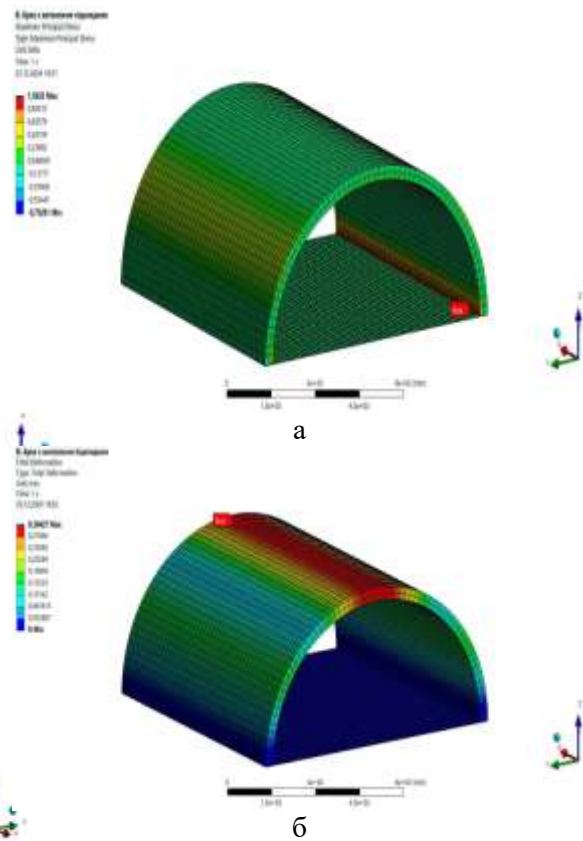


Рис. 5. Напруги (а) та деформація (б) конструкції з металевим листом від власної ваги та снігового покриву

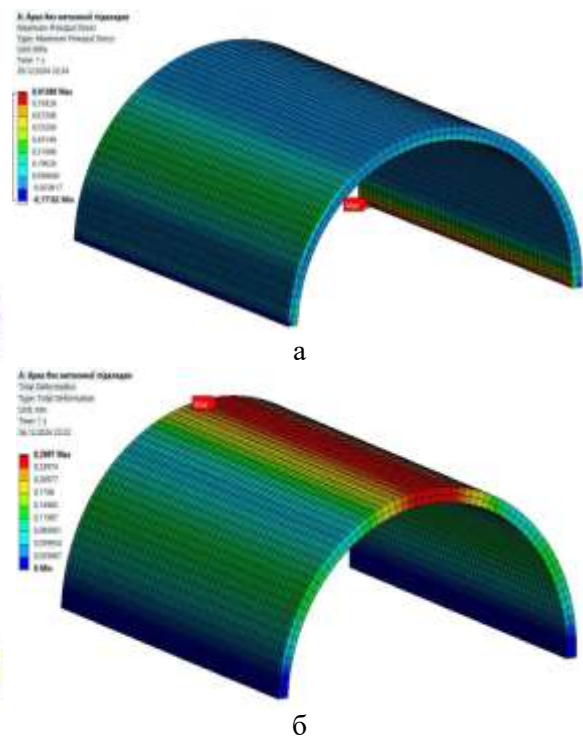


Рис. 6. Напруги (а) та деформація (б) конструкції без металевго листа від дії зосередженого навантаження 1 т/м^2

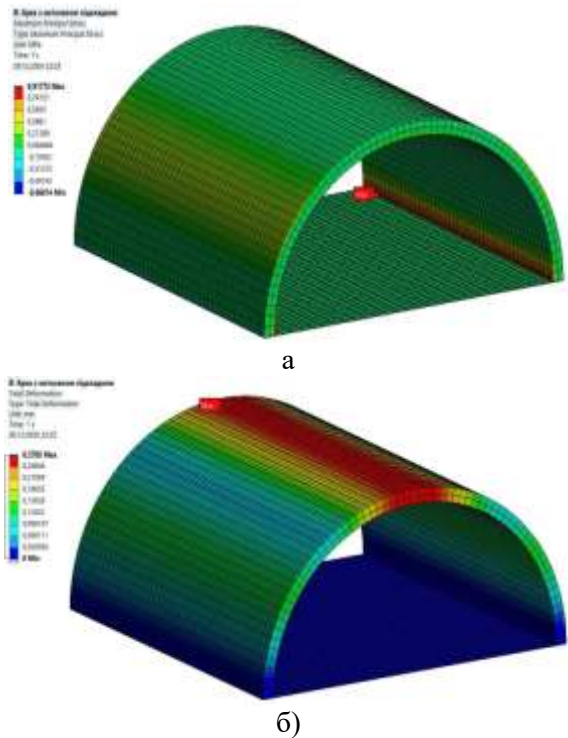


Рис. 7. Напруги(а) та деформація (б) конструкції з металевим листом від дії зосередженого навантаження 1 т/м²

Інструментарій розрахункового комплексу «Ansys» дозволяє здійснювати автоматичну триангуляцію складних форм на кінцеві об’ємні елементи способом автоматичного імпорту з допоміжного програмного компле-

ксу тривимірного моделювання. Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Висновки

Здійснено чисельне дослідження НДС архітектурно-композиційної споруди, зробленої з бетону з вкладками з полістиролу. Здійснено порівняльний аналіз із конструктивно-анізотропною оболонкою 9 м × 9 м з полістирольними вкладками та з металевим листом у нижньому поясі δ = 10 мм. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів (МСЕ) в спеціалізованих програмних комплексах «Autodesk Inventor» та «Ansys» з використанням модуля «Static Structural». Під час цього аналізу було визначено, що напруги від власної ваги, снігового покриву та від зосередженого навантаження для конструкції без металевих листа мають малі величини.

Отже, можна дійти висновку, що з економічного погляду для забезпечення найбільш прийнятного розподілу зусиль, який є заданою несною здатністю за обмеження використання матеріалу, найкращими є конструктивно-анізотропні залізобетонні оболонки 9 м × 9 м з полістирольними вкладками, які сприймають зазначені види навантаження. У подальшій роботі доцільно розглядати такі види покриття, які могли б сприймати, рівномірно розподіляти й передавати навантаження на опори.

Таблиця 1 – Зведена таблиця отриманих результатів

Параметри	Конструктивно-анізотропна оболонка 9 м × 9 м з полістирольними вкладками	Конструктивно-анізотропна оболонка 9 м × 9 м з полістирольними вкладками та з металевим листом у нижньому поясі δ = 10 мм
Геометрія (довжина, ширина, висота), м	9 × 9 × 3,8	9 × 9 × 3,8
Максимальні напруги від власної ваги, МПа	0,827 МПа	0,831 МПа
Максимальні напруги від власної ваги та снігового покриву, МПа	0,827 МПа	1,033 МПа
Максимальні деформації від власної ваги, мм	0,244 мм	0,24 мм
Максимальні деформації від власної ваги та снігового покриву, мм	0,244 мм	0,3 мм
Максимальні деформації від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,269 мм	0,271 мм
Максимальні напруги від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,914 МПа	0,917 МПа

Література

1. Ромашкіна М., Пісаревський Б., Журавльов О. Розрахунок будівлі на вплив дії повітряної ударної хвилі прямим динамічним методом з використанням ПК ЛІРА-САПР. Збірник наукових праць «Будівельні конструкції. Теорія і практика». 2024. Випуск 14. С.147–160.
2. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту [Введений у дію з 01.11. 2023]. Київ: Міністерство України, 2023. 112 с.
3. U.S. Department of the Army, the Navy and Air Force. The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual (TM 5-1300).
4. U.S. Department of the Army: Washington, DC, USA, 1990.
5. U.S. Department of Defense (DOD). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02); DOD: Washington, DC, USA, 2008.
6. Cormie D., Mays G., Smith P. D. Blast Effects on Buildings, 2nd ed. Thomas Telford: London, UK, 2009.
7. Перельмутер А. В. Нотатки про прикладну науку. Computational Civil and Structural Engineering. 2013. 23 с.
8. Перельмутер А. В., Слівкер В. І. Розрахункові моделі споруд і можливість їх аналізу (видання 4-е перероблене і доповнене). Київ, 2021.
9. Городецький А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В. Інформаційні технології розрахунку та проєктування будівельних конструкцій. Харків: НТУ «ХПІ», 2003. 889 с.
10. Бугаєвський С. А. Спосіб зведення елементів будівель криволінійної форми. Науковий вісник будівництва. 2015. № 2. С. 116–126.
11. Гапонова Л. В., Резнік П. А., Гребенчук С. С. Оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропної залізобетонної плити. Міжвідомч. наук.-техн. зб. (Технічні науки) «Будівельне виробництво». 2017. № 62/1. С. 57–63.
12. Гапонова, Л. В., Калмиков О. О., Гребенчук С. С. Експериментально-теоретичне дослідження напруженодеформованого стану сферичної оболонки покриття: зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2015. Вип. 157. С. 102–113.
13. Gaponova L. V., Grebenchuk S. S. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell. Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering. 201. 1(48). С. 108–120.
14. Ansys simulation software enables organizations to confidently predict how their products will operate in the real world / Ansys, Inc. www.ansys.com.
15. SAPR. Zbirnik naukovih prac «Bu-divelni konstrukciyi. Teoriya i praktika». Vipusk 14. S.147–160.
16. DBN V.2.2-5:2023. Zahisni sporudi civilnogo zahistu [Vvedenij u diyu z 01.11.2023]. Kyiv: Minregion Ukrayini, 2023. 112 s.
17. 3.U.S. Department of the Army, the Navy and Air Force. The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual (TM 5-1300)/
18. U.S. Department of the Army: Washington, DC, USA, 1990.
19. U.S. Department of Defense (DOD). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02); DOD: Washington, DC, USA, 2008.
20. Cormie, D., Mays, G., Smith, P. D. (2009). Blast Effects on Buildings, 2nd ed. Thomas Telford: London, UK.
21. Perelmutter, A. V. (2013). Zametki o prik-ladnoj nauke. Computational Civil and Structural Engineering. 23 s.
22. Perelmutter, A. V., Slivker, V. I. (2021). Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ih analiza (izdanie 4-e pererabotannoe i dopolnennoe). Kyiv.
23. Gorodeckij, A. S., Shmukler, V. S., Bondarev, A. V. Informacionnye tehnologii rascheta i proektirovaniya stroitelnyh konstrukcij. Harkov: NTU «HPI», 2003. 889 s.
24. Bugaevskij, S. A. (2015). Sposob vozvedeniya elementov zdaniy krivolinejnoj formy. Naukovij visnik budivnictva. № 2. S. 116–126.
25. Gaponova, L. V., Reznik, P. A., Grebenchuk, L. V. (2017). Ocenka ognestojkosti konstruktivno-anizotropnoj zhelezobetonnoj plity. Mizhvidomch. nauk.-tehn. zb. (tehnicni nauki) «Budivnele vi-robnictvo». № 62/1. S. 57–63.
26. Gaponova, L. V., Kalmikov, O. O., Grebenchuk, L. V. (2015). Eksperimentalno-teoretichne doslidzhennya napruzhenodeformovanogo stanu sferichnoyi obolonki pokrittya. Zb. nauk. prac Ukrayinskogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu. – Harkiv: UkrDAZT, Vip. 157. S. 102–113.
27. Gaponova, L. V., Grebenchuk, S. S. (201). Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell. Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering. 1(48). С. 108–120.
28. Ansys simulation software enables organizations to confidently predict how their products will operate in the real world / Ansys, Inc. www.ansys.com.

References

1. Romashkina, M., Pisarevskij, B., Zhuravlov, O. (2024). Rozrahunok budivli na vpliv diyi povitryanoyi udarnoyi hvili pryamim dinamichnim metodom z vikoristannyam PK LI-RA-

Гапонова Людмила Вікторівна, к.т.н., завідувач кафедри комп'ютерної графіки, тел.+38-050-981-95-38, gaplyudmila@gmail.com,
Архімов Олександр Володимирович, к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної графіки, тел. +38-099-245-61-45, alexkhadikharkov@gmail.com

Сумінов Андрій Володимирович, викладач

кафедри комп'ютерної графіки,

тел. +38 099-757-89-54,

andrey.suminov@gmail.com

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Computer modeling of anisotropic shells in PC «AUTODESK INVENTOR»

Abstract. A numerical experiment was conducted to investigate the behaviour of structurally anisotropic structures under the influence of a uniformly distributed load and a concentrated load of 1 t/m². To study the stress-strain state of the elements, a safe space was proposed in the form of a structurally anisotropic shell measuring 9 m × 9 m with a concrete ribs pitch of 1 m with polystyrene foam inserts and a structurally anisotropic shell measuring 9 m × 9 m with a metal sheet in the lower belt. **Goal.** The goal is to create a scientifically based calculation of structurally anisotropic structures in the Autodesk Inventor software package. To achieve this goal, the task was established as follows: to develop calculations of the stress-strain state of structurally anisotropic structures in the form of a 9m x 9m shell. At the same time, the energy criterion was applied to the rationalization of the external structural parameters of reinforced concrete structurally anisotropic shells. **Originality.** According to the results of the study, it was determined that (for the specific conditions considered) at $H \approx 3.8$ m, the potential energy of deformation reaches its minimum. The study incorporated the relationship of rational parameters in a structurally anisotropic shell between the DER of the system of external and internal rational parameters: at a rib

pitch close to $l \approx 1000$ mm, the DER reaches the lower limit. A numerical experiment on the behavior of a structurally anisotropic structure under the influence of a uniformly distributed load and a concentrated load of 1 t/m² was performed. The object of the study is the properties of anisotropic shell structures in the context of small architectural forms. **Methodology.** Research methods are the finite element method in numerical modeling of the work of the structure, as well as classical and numerical methods of mechanics of a deformable solid. **Practical value.** Design of the design of the middle of built enclosed spaces of small architectural forms, and even small ground-based modular shelters for the protection of people in large towns in Vibukhov hills and fragmentation shells for placement on transport links, near parks, in squares and other open places, the presence of people in populated areas and territories of hostilities is on the clock.

Key words: anisotropic structure, environmental design, PC «Autodesk Inventor», stress-strain state.

Haponova Lyudmila, PhD, Department of computer graphics, ORCID: 0000-0002-6038-2624,

gaplyudmila@gmail.com

Arkhipov Alexander, PhD, Department of computer graphics,

ORCID: 0000-0002-2287-1451

alexkhadikharkov@gmail.com

Suminov Andrii, Department of computer graphics, ORCID: 0000-0002-4268-2906

andrey.suminov@gmail.com

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.