# УДК 692.45

А.В. Набока, П.М. Фірсов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

# ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАТИВНОСТІ КОНСТРУКТИВНОЇ СИСТЕМИ ВЕЛИКОПРОЛІТНОГО ПОКРИТТЯ У ВИГЛЯДІ АСИМЕТРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ

Наукова робота присвячена комплексному дослідженню деформативності сідловидної оболонки негативної Гаусової кривини громадського об'єкта, що тривалий час знаходиться в експлуатації. Виконано експериментальну оцінку несучої здатності оболонки з визначенням перерозподілу зусиль по довжині перерізу в нижній зоні умовно окресленої арки. Проведено чисельну верифікацію поведінки досліджуваного конструктиву шляхом побудови деталізованої скінченно-елементної моделі оболонки.

Ключові слова: розрахунок, відновлення, завантаження, прогин, оболонка, негативна Гаусова кривина.

# Постановка проблеми

У процесі реконструкції та/або відновлення складних об'єктів культурної спадщини доводиться вирішувати цілий ряд локальних архітектурних, планувальних та конструктивних завдань [1].

Дослідження, проведені на сьогодні в області поведінки великопролітних арочних систем і оболонок в часі [2, 3, 4], вимагають подальшого поглиблення, тому що здебільшого вони не враховують специфіку тривалих експлуатаційних впливів, через які можуть утворюватися не тільки значні деформації, а й перерозподіл навантажень, викликаючи зміну первинної конструктивної схеми об'єкта. Виходячи з цього, розгляд питань, пов'язаних безпосередньо з аналізом напруженодеформованого стану арочних систем і оболонок будівель при тривалій експлуатації (особливо якщо це пам'ятки архітектури та містобудування з класом наслідків відмови ССЗ), слід вважати доцільним.

Будівля кіноконцертної зали «Україна» у місті Харків відрізняється унікальністю конструктивного рішення — вперше в світовій практиці інженерами була запроєктована асиметрична схема великопролітного сідлоподібного покриття (рис. 1).



Рис. 1. ККЗ «Україна», вид збоку на асиметричне сідлоподібне покриття будівлі

Для реалізації цього конструктивного рішення була створена оболонка розміром 90,0×48,0 м, яка покривалась армоцементними плитами (рис. 2).



Рис. 2. Монолітна залізобетонна арка, момент зведення конструкції у 1962 році

Покриття будівлі виконане у вигляді оболонки, окресленої по частині поверхні гіперболічного параболоїда. Покриття огороджене двома параболічними арками зі стрілами підйому 31,275 м і 20,365 м. Кут нахилу похилої арки до горизонту складає 12°, кут нахилу крутої арки – 45° (рис. 3).



Рис. 3. Геометрія нахилу арок покриття

Система покриття будівлі представляє собою несучу систему з сітки високоміцних тросів, які закріплені на замкнутому контурі. Замкнутий контур виконаний у вигляді двох укладених на колони похилих арок, що перетинаються між собою. Стійкість арок в одній площині забезпечується встановленням колон і якорівтросів, в іншій – власною жорсткістю арки. Система високоміцних тросів працює сумісно з армоцементною оболонкою, що виконана шляхом торкретування.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день конструкції, створені з використанням просторових оболонок негативної Гаусової кривини, є одним з найпрогресивніших видів несучих систем, які використовуються в різних галузях будівництва та архітектури, зокрема як покриття для багатофункціональних великопролітних будівель і споруд [5, 6, 7].

Комплексні розрахунки конструктивних систем у формі оболонок зводяться до вирішення задач, які можна описати за допомогою нелінійних диференціальних виразів в часткових похідних (рівняння рівноваги або функціонали) [8, 9, 10]. Оскільки точні аналітичні рішення подібних завдань здебільшого отримати неможливо, велике теоретичне та практичне значення набуває саме розробка й дослідження чисельних методів і алгоритмів автоматизованого проєктування [11, 12].

### Мета статті

Метою дослідження є експериментальне встановлення характеристик деформативності сідловидної оболонки негативної Гаусової кривини громадського об'єкта, що тривалий час знаходиться в експлуатації (понад 60 років), для подальшого загального відновлення системи покриття будівлі.

### Виклад основного матеріалу

Для реалізації поставленої мети співробітниками кафедри Будівельних конструкцій ХНУМГ ім. О.М. Бекетова разом із фахівцями ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» був розроблений спеціальний алгоритм проведення експериментальних досліджень шляхом додаткового статичного завантаження оболонки в нижній точці пологої осьової лінії опорних арок.

Запропоновані рішення дозволили оцінити здатність оболонки сприймати локальне концентроване зосереджене навантаження (заздалегідь заплановане, зі штучним перевищенням його величини у порівнянні з існуючим розрахунковим) і визначити перерозподіл зусиль по довжині перерізу в нижній зоні умовно окресленої арки.

Схема розташування майданчика завантаження в плані, із розмірами 2,0×2,0 м наведена на рис. 4.



Рис. 4. Схема завантаження оболонки покриття в плані

Для улаштування завантаження була застосована наступна авторська розробка. З метою плавного виконання процедури завантаження на поверхні покриття були змонтовані ємності (бочкиконтейнери) з їх подальшим наповненням водою. Цей варіант завантаження подібних конструкцій можна вважати найменш трудомістким та найбільш ефективним. Порядок завантаження здійснювався поетапно, з кроками у 250 кг (≈2,5 кН) і далі доводився до рівня 1,2 т (≈12,0 кН). Загальний вигляд системи завантаження наведений на рис. 5.



Рис. 5. Загальний вигляд системи завантаження досліджуваної оболонки

Для фіксації переміщень використовувались прогиноміри марки ПАО-8, які пройшли відповідну метрологічну повірку (рис. 6).



Рис. 6. Загальний вигляд кріплення (фіксації) прогиноміру марки ПАО-8

Перший прогиномір (шифр «ПР-1») був встановлений безпосередньо під зовнішнім навантаженням, другий (шифр «ПР-2») – на відстані 7,0 м від центральної осі, де був попередньо встановлений перший прилад (рис. 7).



Рис. 7. Установка прогиномірів в нижній зоні покриття в центральній частині будівлі

Під час поетапного першого короткочасного завантаження фіксувались первинні показання приладів. Після цього проводилась витримка протягом 15 хв (до моменту стабілізації), і знімалися вже нові показання. Всього було передбачено п'ять етапів завантаження, по 2,5 кН кожен.

Після короткочасного завантаження проводилось аналогічне тривале, тобто максимальне навантаження (≈12,0 кН) витримувалося на покритті будівлі у заданій точці протягом тижня.

Натурні випробування конструкції покриття проводились у літній період при температурі зовнішнього повітря  $t_3 = +31$  °C ... +35 °C. Температура всередині будівлі  $t_6 = +26$  °C ... +28 °C. Вологість повітря всередині будівлі становила 50 %.

Результати короткочасних експериментальних випробувань наведено на рис. 8.



Рис. 8. Визначення короткочасних деформацій поверхні оболонки до зовнішнього навантаження

Результати експериментальних випробувань показали, що деформативність поверхні оболонки при короткочасному завантаженні не перевищувала 2,0 мм, а при тривалому завантаженні – не більше 4,0 мм (табл. 1).

Таблиця 1

Заміри переміщень оболонки при короткочасному та тривалому навантаженні

Етапи	Показання прогиномірів				
завантаження,					
кН	ПР-1	ПР-2			
0	7674	4503			
2,5	7685	4496			
5,0	7707	4394			
7,5	7717	4388			
10,0	7739	4367			
12,0	7753	4376			
12,0	7804	4434			
12,0	7905	новий нуль			
12,0	7950	9128			
12,0	7991	9155			
12,0	7984	9367			
12,0	8031	9369			
12,0	8041	9470			
12,0	8046	9349			
12,0	8025	9441			
12,0	8026	9302			
12,0	8021	9368			
12,0	8024	9296			
12,0	8017				
6,0	7996	7996 –			
0,0	7945	-			
0,0	8014	—			
0,0	8036	-			

Аналіз якісних особливостей деформування конструкції свідчить про те, що (як і слід було очікувати) переміщення точок покриття, розташованих симетрично відносно вертикальної осі (яка проходить через «сідлову» точку), мають знак протилежний відносно знаку переміщення власне «сідлової» точки (випадок симетричного деформування). Так, якщо перший прогиномір ПР-1 показав прогин (переміщення вниз), то другий ПР-2 зафіксував згин (переміщення наверх). Тобто форма деформування оболонки якісно співпадає з першою (симетричною) формою втрати стійкості арки [13].

Також необхідно зазначити, що під час проведення експерименту також вивчалася поведінка оболонки під вказаним завантаженням в часі до моменту повного затухання переміщень.

Графік залежності *t*-*f* «час-прогин» зображено на рис. 9.



# Рис. 9. Визначення тривалих деформацій поверхні оболонки до зовнішнього навантаження

Для подальшого відновлення системи покриття будівлі також було проведено термографічний контроль з метою визначення найбільш вразливих ділянок, що утворились в процесі експлуатації, та наявних дефектів (рис. 10).



Рис. 10. Термограма системи покриття будівлі

Далі було виконано чисельну верифікацію та зіставлення результатів розрахунку з результатами картини переміщень при натурних випробуваннях. В середовищі ПК Ліра 10.6 (ліцензійний номер 1/1096) була сформована відповідна скінченноелементна модель оболонки. Форма контуру оболонки обрана прямокутною. Модель виконана виключно з використанням СЕ № 42 «Універсальний трикутний СЕ оболонки» (рис. 11).



Рис. 11. Схематичне зображення СЕ № 42 і послідовність нумерації його вузлів

Вказаний СЕ призначений для міцнісного розрахунку тонких пологих оболонок (куполів, плит, балок-стінок тощо) [14].

Потім було здійснено розрахунок конструкції покриття із застосуванням вбудованої процедури створення поверхонь, заданих системою математичних рівнянь.

Шаг тріангуляції склав 0,5 м. Загальна кількість вузлів – 19544, загальна кількість елементів – 38233. Товщина оболонки – 6,0 см. Модуль пружності І-го роду – 23000 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0,2.

Під час проведення натурного експерименту навантаження 300 кг/м<sup>2</sup> було прикладене в «сідловій» точці покриття на майданчику 2,0×2,0 м. З огляду на те, що тріангуляція моделі виконана трикутними СЕ в розрахунковій моделі навантаження було задане також в «сідловій» точці з інтенсивністю 300 кг/м<sup>2</sup> по окружності діаметром 2,25 м, для того щоб сумарне навантаження дорівнювало 200 кг.

На рис. 12 наведені ізополя вертикальних переміщень. Максимальні вертикальні переміщення склали: прогин – 6,96 мм, згин – 1,41 мм.



Рис. 12. Ізополя вертикальних переміщень, мм

Також були побудовані епюри вертикальних переміщень між точками 1–5–3 і 2–5–4. Точка № 5 розташована в «сідловій» точці покриття, точки № 1, 2, 3 і 4 – на відстані 9,0 м від неї (рис. 13, 14).



Рис. 13. Графік вертикальних переміщень між точками 1–5–3, мм



Рис. 14. Графік вертикальних переміщень між точками 2–5–4, мм

Зіставлення результатів чисельного розрахунку з даними, які були отримані під час натурних випробувань, показують збіг якісних та кількісних параметрів (похибка на перевищує 7–9 %), що характеризує теоретичну модель як цілком адекватну і придатну для аналізу НДС конструкції. Похибки в подібних розрахунках можуть бути пов'язані з певними спрощеннями, які приймаються при побудові чисельної моделі оболонки покриття.

Паралельно із зіставленням характеристик статичного завантаження, також додатково було проведено модальний аналіз. Власні значення частот і періодів коливань представлені у табл. 2.

#### Таблиця 2

Nº	Власні значення	Частоти		Паріоли о	Коефіцієнт	Модальна маса	
		рад/с	Гц	періоди, с	розподілу	<i>B</i> %	<i>B</i> %
1	0,115	8,665	1,380	0,725	0,013	0,001	0,001
2	0,115	8,669	1,380	0,724	-0,038	0,004	0,004
3	0,113	8,819	1,404	0,712	0,000	0,000	0,004
4	0,113	8,833	1,406	0,711	0,021	0,001	0,005
5	0,103	9,753	1,553	0,644	-0,002	0,000	0,005
6	0,102	9,811	1,562	0,640	0,012	0,001	0,006
7	0,098	10,218	1,627	0,615	-0,033	0,005	0,011
8	0,097	10,258	1,633	0,612	0,034	0,005	0,016
9	0,085	11,794	1,878	0,532	0,069	0,026	0,041
10	0,084	11,847	1,886	0,530	-0,110	0,054	0,095

Власні значення, частоти, періоди коливань

На рис. 15 зображені вертикальні переміщення першої форми коливань. Відмічається, що частоти основного фону до обертонів знаходяться у межах 1,38–1,886 Гц, що добре корелюється з натурними

динамічними вишукуваннями оболонки покриття, де значення власних частот знаходилися в інтервалі від 1 до 2,5 Гц [15].



Рис. 15. Переміщення по вертикальній осі першої форми коливань (шкала – відносні величини)

# Висновки

1. Розроблено експериментальний алгоритм встановлення характеристик деформативності великопролітної сідловидної оболонки негативної Гаусової кривини на прикладі громадського об'єкта, що тривалий час знаходиться в експлуатації.

2. Проведено чисельну верифікацію поведінки досліджуваного конструктиву шляхом побудови деталізованої скінченно-елементної (СЕ) моделі оболонки. Зіставлення результатів чисельного розрахунку з результатами натурних випробувань показали збіг якісних та кількісних параметрів, що характеризує розроблену теоретичну модель як цілком адекватну і придатну для аналізу напружено-

деформованого стану аналогічних великопролітних конструктивних систем.

 Проведено додатковий модальний аналіз конструктивної системи покриття будівлі. Встановлено, що частоти основного фону до обертонів знаходяться у межах, які корелюють з натурними динамічними вишукуваннями оболонки.

4. За результатами проведених комплексних теоретично-експериментальних досліджень надано пропозиції щодо відновлення конструкції покрівлі з обмеженням власної ваги покриття до 1 кН/м<sup>2</sup>.

 Отримані результати в подальшому можуть бути використані інженерами і науковцями при проведенні робіт з відновлення та/або реконструкції подібних автентичних конструктивних систем.

#### Література

1. Культурна спадщина та національна безпека : аналіт. доп. / В. Потапенко, Ю. Тищенко, Ю. Каплан, В. Бакальчук, О. Литвиненко, О. Михайлова ; за ред. В. Потапенка ; Нац. ін-т стратег. дослідж. – Київ : НІСД, 2023. – 58 с. – DOI: <u>10.53679/NISS-analytrep.2023.08</u>.

2. Kromoser B. Efficient construction of concrete shells by Pneumatic Forming of Hardened Concrete: Construction of a concrete shell bridge in Austria by inflation / B. Kromoser, J. Kollegger // Structural Concrete. – 2020. – Vol. 21, Issue 1. – P. 4–14. – DOI: 10.1002/suco.201900169.

3. Sahoo S. Bending of Composite Stiffened Hypar Shell Roofs under Point Load / S. Sahoo, D. Chakravorty // Journal of Engineering Mechanics. – 2008. – Vol. 134, Issue 6. – P. 441–454. – DOI: <u>10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:6(441)</u>.

 4. Sahoo S. Deflections, forces, and moments of composite stiffened hypar shell roofs under concentrated load / S. Sahoo, D. Chakravorty // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2006. – Vol. 41, Issue 1. – P. 81–97. – DOI: <u>10.1243/030932405X3092</u>.

5. Use of hypar-shell structures with textile reinforced cement matrix composites in lightweight constructions / E. De Bolster, H. Cuypers, P. Van Itterbeeck, J. Wastiels, W. P. De Wilde // Composites Science and Technology. – 2009. – Vol. 69, Issue 9. – P. 1341–1347. – DOI: <u>10.1016/j.compscitech.2008.10.028</u>.

6. Chrzanowska K. Unconventional building forms roofed with innovative structures arranged on regular surfaces with negative Gaussian curvature / K. Chrzanowska, J. Abramczyk // Budownictvo i Architektura. – 2023. – Vol. 22, No. 3. – P. 5–25. – DOI: <u>10.35784/bud-arch.3325</u>.

7. Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid / Y. M. Babych, O. V. Andriichuk, S. O. Uzhehov, R. V. Pasichnyk, D. Y. Kysliuk // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708. – Article 012042. – DOI: <u>10.1088/1757-899X/708/1/012042</u>.

8. Дзюба А. П. Алгоритм розрахунку циліндричної оболонки зі змінною в окружному напрямку жорсткістю на основі дискретно-континуального підходу / А. П. Дзюба, І. А. Сафронова, Л. Д. Левитіна // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. пр. / Дніпр. нац. ун-т ім. Олеся Гончара. – Дніпро : Ліра, 2019. – Вип. 30. – С. 53–67. – DOI: <u>10.15421/4219026</u>.

9. Das H. S. A finite element application in the analysis and design of point-supported composite conoidal shell roofs: Suggesting selection guidelines / H. S. Das, D. Chakravorty // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 2010. – Vol. 45, Issue 3. – P. 165–177. – DOI: <u>10.1243/03093247JSA582</u>, 10. Tamayo J. L. P. Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Shells / J. L. P. Tamayo, I. B. Morsch, A. M. Awruch // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2013. – Vol. 10, No. 6. – P. 1109–1134. – Regime of access: <u>https://www.lajss.org/index.php/LAJSS/article/view/659</u>, free (date of the application: 10.02.2024).

11. Gaponova L. V. Stress and strain behaviour of reinforced concrete anisotropic shells / L. V. Gaponova, S. S. Grebenchuk // Academic Journal "Industrial Machine Building, Civil Engineering". – 2017. – Vol. 1, No. 48. – P. 108–120. – DOI: <u>10.26906/znp.2017.48.784</u>.

12. Yaseen A. A. Parametric Analysis of the Static Behavior of Long Cylindrical Concrete Thin Shells under Self-Weight Loading / A. A. Yaseen, M. A. Khalaf, F. H. Majeed // Mathematical Modelling of Engineering Problems. – 2023. – Vol. 10, No. 3. – P. 815–820. – DOI: <u>10.18280/mmep.100311</u>. 13. Кривенко О. П. Аналіз стійкості пологих оболонок лінійно-змінної товщини / О. П. Кривенко, П. П. Лізунов, Ю. В. Ворона // Управління розвитком складних систем : 36. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ : КНУБА, 2022. – Вип. 52. – С. 47–53. – DOI: <u>10.32347/2412-</u> <u>9933.2022.52.47-53</u>.

14. Аналіз напружено-деформованого стану купола-оболонки місячного модуля / М. В. Савицький, С. Є. Шехоркіна, А. М. Сопільняк, К. В. Шляхов, К. О. Сіренок // Український журнал будівництва та архітектури. – 2022. – № 4 (010). – С. 82–88. – DOI: <u>10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.82.881</u>. 15. Shmukler V. Estimation of the composition of the forced and free vibrations of the casing of the steel rope roof of Ukraine Cinema & Concert Hall located in Kharkiv over the area of main line tunnel of working metropolitan railway / V. Shmukler, V. Zhylyakov, O. Shapovalov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 230. – Article 02030. – DOI: <u>10.1051/matecconf/201823002030</u>.

#### References

 Potapenko, V., Tyshchenko, Yu., Kaplan, Yu., Bakalchuk, V., Lytvynenko, O., & Myhailova, O. (2023). *Cultural heritage and national security: analytical report* (V. Potapenko, Ed.). National Institute for Strategic Studies (NISS). <u>https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2023.08</u> [in Ukrainian]
Kromoser, B., & Kollegger, J. (2020). Efficient construction of concrete shells by Pneumatic Forming of Hardened Concrete: Construction of a concrete shell bridge in Austria by inflation. *Structural Concrete*, 21(1), 4–14. <u>https://doi.org/10.1002/</u> suco.201900169

3. Sahoo, S., & Chakravorty, D. (2008). Bending of Composite Stiffened Hypar Shell Roofs under Point Load. *Journal of Engineering Mechanics*, 134(6), 441–454. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2008)134:6(441)

4. Sahoo, S., & Chakravorty, D. (2006). Deflections, forces, and moments of composite stiffened hypar shell roofs under concentrated load. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *41*(1), 81–97. <u>https://doi.org/10.1243/030932405X3092</u>

5. De Bolster, E., Cuypers, H., Van Itterbeeck, P., Wastiels, J., & De Wilde, W. P. (2009). Use of hypar-shell structures with textile reinforced cement matrix composites in lightweight constructions. *Composites Science and Technology*, *69*(9), 1341–1347. <u>https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.028</u>

6. Chrzanowska, K., & Abramczyk, J. (2023). Unconventional building forms roofed with innovative structures arranged on regular surfaces with negative Gaussian curvature. *Budownictvo i Architektura*, 22(3), 5–25. <u>https://doi.org/10.35784/</u>bud-arch.3325

7. Babych, Y. M., Andriichuk, O. V., Uzhehov, S. O., Pasichnyk, R. V., & Kysliuk, D. Y. (2019). Determination of stresses in thin-walled steel fiber reinforced concrete roofs in the form of hyperbolic paraboloid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012042. https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012042

8. Dzyuba, A. P., Safronova, I. A., & Levitina, L. D. (2019). Calculation algorithm on the basis of a discrete-continuous approach for cylindrical shell of variable rigidity in circular direction. *Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures*, (30), 53–67. <u>https://doi.org/10.15421/4219026</u> [in Ukrainian]

9. Das, H. S., & Chakravorty, D. (2010). A finite element application in the analysis and design of point-supported composite conoidal shell roofs: Suggesting selection guidelines. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, *45*(3), 165–177. https://doi.org/10.1243/03093247JSA582

10. Tamayo, J. L. P., Morsch, I. B., & Awruch, A. M. (2013). Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Shells. *Latin American Journal of Solids and Structures*, *10*(6), 1109– 1134. <u>https://www.lajss.org/index.php/LAJSS/article/view/659</u> 11. Gaponova, L. V., & Grebenchuk, S. S. (2017). Stress and strain behaviour of reinforced concrete anisotropic shells. *Academic Journal "Industrial Machine Building, Civil Engineering"*, 1(48), 108–120. https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.784

12. Yaseen, A. A., Khalaf, M. A., & Majeed, F. H. (2023). Parametric Analysis of the Static Behavior of Long Cylindrical Concrete Thin Shells under Self-Weight Loading. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, *10*(3), 815–820. https://doi.org/10.18280/mmep.100311

13. Krivenko, O., Lizunov, P., & Vorona, Yu. (2022). Buckling analysis of shallow shells having linear-variable thickness. *Management of Development of Complex Systems*, (52), 47–53. <u>https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.47-53</u> [in Ukrainian] 14. Savytskyi, M. V., Shekhorkina, S. Ye., Sopilniak, A. M., Shliakhov, K. V., & Sirenok, K. O. (2022). Assessment of stress-strain state for dome-shell of lunar module. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, (4 (010), 82–88. <u>https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.82.881</u>

[in Ukrainian]

15. Shmukler, V., Zhylyakov, V., & Shapovalov, O. (2018). Estimation of the composition of the forced and free vibrations of the casing of the steel rope roof of Ukraine Cinema & Concert Hall located in Kharkiv over the area of main line tunnel of working metropolitan railway. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02030. <u>https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002030</u>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.К. Сухонос, проректор з наукової роботи Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

#### Автор: НАБОКА Анатолій Віталійович

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова E-mail – <u>anatoliinaboka@ukr.net</u> ID ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0002-4462-7927</u>

## Автор: ФІРСОВ Павло Михайлович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова E-mail – <u>pavelfirsov1991@gmail.com</u> ID ORCID: <u>https://orcid.org/0000-0001-9119-3968</u>

# STUDY OF DEFORMABILITY OF THE LARGE-SPAN ROOF STRUCTURAL SYSTEM IN THE FORM OF AN ASYMMETRICAL SHELL

A. Naboka, P. Firsov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The scientific article is devoted to a complex study of deformability of saddle-type shell of negative Gaussian curvature of a public object that has been in operation for a long time for further general restoration of the building's roofing system. The authors have developed a specific algorithm for conducting experimental research, providing additional static load on a shell at the lower point of the gentle axial line of the supporting arches. To smoothly carry out the loading procedure, we mounted containers in barrel form on the roof surface and gradually filled them with water. We carried out an experimental evaluation of the bearing capacity of the shell with the determination of the redistribution of forces along the length of the section in the lower zone of the conventionally outlined arch. The experimental test results revealed that the deformability of the shell surface under short-term loading did not exceed 2.0 mm, and, under long-term loading, it was no more than 4.0 mm. Analysis of the qualitative features of structure deformation shows that the displacement of the roof's points, located symmetrically to the vertical axis, has the opposite sign to the sign of the displacement of the actual 'saddle' point (the case of symmetrical deformation). We conducted a numerical verification of the behaviour of the investigated structure by forming a detailed finite element spatial model of the shell. Comparison of the results of numerical calculation with the results of field tests shows the coincidence of qualitative and quantitative parameters, which, in turn, characterises the developed theoretical model as fully adequate and suitable for analysing the stress-strain state of similar largespan structural systems. Based on the results of comprehensive theoretical and experimental research, we made proposals for the further restoration of the roofing structure with the limitation of the self-weight of the covering to 1 kN/m<sup>2</sup>. Engineers and scientists can use the research results to reconstruct similar authentic structural systems.

Keywords: calculation, restoration, loading, deflection, shell, negative Gaussian curvature.

Стаття присвячується світлій пам'яті доктора технічних наук, професора Шмуклера Валерія Самуїловича!