

УДК 624.074.43

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
КОНСТРУКТИВНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО ЗАПОБІГАННЯ ПРОГРЕСУЮЧОМУ
ОБВАЛЕННЮ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ**

Кандидати техн. наук С. С. Гребенчук, П. А. Резнік, Л. В. Гапонова, асп. Р. В. Коренєв

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL TESTING OF THE EFFECTIVENESS OF
CONSTRUCTIVE MEASURES TO PREVENT THE PROGRESSIVE COLLAPSE OF THE
SPECIAL TYPE METAL SHELLS**

PhD (Tech.) S. S. Hrebenchuk, PhD (Tech.) P. A. Reznik, PhD (Tech.) L. V. Gaponova,
postgraduate student R. V. Koreniev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.185.2019.180824>

В статті розглянуто металеві оболонки спеціального виду, основним конструктивним елементом яких є тонколистовий холоднодеформований арковий металевий профіль. Проаналізовано аномалії та колапси, що виникають в ході експлуатації зазначених конструкцій, та розглянуто алгоритми оцінки НДС та методи попередження прогресуючого обвалення.

Мета дослідження полягала в оцінці впливу запропонованої конструктивної модернізації (методу попередження настання прогресуючого обвалення) на деформаційні властивості металевої оболонки спеціального виду за допомогою проведення двостадійного натурного експерименту.

Ключові слова: оболонкові системи, холоднодеформовані тонкостінні профілі, прогресуюче обвалення, стійкість.

The article considers frameless structures in the form of special type metal shells. The main structural element of these special shells is arched thin-walled cold-deformed profiles. The construction of structural elements takes place directly at the construction site. The main anomalies of the exploitation of the specified structures are considered. The main of these anomalies of exploitation is a certain number of accidents and collapses, which, after detailed analysis, can be classified as progressive or “avalanche-like” collapse. The computational algorithms for estimating the stress-strain state and preventing measures the onset of a progressive collapse of special type metal shells are considered. As the preventing measure was described constructive modernization of the original junction of arched structural elements. The aim of the research was to assess the impact of the proposed constructive modernization on the deformation properties of special type metal shell during a two-stage full-scale experiment. The block under research was close to a square, in the plan, cylindrical composite coating shell. Block dimensions: span between side elements 22m., Block length 15.6m., Lifting arm 8.37m., Radius of the cylindrical shell 11.585m. The thickness of the steel element was 1.2 mm.

A comparative finite-element analysis of the stress-strain state of the original models of special type metal shell, models of the discrete-continuum ribbed shell (with the implementation of constructive modernization of the joint) was also carried out. The results of the analysis are presented in the form of comparative graphs of displacements of tracked points from loading. The results obtained testify to the effectiveness of the proposed constructive modernization of metal shells of a special type, as measures preventing the onset of progressive collapse of these shell systems.

Keywords: special-type steel shell, arched thin-walled profiles, progressive collapse, buckling.

Вступ. Актуальність проблеми. В основі покриттів, що розглядаються, використовуються аркові конструктивні елементи, які об'єднуються один з одним вальцьовим з'єднанням у складену ребристу циліндричну оболонку відкритого типу (рис. 1). Виготовлення конструктивних

елементів відбувається безпосередньо на будівельному майданчику, крім того, мобільність обладнання (пересувні стани) і транспортна компактність вихідного матеріалу конструкції (рулонної сталі) дозволяють споруджувати об'єкти різного призначення в найкоротші терміни.



Рис. 1. Металева оболонка спеціального виду

Незважаючи на частоту використання, напружено-деформований стан і стійкість означених покриттів спеціального типу залишаються маловивченими. Суттєвий

науковий інтерес викликають й аномалії та колапси (рис. 2), що трапляються протягом експлуатації зазначеного виду металевих спеціальних оболонок.

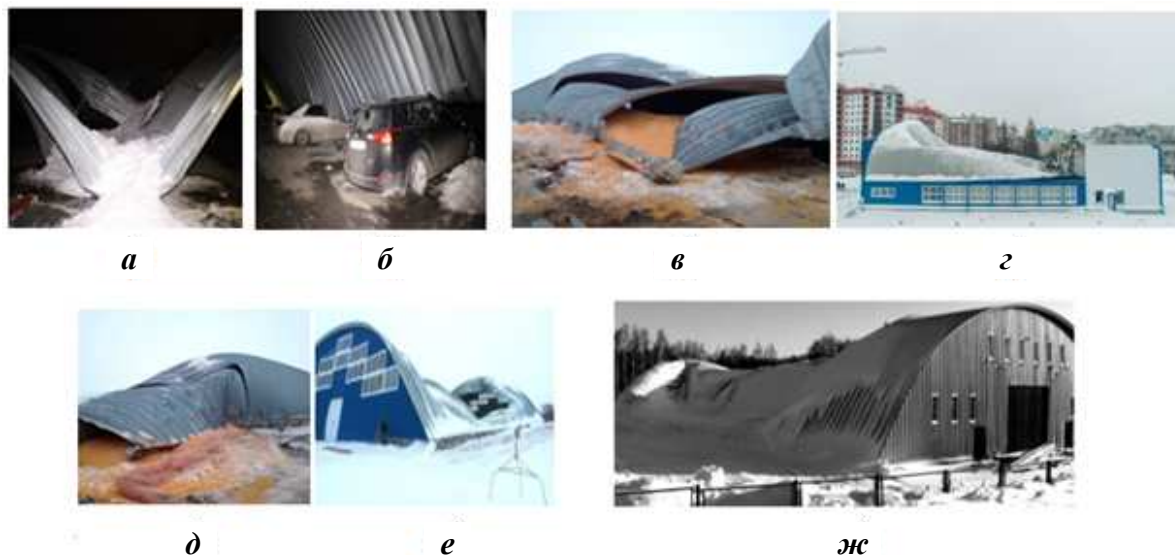


Рис. 2. Аномалії експлуатації металевих оболонок спеціального виду: а, б – обвалення конструкцій паркінгу, Білорусь, 2017 р.; в – обвалення зерносховища, Україна, 2017 р.; г – обвалення покриття спортивної зали, Україна, 2018 р.; д – обвалення зерносховища, Україна, 2018 р.; е – обвалення конструкцій льодової арени, Росія; ж – обвалення фрагмента складського приміщення, Білорусь

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Означені конструкції розглядаються в роботах Зверева В. В. [1], Жидкова К. Є. [2], де розглядаються аркові конструкції на основі об'ємно-формованого прокату. У розрахунку конструкцій, у яких профілі мають гофровані межі, поширення набув метод, заснований на заміні таких граней анізотропними пластинками аналогічної товщини, характеристики жорсткості яких знаходять з умови рівності лінійних переміщень гофрованої і плоскої анізотропної пластинок, вздовж відповідних координатних осей. Цей простий, проте ефективний інженерний метод був запропонований в роботах Андрєєвої Л. Є. [3, 4], де розглядаються три типи гофр: трапецієподібний, пільчатий і синусоїдальний. В роботі [5] виконано оцінку впливу віртуальних недосконало-стей на напружено-деформований стан розглянутих аркових покриттів. Стаття [6] присвячена визначенню особливості роботи поперечних перерізів холоднодеформованих трапецієподібних аркових профілів системи типу «МІС» у складі оболонки покриття. В роботі [7] розглянуто

доповнені алгоритми розрахунку аркових покриттів спеціального типу.

У статтях [8], [9] наведена інформація про складнощі експлуатації, певну кількість аварій та їх ймовірні причини для оболонкових систем, що розглядаються.

До найбільш частих причин обвалень, що фігурують у експертних висновках, стосовно аварії належать :

- помилки проектів;
- технологічні дефекти;
- порушення правил експлуатації.

На рис. 3 зображена покадрова фіксація з відеокамер спостереження процесу обвалення металевої оболонкової споруди. Як видно з хронометражу, обвалення починається на 26-й хв, а вже через 9 с споруда зруйнована. Обвалення починається з середини (за довжиною споруди) та шириться до торцевих діафрагм, інакше кажучи, відбувається втрата стійкості означених циліндричних ребристих оболонок. З аналізу характеру та швидкості обвалення видно, що відбувається так зване «прогресуюче», або «лавиноподібне» обвалення, інакше кажучи, відбувається втрата стійкості означених циліндричних ребристих оболонок.



Рис. 3. Споруда довжиною 60 м зруйнувалася менш ніж за 10 с

Удосконалений алгоритм аналізу напружено-деформованого стану зазначених конструкцій, що відображає можливість прогресуючого обвалення, розглядається в статті, яка зараз знаходиться у друці, під назвою «Progressive collapse of the special-type arch systems: modeling algorithm», авторів P. Reznik, L. Gaponova, S. Grebenchuk, R. Koreniev. Особливість зазначеного підходу полягає у

відображенні конструкційної нелінійності металевих оболонок спеціального виду та використанні потенційної енергії деформації як критерію вичерпання несучої здатності, згідно з підходами, зазначеними у роботі [10], та з імплементацією інформатичних технологій та підходів, зазначених в [11]. Алгоритм у загальному вигляді проілюстровано на блок-схемі рис. 4.

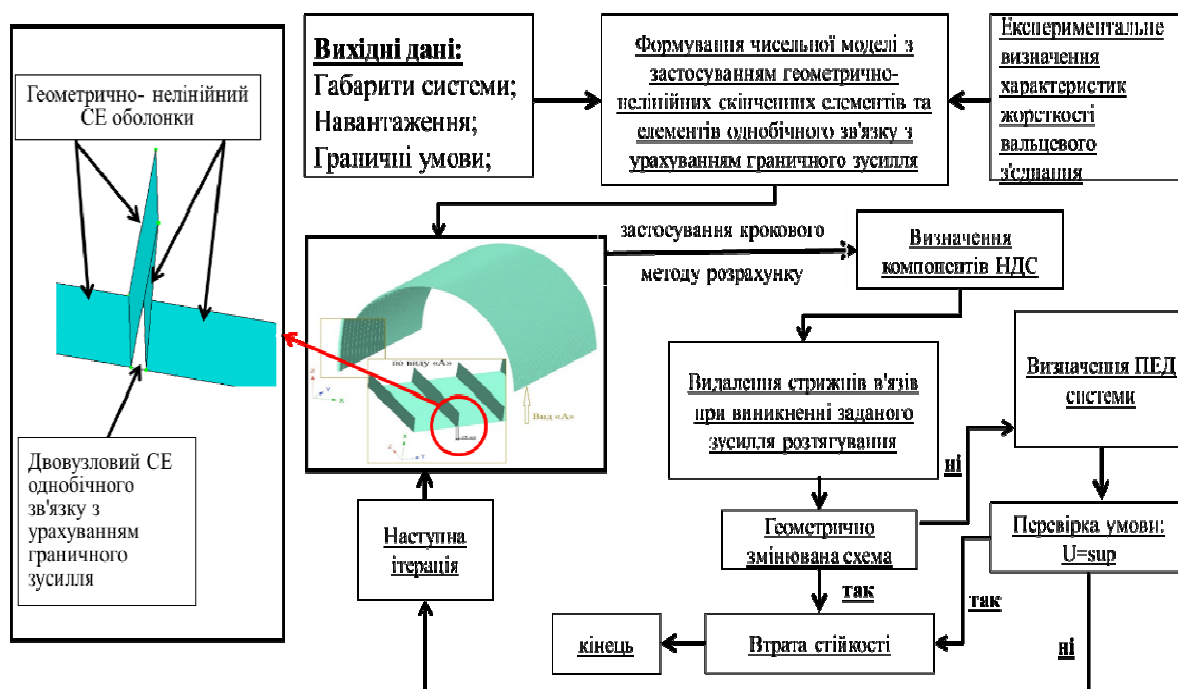


Рис. 4. Блок-схема алгоритму обчислення НДС системи з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення

У статті «Research a prevention of progressive collapse of the special type steel shells» авторів Reznik Petro, Grebenchuk Sergiy, Koreniev Roman, Bondarenko Vitaliy, що зараз знаходиться у друці у збірник наукових праць "Серія: галузеве машинобудування, будівництво", як метод попередження прогресуючого обвалення запропонована конструктивна модернізація (рис. 5), що дозволяє забезпечити спільність деформацій аркових конструктивних елементів і трансформувати напружено-деформований стан складеної металевої оболонки спеціального типу в

напружено-деформований стан, близький до суцільної ребристої оболонки, отримавши тим самим дискретно-континуальну ребристу оболонку.

З проведеного огляду відомих натурних випробувань оболонкових конструкцій, що розглядаються [12, 13, 14, 15, 16, 17], стало відомо, що випробовувалися або поодинокі аркові профілі, або зразки, що є повнорозмірними, але все ж фрагментами, габарити яких далекі від загальноприйнятих в теорії оболонок співвідношень розмірів.

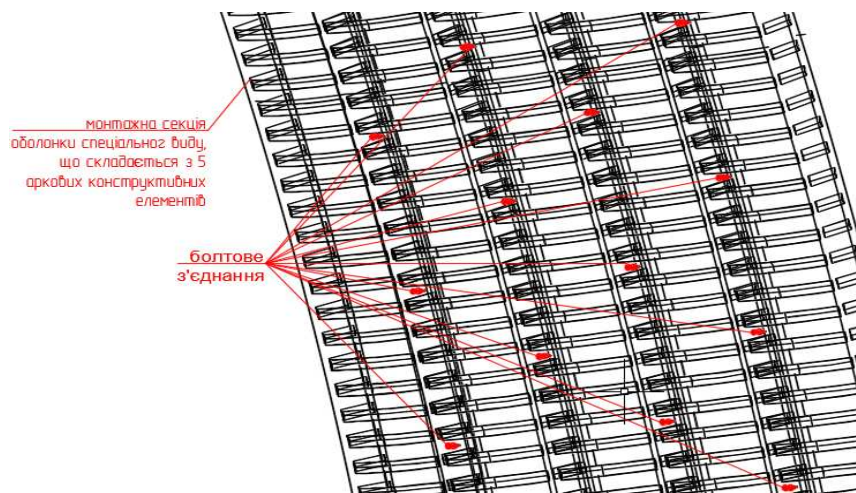


Рис. 5. Запропонована конструктивна реалізація облаштування болтового з'єднання

Було прийнято рішення проводити випробування на блоці оболонки спеціального виду (рис. 6), відокремленого від решти покриття діафрагмою жорсткості, виконаною у вигляді аркової ферми і що також має торцеву суцільну діафрагму з штучних матеріалів (газобетонні блоки).

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження була оцінка впливу запропонованої конструктивної модернізації на деформаційні властивості металеві оболонки спеціального виду.

Основні завдання дослідження:

- проведення двостадійного (до та після конструктивної модернізації) натурального експерименту та встановлення характеру деформування при дії зосереджених

навантажень на металеву оболонку спеціального виду;

- побудова скінченноелементних моделей (за раніше наведеними принципами) задля дослідження напружено-деформованого стану металеві оболонки спеціального типу «до» і «після» проведення конструктивної модернізації та оцінки її ефективності.

Основна частина дослідження.

Досліджуваний блок є близькою до квадратної, в плані, циліндричною складовою оболонки покриття, і має такі лінійні розміри: проліт між бортовими елементами 22 м, довжина блоку 15.55 м, стріла підйому 8.37 м, радіус циліндричної оболонки 11.585 м. Товщина сталі основного конструктивного аркового елемента склала 1.2 мм (рис. 7).



Рис. 6. Натурні фото досліджуваного блоку металеві оболонки спеціального типу

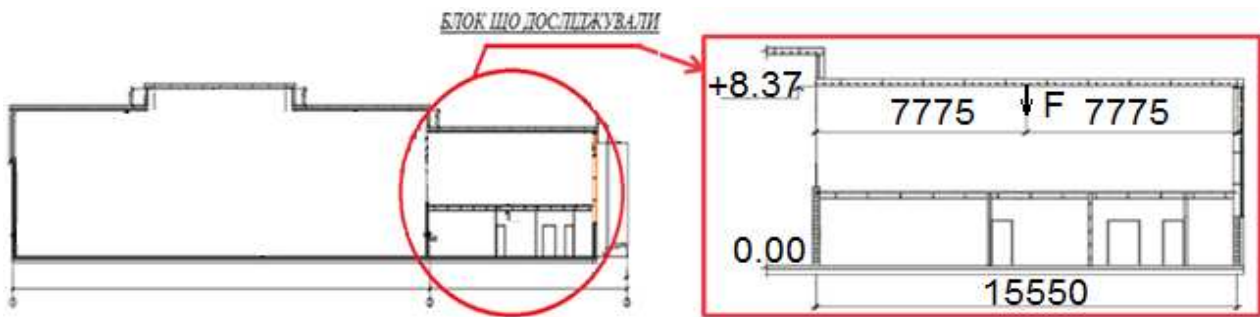


Рис. 7. Габарити досліджуваного блоку металевої оболонки спеціального типу

Базуючись на проведених раніше дослідженнях і покладених принципах конструювання, що водночас є способом запобігання прогресуючому обваленню розглянутих конструкцій, дослідження проводили в два етапи, з урахуванням послідовності зведення конструкції покриття, тобто до модернізації з'єднання

конструктивних елементів між собою і після проведення такої.

Навантаження прикладали згідно з системою навантаження (рис. 8, а). Інтервал між ітераціями навантаження становив 1 хв. Після чого, згідно з системою вимірювання, фіксували показання вимірювальних приладів.

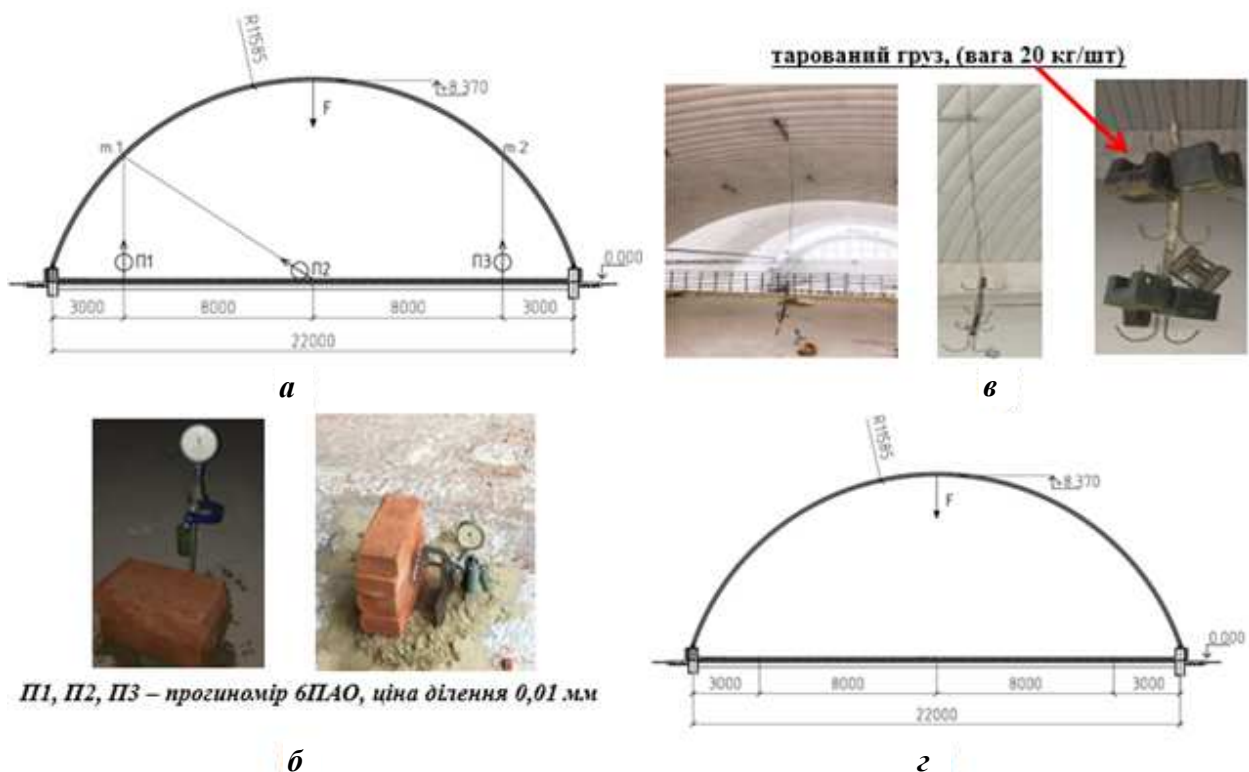


Рис. 8. Системи навантаження та вимірювання:

- а – схема системи вимірювання; б – прилади системи вимірювання;
- в – обладнання системи вимірювання; г – схема системи навантаження

Максимально прикладене навантаження складо 200 кг. Під дією

максимального навантаження (200 кг) конструкція перебувала 10 хв. Далі, також

поетапно по 20 кг, проходило розвантаження досліджуваної конструкції покриття. Після завершення розвантаження також витримувався часовий інтервал 10 хв і проводилася фіксація показань вимірювальних приладів, без чинного навантаження, для зіставлення початкових показань і отриманих даних про залишкові деформації. Послідовність проведення експерименту, а також система навантаження і вимірювання для двох етапів (до і після проведення модернізації) даного експериментального дослідження не змінювалися. Також слід зазначити, що при проведенні першого етапу експерименту температура навколишнього повітря становила 26-28⁰С при відносній вологості 62 %, а при проведенні другого етапу експериментальних досліджень, температура – 17-21 ⁰С, відносна вологість – 56 %.

Дані про переміщення зазначених контрольних точок для першого та другого етапів дослідження (до та після проведення конструктивної модернізації) подано у вигляді графіків на рис. 9–10 відповідно.

Згідно з отриманими даними, видно, що на кожному з етапів експерименту точки, що відстежувались: «т.1» та «т.2», мають майже однакові значення вертикальних переміщень, що свідчить про симетричність деформацій конструкції від прикладеного навантаження, характерну для оболонкових конструкцій.

Для зіставлення експериментальних результатів з теоретичними, за згаданим раніше алгоритмом (рис. 4), у середовищі програмного комплексу «Ліра САПР» були побудовані дві розрахункові скінченно-елементні моделі (рис. 11) блоку споруди, що досліджується.

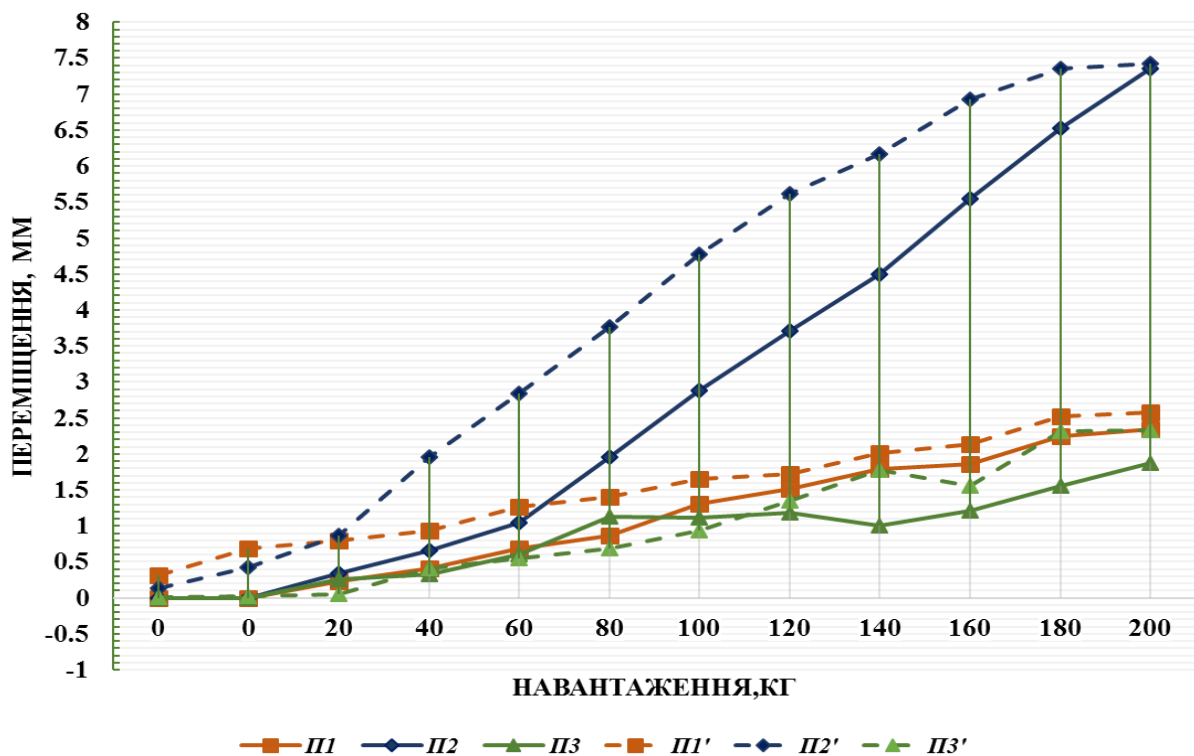


Рис. 9. Графік залежності переміщень (І етап експерименту, до модернізації) контрольних точок від навантаження (розвантаження), де П1, П2, П3 – переміщення контрольних точок; П1`, П2`, П3` – переміщення контрольних точок при знятті навантаження

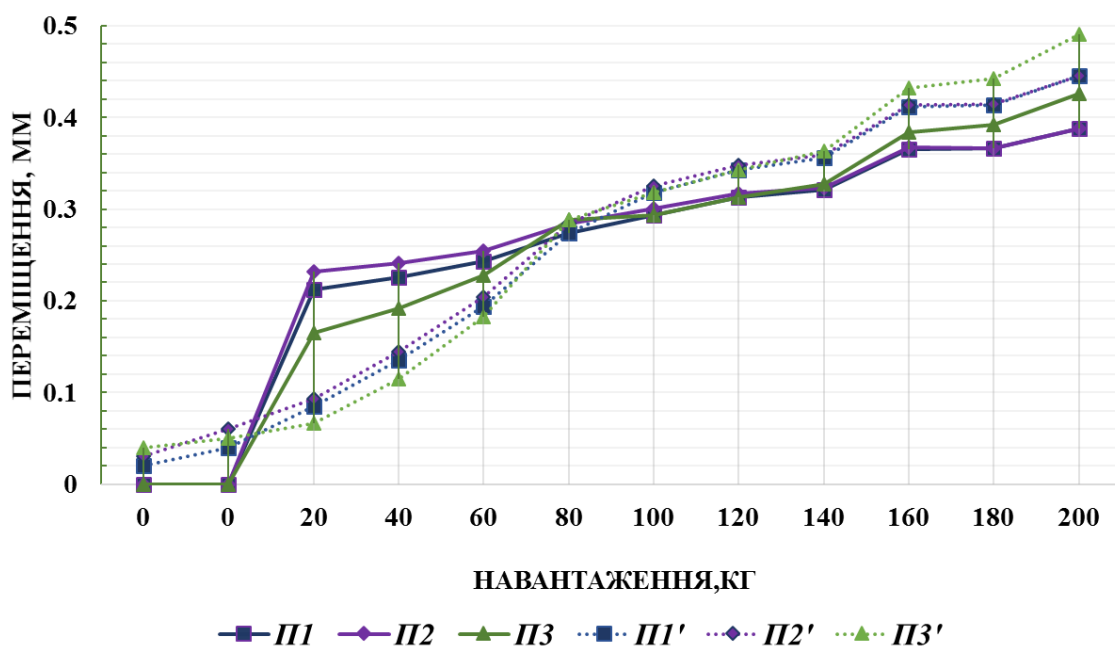


Рис. 10. Графік залежності переміщень контрольних точок (II етап експерименту, після модернізації) від навантаження (розвантаження), де P1, P2, P3 – переміщення контрольних точок; P1', P2', P3' – переміщення контрольних точок при знятті навантаження

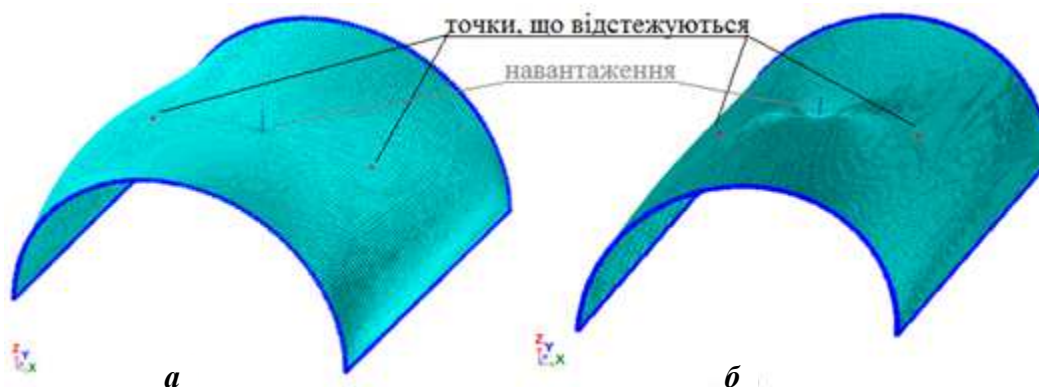


Рис. 11. SE моделі блоку спеціальної оболонки (деформована схема, при дії навантаження 200 кг): а – до модернізації; б – після модернізації

Слід зазначити, що для зменшення розмірності моделей конструкція діафрагм жорсткості досліджуваної конструкції не моделювалася, а в місцях сполучення оболонки з діафрагмою заборонені лінійні переміщення вузлів у площині діафрагми, тобто по осях «X», «Z», у використуваній глобальній системі координат. При моделюванні оригінальної оболонки спеціаль-

ного виду використовувалися SE 341 – геометрично-нелінійний універсальний прямокутний кінцевий елемент оболонки, а також SE 252 – двовузловий скінченний елемент однобічного зв'язку. Кожна з моделей складалася з 46354 елементів і 28193 вузлів.

У місцях сполучення оболонки з бортовим елементом моделювався

нерухомий шарнір, тобто були заборонені лінійні переміщення по осях «X», «Y», «Z», у використуваній глобальній системі координат. Всі лінійні розміри ідентичні натурній конструкції.

Граничні умови моделей ідентичні. Істотною відмінністю моделей є використання в одній з моделей СЕ 10

просторового стрижня для моделювання конструктивної модернізації (болтового з'єднання) замість стрижня одностороннього зв'язку СЕ 252.

Порівняльний аналіз відмінності теоретичних переміщень від фактичних подано у вигляді графіків на рис. 12–13 для кожного з обумовлених етапів дослідження.

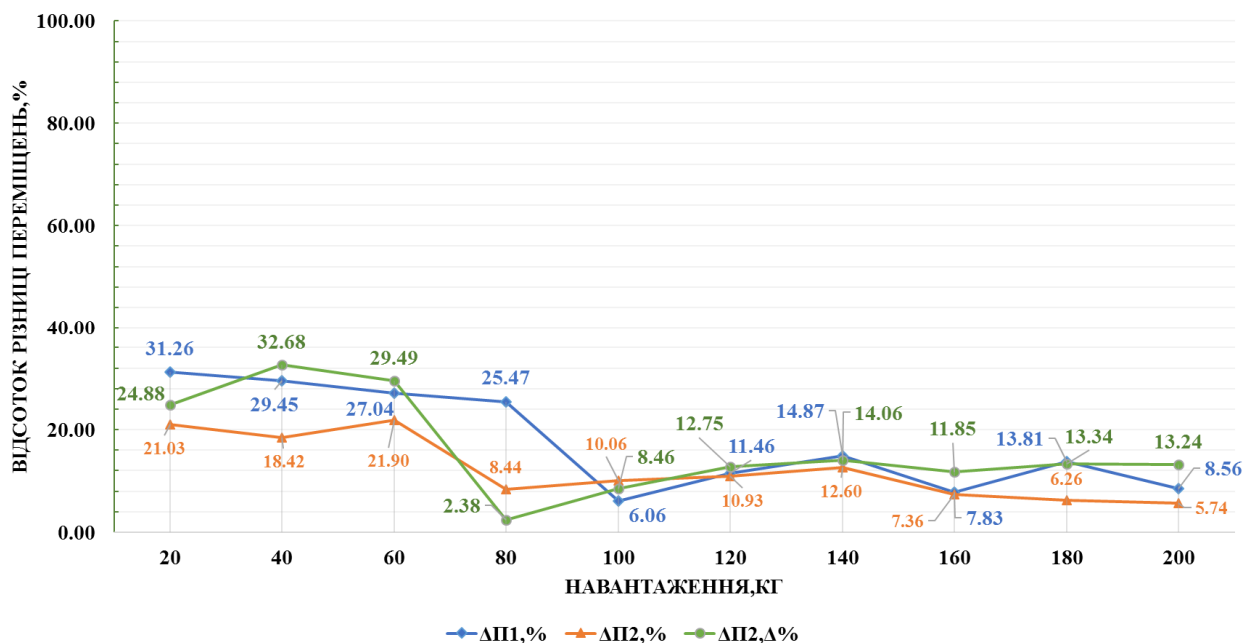


Рис. 12. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних відносно теоретичних): I етап дослідження (до проведення модернізації)

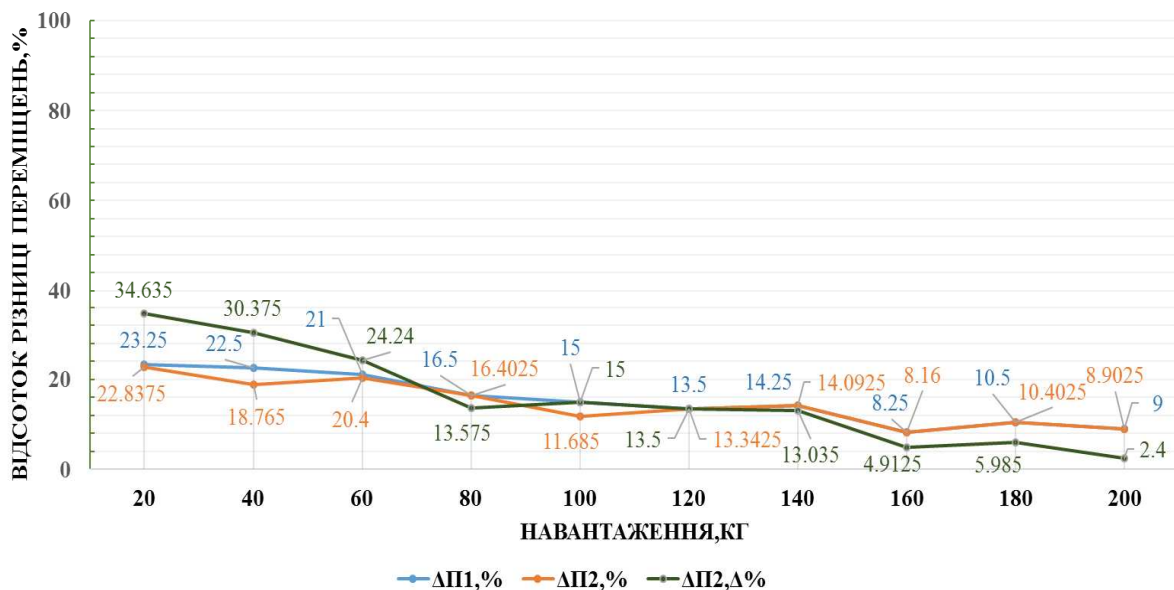


Рис. 13. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних відносно теоретичних): II етап дослідження (після модернізації з'єднання)

Висновки. Аналізуючи отримані результати, слід зазначити, що перевищення 15 %-го порогу відмінності теоретичних прогинів від експериментальних, на початкових стадіях завантаження, спричинене недостатньою чутливістю приладів та похибками системи вимірювання через суттєву відстань від прогиномірів до контрольованих точок.

У свою чергу якісний збіг більшості отриманих результатів доводить адекватність розрахункової моделі і

коректність покладених принципів і дає право вважати верифікацію успішною.

Зіставлення даних про переміщення точок, що відстежуються, на різних стадіях проведеного експерименту (до і після модернізації), наведено у вигляді графіка на рис. 14.

Отримані результати в повній мірі демонструють позитивні характеристики проведеної конструктивної модернізації. Спостерігається значне зниження переміщень в середньому на ~71 %, що наочно свідчить про покращення характеристик жорсткості досліджуваної системи.

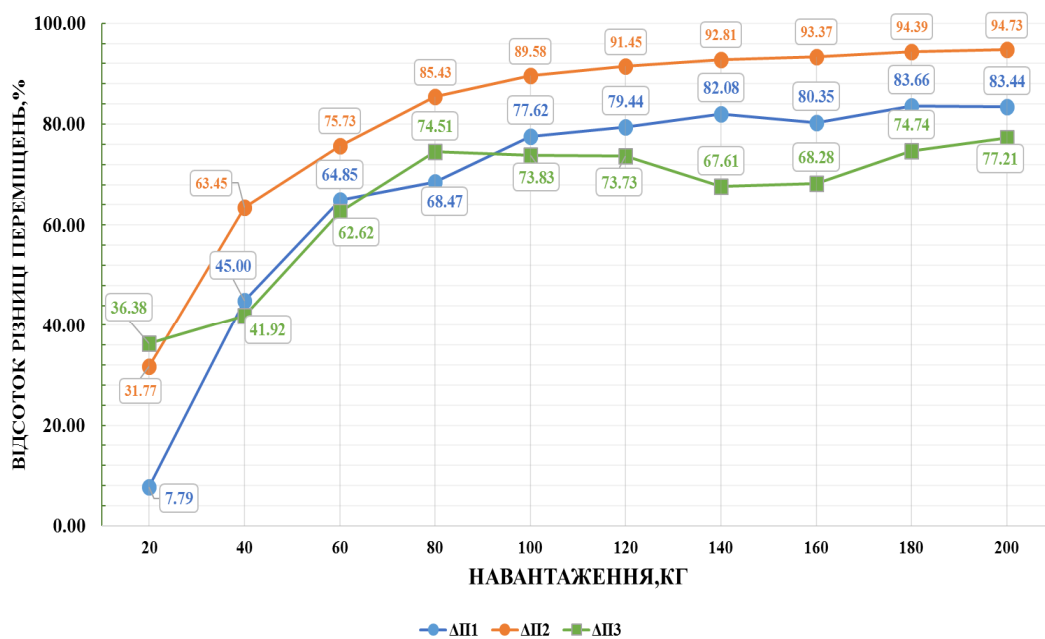


Рис. 14. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних): I та II етапів дослідження (відносно I етапу)

Список використаних джерел

- Зверев В. В. Эффективные строительные металлоконструкции на основе объемно-формованного тонколистового проката: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01. Липецк, 2000. 396 с.
- Жидков К. Е. Разработка и исследование арочных конструкций с листовой пространственной решеткой: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Липецк, 1999. 173 с.
- Андреева Л. Е. Расчет гофрированных мембран, как анизотропных пластинок. АН СССР, отделение технических наук, институт механики: Инженерный сборник. 1955. Т. XXI. С. 128–141.
- Андреева Л. Е. Расчет характеристик гофрированных мембран. *Приборостроение*. 1956. № 3. С. 11–17.
- Коренев Р. В. Вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем. *Комунальне господарство міст*: наук.-техн. зб. 2018. № 140. С. 109–119.

6. Білик А. С., Лапонов М. В. Визначення геометричних характеристик холодноформованих тонкостінних аркових профілів: *зб. наук. праць. Український ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського*. 2012. № 9. С 193–203.
7. Бабаєв В. М., Бугаєвський С. О., Євель С. М., Євзеров І. Д., Лантух-Лященко А. І., Шеветовський В. В., Шимановський О. В., Шмуклер В. С. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем. Київ: Видавництво «Сталь», 2017. 404 с.
8. Кузнецов І. Л., Исаев А. В., Гимранов Л. Р. Причины обрушения бескаркасного арочного сооружения пролетом 30 м. *Известия КГАСУ: Ежемесячный науч.-техн. журн.* 2011. № 4. С. 166–171.
9. Арменский М. Ю., Ведяков И. И., Еремеев П. Г. Эффективные хранилища из легких арочных металлических конструкций. *Пром. и гражданское стр-во: Ежемесячный науч.-техн. и произв. журн.* 2007. № 3. С. 16–18.
10. Шмуклер В. С., Климов Ю. А., Буряк Н. П. Каркасные системы облегченного типа. Харьков: Золотые страницы, 2008. 336 с.
11. Kalmykov O. A., Gaponova L. V., Reznik P. A., Grebenchuk, S. S. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells. *6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" MATEC Web Conf. Volume 116. 2017 (Transbud-2017) 10 July 2017.* DOI: 10.1051/mateconf/201711602017.
12. Айрумян Э. Л., Румянцева И. А. Прочность и надежность бескаркасных арочных зданий из стальных холодногнутых профилей. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1998. № 7-8. С. 12–14.
13. Айрумян Э. Л., Федорова Н. А. Сборно-разборное инвентарное здание из гофрированных стальных листов. *Монтажные и специальные работы в строительстве*. 1990. № 8. С. 13–15.
14. Айрумян Э. Л., Емелин Е. И., Барсков Д. П. Устойчивость оболочек из гофрированных стальных профилей. *Промышленное строительство*. 1990. № 10. С. 18–19.
15. Каспэ И. Б., Тарасов А. М., Голенкин В. В., Айрумян Э. Л., Федорова Н. А., Линник С. Д. Волна-360: быстромонтируемое многоцелевое здание. *Транспортное строительство*. 1990. № 11. С. 37–39.
16. Марцинкевич Д. В. Исследования прочности, жесткости и местной устойчивости вальцованных профилированных листов с поперечно-рифленными гранями: дисс... канд. техн. наук: 05.23.01. Екатеринбург, 1995. 194 с.
17. Популлова Г. Ю. Исследование работы длинных цилиндрических оболочек из стальных вальцованных профилированных листов: дисс.... канд. техн. наук: 05.23.01. Екатеринбург, 1999. 188 с.

Гребенчук Сергій Сергійович, канд. техн. наук, директор ТОВ «БУДІВЕЛЬНИК».

Резнік Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старший викладач Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua. Тел. +38(050)615-86-38.

Гапонова Людмила Вікторівна, канд. техн. наук, доцент Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова.

Коренев Роман Валерійович, аспірант Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. E-mail: r.v.korr@gmail.com. Тел.: +38(098)358-99-07.

Hrebenchuk Sergiy, PhD, director LLC "STROITEL".

Reznik Petro, PhD (Tech.), Senior Lecturer, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. +38(050)615-86-38. E-mail: Petro.Reznik@kname.edu.ua.

Gaponova Ludmila, PhD (Tech.), Associate Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Koreniev Roman, Postgraduate Student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. +38(098)358-99-07. E-mail: r.v.korr@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2019 р.