

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

КОРЕНЄВ РОМАН ВАЛЕРІЙОВИЧ



УДК: 624.074.43

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО
ОБВАЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

кандидат технічних наук

Резнік Петро Аркадійович

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Міністерства освіти і науки України, ст. викл. кафедри будівельних конструкцій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,

член-кореспондент НАН України,

заслужений діяч науки і техніки України,

Шимановський Олександр Віталійович

ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», генеральний директор

кандидат технічних наук, доцент,

Романюк Володимир Володимирович

Національний університет водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України, професор кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд

Захист дисертації відбудеться «12» листопада 2020 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7 та на сайті <http://kart.edu.ua>.

Автореферат розісланий «09» жовтня 2020 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Суттєвий інтерес до металевих оболонки спеціального виду обумовлений їх низькою вартістю, можливістю швидкого зведення і виготовлення основних аркових конструктивних елементів в умовах будівельного майданчика, а також можливістю їх застосування у різних архітектурно-планувальних рішеннях промислового і цивільного будівництва.

Незважаючи на велику кількість вже зведених об'єктів та таких, що знаходяться в процесі будівництва, в діючих нормативних документах України чіткі рекомендації для розрахунку подібного виду металевих оболонки відсутні. Нормативна база з проектування розглянутих безкаркасних покриттів відсутня також і за кордоном, в нормах країн Європи та Північної Америки є методики розрахунку традиційних конструкцій з тонкостінних холодногнутих профілів, але на безкаркасні аркові конструкції вони не поширюються. Враховуючи зазначене вище, в повній мірі застосовувати зарубіжні стандарти для розрахунку безкаркасних аркових покриттів із сталевих тонкостінних холодногнутих профілів з поперечно-гофрованими гранями не є можливим. Науковий інтерес викликає напружено-деформований стан зазначених конструкцій та формування нормативних рекомендацій щодо їх розрахунку.

Також, зважаючи на використання зазначених конструкцій в сфері цивільного будівництва, варто відзначити характерну високу ступінь соціальної значущості і відповідальності при їх експлуатації, що пов'язана з можливим масовим скупченням людей при проведенні тих чи інших суспільних заходів. Тож актуальним є й питання прогресуючого обвалення і, відповідно, заходів та методів його запобігання.

Перераховане, в сукупності з даними про аномалії та аварійні ситуації протягом експлуатації зазначених конструкцій, підтверджує актуальність і свідчить про доцільність подальших досліджень в означеному напрямку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках тематики кафедри будівельних конструкцій ХНУГХ імені О.М. Бекетова за 2014–2019 рр.: «Нові ефективні конструктивні системи з раціональними параметрами» - № ДР 0114U002999; «Сталобетонні конструкції з раціональними параметрами» - № ДР 0117U000662; та є частиною досліджень наукової школи ХНУМГ імені О.М. Бекетова «Конструкції і матеріали для житлових і громадських будівель».

Мета роботи полягає в розробці принципів якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонки спеціального виду.

Наукова гіпотеза – удосконалення конструкцій сучасних металевих оболонкових покриттів спеціального виду, шляхом надання необхідного ресурсу при сприйнятті нормальних і аномальних впливів.

Завдання дослідження:

- провести послідовний аналіз напружено-деформованого стану та стійкості металевих оболонки спеціального виду, з імплементацією різних підходів моделювання;
- розробити алгоритм моделювання оболонки спеціального виду, з відображенням конструкційної нелінійності та впровадженням нового енергетичного підходу до оцінки можливості настання прогресуючого обвалення;

- побудувати й верифікувати скінченно-елементні моделі оболонок спеціального виду, з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення, імплементуючи розроблений алгоритм;
- розробити конструктивні заходи, що попереджують настання прогресуючого обвалення й верифікувати запропоновану конструктивну модернізацію повнорозмірним натурним експериментом.

Об'єкт дослідження – особливості деформування металевих оболонок спеціального виду.

Предмет дослідження – флуктуації деформування конструкцій що досліджуються, які можуть привести до прогресуючого обвалення.

Методи дослідження. В роботі використані аналітичні та чисельні методи механіки деформованого твердого тіла, зокрема, метод скінченних елементів. Побудову конструктивних рішень реалізовано на основі експлуатації алгоритмів, що реалізують управління якісними і кількісними характеристиками НДС, що мають конструкції. Експериментальне дослідження існуючих і запропонованого конструктивного рішення металевих оболонок спеціального виду проводилося на лабораторних і натурних зразках з використанням елементів автоматизованої системи наукових досліджень, що базується на сучасному технічному і інформаційному забезпеченні.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- розроблено підхід формування розрахункової моделі оболонок спеціального виду з урахуванням конструкційної нелінійності і з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення;
- реалізована імплементация нового енергетичного підходу для якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення зазначених конструктивних систем;
- отримано нові результати експериментальних натурних досліджень деформативності металевих оболонок спеціального виду.

Набуло подальшого розвитку:

- скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану оболонок спеціального виду й встановлення особливостей їх деформування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

- запропонованні способу конструктивної модернізації покриття спеціального виду, у вигляді болтового з'єднання, що забезпечує стійкість до прогресуючого обвалення;
- розробці алгоритму оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду;
- впровадженні їх (результатів) в проектний і виробничий цикл підприємства ТОВ «СТРОЙ ІНЖІНІРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ» при розробці стандартних фізкультурно-оздоровчих комплексів у Харківській області.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Окремі складові теоретичних та експериментальних досліджень виконані в співавторстві, що відзначено в наведеному переліку наукових публікацій.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на III Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології в будівництві» в Київському національному університеті будівництва і архітектури (м Київ, 28 - 29 березень 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегія розвитку міст: молодь і майбутнє (інноваційний ліфт)» в Харківському національному університеті міського господарства імені О.М. Бекетова (м. Харків, 12.04 - 13.04.2018 р), на 83-й науково-технічній та науково-методичній конференції у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті (м. Харків 13-17 травня 2019 р), на міжнародній науково-практичній конференції «Ефективні технології і конструкції в будівництві та архітектура села. Розробка інноваційних моделей екопоселень Прикарпаття та Карпат» (м. Дубляни 15-17 травня 2019р); на XX міжнародному науково-практичному форумі «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій» (м. Львів 17-19 вересня 2019р).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 10 наукових працях, з яких 9 статей у наукових фахових виданнях, рекомендованих МОН України, в тому числі 3 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз; 1 стаття апробаційного характеру.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 198 сторінках і містить 118 - сторінок основного тексту, 25 - таблиць, 80 - рисунків, 153 - найменувань літератури, 6 додатків на 50 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, розкрито стан її розробленості, дана загальна характеристика дисертації, її основні положення, наукова новизна і практична цінність.

У **першому розділі** подано аналіз ретроспективи, поточного стану розвитку проектування та зведення металевих оболонки спеціального виду. Проаналізовано конструктивні рішення, принципові технологічні особливості виробництва та монтажу.

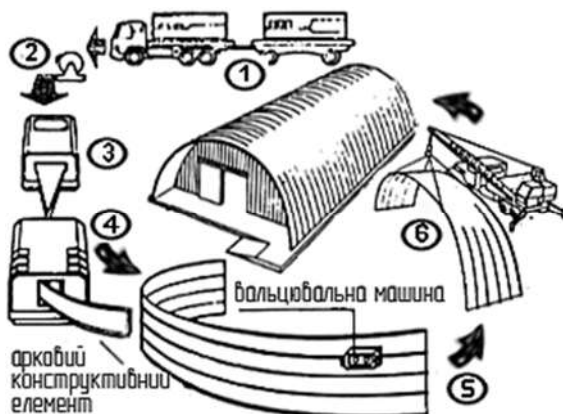


Рис. 1. Схема виготовлення і монтажу, вигляд оболонки спеціального виду

Відзначено основні технологічні етапи виробництва безкаркасних споруд:

- улаштування фундаменту та доставка устаткування;
- завантаження рулону листової сталі в формуючу машину;
- виготовлення профілів необхідних форми і розміру;
- вальцювання в секції по 3-5 аркових конструктивних елемента;
- встановлення секцій в проектне положення та їх з'єднання вальцювальною машиною;
- облаштування торцевих та проміжних діафрагм, гідроізоляція опорних вузлів.

Проведено огляд теоретичних та експериментальних досліджень конструкцій що розглядаються. Відзначено, що значний внесок у розвиток теорії і практики зведення оболонкок зробили вчені: Алумяе М.О., Амбарцумян С.О., Бондаренко В.М., Власов В.З., Войновський-Кригер Е.Б., Вольмір А.С., Вайнберг О.І., Доннелл Л.Г., Гольденвейзер О.Л., Муштарі Х.М., Рейснер Е., Тимошенко С.П., Шагін О.Л., Шмуклер В.С. та інші. Особливості роботи тонкостінних профілів розглядаються в дослідженнях: Айрум'яна Е.Л., Астахова І.В., Белого Г.І., Броуде Б.М., Вольміра А.С., Власова В.З., Єнджиевського Л.В., Куніна Ю.С., Романюка В.В., Тусніна А.Р., Тамплона Ф.Ф., Тимошенко С.П., Wei-Wen Yu, R.A. LaBoube, D. Dubina, V. Ungureanu, R. Landolfo, Karman T., Winter G. та інших. Суттєві особливості чисельного моделювання роботи безкаркасних покриттів розглядаються в дослідженнях: Жабінського О.Н., Старовойтова О.Ф., Арменського М.Ю., Кузнецова І.Л., Ісаєва А.В., Гімранова Л.Р., Липненко М.А., Steven Sweeney, Demetred Briassoulis та Anthony Kao.

Експериментальними дослідженнями безкаркасних споруд займалися: Атапін В.Г., Арменський М.Ю., Бурлай С.І., Єремєєв П.Г., Зверєв В.В., Скіба В.Ю., Копаниця Д.Г., Кисельов Д.Б., Мельохін Е.А., Веселєв Ю.А., Карабутов М.С., Красотіна Л.В., Макєєв С.О., P. Makelainen, J. Nyvarinen, Li-Li Wu, Xuan-Neng Gao, Yong-Jiu Shi и Yuan-Qing Wang.

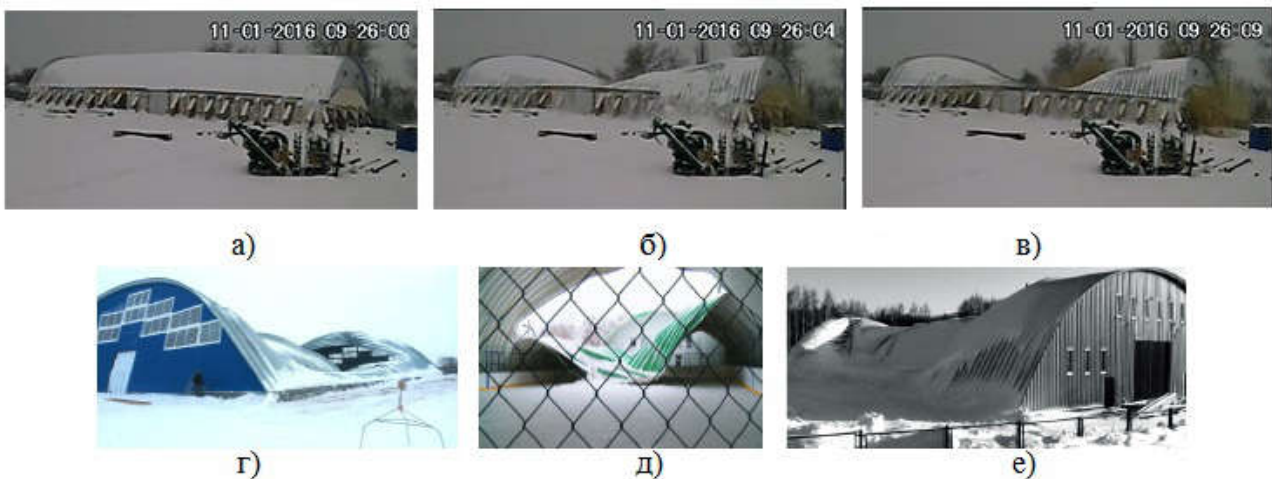


Рис. 2. Аномалії при експлуатації металевих оболонкок спеціального виду

Зазначено, що суттєвий науковий інтерес викликають аномалії та колапси що відбуваються при експлуатації оболонкок, які досліджуються. Так, з проведеного аналізу аварійних ситуацій і обвалень зазначених споруд, відзначено, що відбувається втрата стійкості оболонки, виходячи з характеру та швидкості обвалення, відбувається так зване «прогресуюче», або «лавиноподібне» обвалення (рис. 2: «а,

б, в» – покадрова фіксація обвалення споруди довжиною 60 метрів менш ніж за 10 секунд, Білорусь, 2016р; «г» – обвалення покриття спортивної зали, Україна, 2018р; «д» – обвалення конструкцій льодової ари, Росія; «е» – обвалення складського приміщення, Білорусь). В ході аналізу ряду існуючих будівель і об'єктів, що зводяться, в основі яких лежать розглянуті аркові системи, було встановлено, що на етапі виробництва і монтажу виникають різні недосконалості, накопичення яких може як наслідок сприяти зазначеному колапсу. Так, найбільш істотним з цих віртуальних недосконалостей є розкриття шва між конструктивними елементами системи, яке носить дискретний характер. Дана особливість проілюстрована на рис. 3.

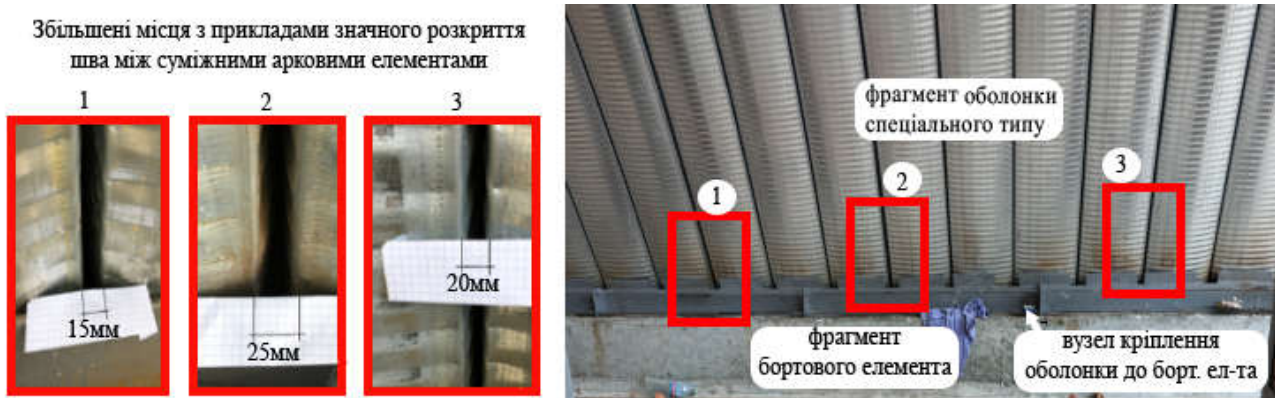


Рис. 3. Приклади розкриття шва між арковими конструктивними елементами

Розглянуто проблеми та особливості прогресуючого обвалення. Проблеми та особливості прогресуючого обвалення і надійності розглядаються в дослідженнях: Єремеева П.Г., Кашеварова Г.Г., Пепеляєва А.В., Кущенко В.Н., Тамразяна А.Г., Мкртичева О.В., Расторгуєва Б.С., Городецького О.С., Лантух-Лященко А.І., Пічугіна С.Ф., Перельмутера А.В., Фоміна С.Л., Шимановського О.В., Шкінева А.Н., Шмуклера В.С., Canisius T.D., Crawford J.E., Crowder B., Dusenberry D, Ellingwood B., Leyendecker E., Gross J., McGuire W., Stewart M.G., Melchers R.E., Taylor D.A. та інших.

Виконаний аналіз демонструє недостатність вивчення напружено-деформованого стану аркових систем, які є, по суті, складеними металевими оболонками, також дозволив визначити коло невирішених проблем як теоретичного, так і експериментального характеру. В цілому, існуючі дослідження розглядають або окремо взяті конструктивні елементи – аркові профілі (або їх частини), або фрагменти, що складаються з незначної кількості профілів, що, в цілому, не відображає просторову роботу зазначених конструкцій. Питання стійкості і прогресуючого (лавиноподібного) обвалення розглянутих конструкцій, виходячи з аналізу аварійних ситуацій, що виникають при експлуатації означених систем, є маловивченими. У зв'язку з чим, й сформульовані основні завдання цього дослідження.

У **другому розділі**, зважаючи на складність поперечного перерізу (технологічне гофрування) аркового профілю, та виходячи з необхідності верифікації підходу встановлення його геометричних характеристик, на базі лабораторії кафедри будівельних конструкцій ХНУМГ ім. О.М. Бекетова було проведено лабораторний експеримент. Схема та результати експерименту наведено на рис. 4.

Було визначено експериментальним шляхом згинальну жорсткість відносно горизонтальної осі фрагменту сталевого аркового профілю (за ТУ 527200-028-87168171-2012 - 305а), з товщиною сталі $t = 1.2$ мм.

Результати (рис. 4г) показали, що в зв'язку з проковзуванням опор, при збільшенні навантаження, значення моменту інерції падало. Проте, середнє значення моменту інерції було $I_x = 118.7$ см⁴, а значення моменту інерції, отримане для даного профілю з використанням програмного комплексу (ПК) «Ліра – 10.6» (Ліц. № 1/1096) $I_x = 113$ см⁴.

Похибка склала ~4.8%, що вважається задовільним. Отже інші геометричні характеристики визначалися за допомогою ПК «Ліра – 10.6».

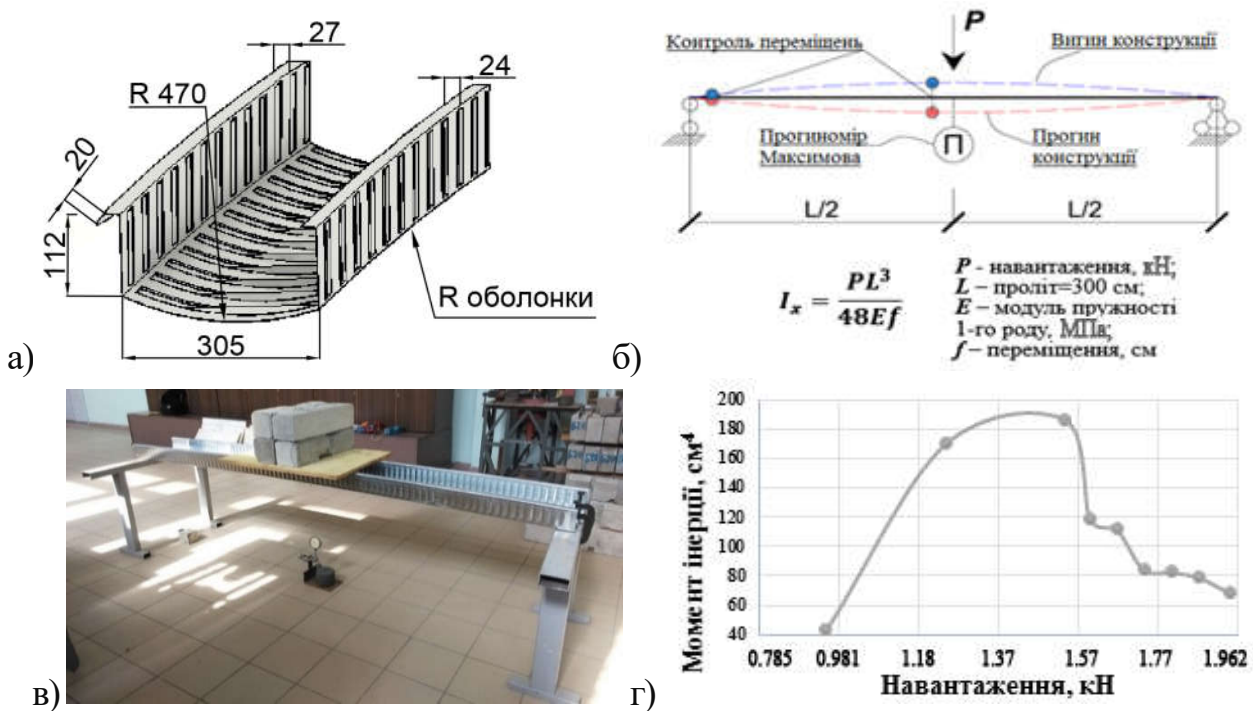


Рис. 4. Експериментальне уточнення геометричних характеристик: а) візуалізація фрагменту «U»-типу аркового профілю; б) схема експерименту; в) фотофіксація експерименту; г) зміна моменту інерції залежно від навантаження

Задля дослідження напружено-деформованого стану (НДС) металевих оболонок спеціального виду, розглянуто три типи розрахункових моделей (рис. 5).

Аналіз якісних та кількісних результатів було проведено в середовищі ПК «Ліра – 10.6». Модель плоскої арки (рис. 5, а) досліджували за рекомендаціями нормативно-технічної документації, з припущенням відсутності сумісної роботи аркових конструктивних елементів, враховуючи отримані фактичні геометричні характеристики профілів.

Було досліджено 3 типорозміри арок, при відстані між опорами $L = const = 22$ м, та враховуючи товщини профілю від 0,7 до 1,5 мм. (крок 0,1 мм), з радіусами і висотами:

- 1й тип: $R = 11$ м, $H = 11.27$ м; 50 СЕ, 51 вузол;
- 2й тип: $R = 11.135$ м, $H = 9.82$ м; 50 СЕ, 51 вузол;
- 3й тип: $R = 11.585$ м, $H = 8.37$ м 49 СЕ, 50 вузол.



Рис. 5. Досліджувані розрахункові моделі металевих оболонок спеціального виду

Беручи до уваги виконаний аналіз аварійних ситуацій і обвалень металевих оболонок спеціального виду, виникла необхідність доповнення існуючого експлуатованого алгоритму аналізом стійкості аркових конструктивних елементів. Для цього аналізували стійкість плоскої форми вигину і згинально-крутильну форму, тобто стійкість рівноваги плоскої форми вигину. Зважаючи на те, що аркова модель складається з конструктивного елемента який є в загальному вигляді тонкостінним криволінійним стержнем, скористалися формулою проф. Власова В. З., для визначення стійкості плоскої форми вигину. Стійкість плоскої форми вигину визначена за формулою (1):

$$M = RP_x \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{R^2} \frac{P_0}{P_x} + \frac{L^2}{\pi^2 R^2} - \frac{2\beta_x}{R} \right) \pm \sqrt{4 \left(\frac{r^2}{R^2} \frac{P_0}{P_x} + \frac{L^2}{\pi^2 R^2} - \frac{2\beta_x}{R} \right)^2 + \frac{r^2}{R^2} \left(1 - \frac{L^2}{\pi^2 R^2} \right) \frac{P_0}{P_x}} \right]; \quad (1)$$

$$r^2 = \frac{I_x + I_y}{A} + a_y^2; \quad (2)$$

$$P_x = \frac{\pi^2 EI_x}{L^2}; \quad (3)$$

$$P_0 = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\pi^2 EI_\omega}{L^2} + GI_d \right); \quad (4)$$

$$\beta_x = 0; \quad (5)$$

де: M – згинальний момент; R – радіус арки; L – прогін; E – модуль пружності першого роду; G – модуль пружності другого роду. Експериментально визначені: I_x, I_y – моменти інерції; A – площа перерізу; I_ω – секторіальний момент інерції; I_d – момент інерції при вільному крученні; a_y – відстань до центру згину; β_x – геометрична характеристика, що має лінійну розмірність.

Попри задовільну точність і теоретичну дієвість доповненої методики, яка рекомендована нормативно-технічною документацією, вона не здатна відобразити кілька суттєвих аспектів аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, що досліджуються.

А саме:

- просторову роботу зазначених конструктивних систем, які фактично є складовими оболонковими системами;

- вплив наявності або відсутності торцевих і проміжних діафрагм на напружено-деформований стан і стійкість досліджуваних конструкцій;
- урахування можливості прогресуючого обвалення.

Таблиця 1.

Результати розрахунку стійкості плоскої форми вигину

Товщина сталі конструктивного елемента	Критичні згинальні моменти M_1, M_2 (кН · м) для радіусів систем R (м)					
	$R = 11.0$		$R = 11.135$		$R = 11.585$	
	M_1	M_2	M_1	M_2	M_1	M_2
0.7мм	217.78	-7.73	215.82	-7.94	207.97	-8.63
0.8мм	227.59	-7.76	224.65	-7.98	216.80	-8.67
0.9мм	235.44	-7.79	232.48	-8.01	224.65	-8.71
1.0мм	242.31	-7.82	239.36	-8.04	230.54	-8.74
1.1мм	248.19	-7.84	245.25	-8.06	236.42	-8.76
1.2мм	254.08	-7.86	251.14	-8.08	242.31	-8.78
1.3мм	258.98	-7.88	256.04	-8.09	247.21	-8.80
1.4мм	263.89	-7.89	260.95	-8.11	251.14	-8.82
1.5мм	267.81	-7.90	264.87	-8.12	256.04	-8.84

Задля врахування вищенаведених аспектів, у припущенні сумісної роботи аркових елементів, конструкції що досліджуються, моделювалися у вигляді гладких оболонок (рис. 4б), а геометричні конструктивні особливості відображалися в якості конструктивної ортотропії. Дані для врахування конструктивної ортотропії були знайдені за формулами (6) - (12), з розрахунку лінійної роботи металу:

$$E_1 \vartheta_{21} = E_2 \vartheta_{12}; \quad (6)$$

$$\Rightarrow \vartheta_{21} = \frac{E_2}{E_1} \vartheta_{12}; \quad (7)$$

при цьому: $E_2 = E_1 \alpha; \quad (8)$

де: $\alpha = \frac{I_{x2} b}{100 I_{x1}}; \quad (9)$

$$G = \frac{E_1}{2(1 + \vartheta_{21}) + \alpha}; \quad (10)$$

У свою чергу, наведену товщину для моделювання спеціальної оболонки визначали виходячи з умов:

$$\min \left(\frac{I_{x1}}{100}; \frac{I_{x2}}{100} \right) = \frac{h^3}{12}; \quad (11)$$

$$\Rightarrow h_{red} = \sqrt[3]{12I}; \quad (12)$$

де: E_1, E_2 — модулі деформації з головних напрямків пружності; G — модуль зсуву; $\vartheta_{12}, \vartheta_{21}$ — коефіцієнти поперечної деформації; I_{x1}, I_{x2} - моменти інерції в зазначених напрямках; h - висота профіля оболонки; h_{red} - приведена товщина оболонки.

Досліджували коротку ($L=2R$, де L - довжина оболонки, R - радіус) середню ($L=4R$) і довгу ($L=6R$) моделі циліндричних оболонок (стріла підйому $H=R$,

відстань між опорами, проліт $=2R$), враховуючи наявність або відсутність торцевих та проміжних діафрагм жорсткості. Обпирання оболонки задавали як нерухомий шарнір, що відповідає конструктивній схемі. Прикладали рівномірно розподілене навантаження еквівалентне 1.47 кН/м^2 .

З аналізу компонентів НДС (рис. 6) та стійкості оболонкових ортотропних моделей конструкцій що розглядаються, відзначається істотний позитивний вплив наявності торцевих та проміжних діафрагм на НДС. Суттєві вертикальні переміщення в моделях без діафрагм жорсткості, підтверджують припущення про їх конструктивну необхідність. В моделях з діафрагмами, вертикальні переміщення зіставні з товщиною металу основних конструктивних елементів складених оболонок - аркових профілів.

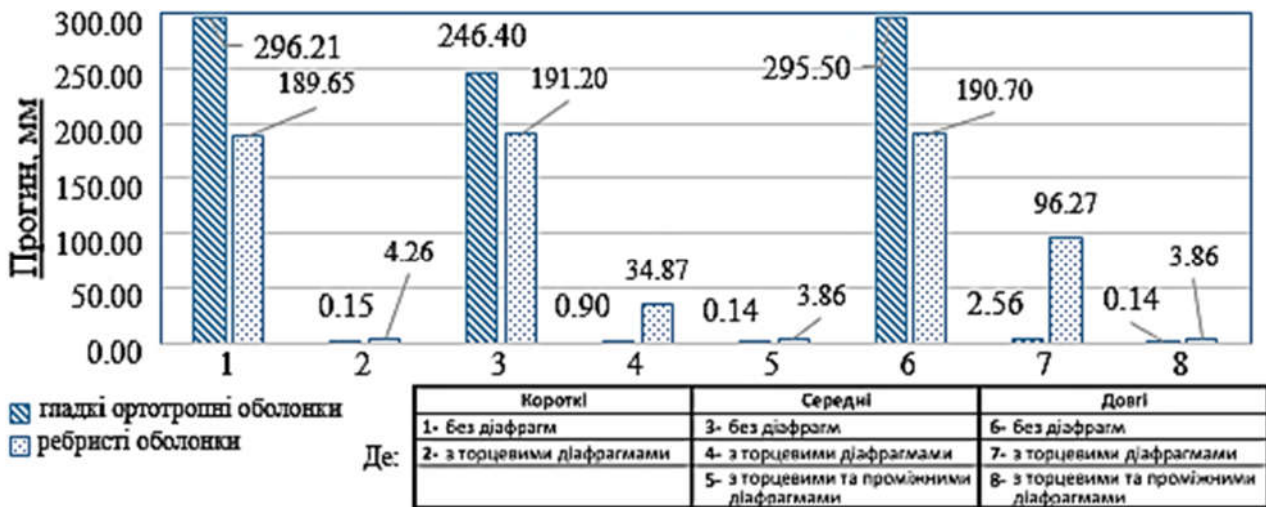


Рис. 6. Діаграма прогинів (у середині прогону) оболонкових моделей

З метою більш детального вивчення особливостей деформування, постала необхідність більш коректного врахування геометрії складених оболонок. В якості розвитку цієї ідеології було побудовано та досліджено моделі (рис. 5в) ребристих оболонок з габаритами та в кількості аналогічними гладким ортотропним оболонковим моделям, що розглядалися. В зазначених моделях ребристих оболонок, використовували геометрично-нелінійні скінченні елементи оболонок. Товщина ребра задавалася як подвоєна товщина металу оболонки, згідно з припущенням про сумісність роботи суміжних конструктивних елементів оболонки.

Отримані дані (рис.6), у рамках цієї моделі, також доводять позитивний вплив на напружено-деформований стан і стійкість континуальних ребристих оболонок, завдяки організації торцевих і проміжних діафрагм. Наявність діафрагм призводить до падіння головних стискаючих і розтягуючих напружень в середньому на 50-70%, в залежності від довжини оболонки. Одночасно відзначається зменшення вертикальних переміщень, в середньому, на 63% і підвищення коефіцієнта запасу стійкості.

Однак, відсутність можливості адекватного врахування прогресуючого обвалення досліджуємих систем, спонукала необхідність подальшого удосконалення розрахункових моделей.

У зв'язку з чим, у **третьому розділі** запропоновано енергетичний підхід до оцінки прогресуючого обвалення оболонок спеціального типу.

Задля цього було використано новітні енергетичні принципи, що набули значного розвитку в роботах проф. В.С. Шмуклера, а саме положення про те, що:

- при лавиноподібному відключенні в'язей, внаслідок появи пластичних шарнірів аж до граничного стану, коли система перетворюється в механізм, потенційна енергія деформації зростає і досягає верхньої межі, тобто $U_u = \sup U$ й наступає колапс;

- вимоги ізоенергетичності стану системи (конструкції), тобто такого стану системи при якому в усіх її елементах щільність потенційної енергії зберігає постійне значення: $e = \text{const}$.

У свою чергу, вираз для потенційної енергії деформації, у припущенні консервативності системи, у загальному виді визначається за формулою :

$$U = \frac{1}{2} \iiint_{-h/2}^{h/2} (\sigma_\alpha e_\alpha + \sigma_\beta e_\beta + \tau_{\alpha\beta} e_{\alpha\beta}) H_1 H_2 d\alpha d\beta d\gamma, \quad (13)$$

де: $e_\alpha, e_\beta, e_{\alpha\beta}$ — деформації оболонки в криволінійних координатах α та β ; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \tau_{\alpha\beta}$ — нормальні та дотичне напруження (при $\tau_{\alpha\beta} = \tau_{\beta\alpha}$), відповідно, в криволінійних координатах α та β ; H_1, H_2 — коефіцієнти Ламе.

Враховуючи, що постановка задачі реалізується в припущенні про консервативність системи, формула ЩПЕД має вигляд:

$$e = \frac{1}{\delta} \left(\frac{1}{2} N_x \varepsilon_x + \frac{1}{2} N_y \varepsilon_y + N_{xy} \varepsilon_{xy} + \frac{1}{2} M_x \chi_x + \frac{1}{2} M_y \chi_y + M_{xy} \chi_{xy} \right). \quad (14)$$

Запропонований підхід, передбачає на кожному кроці ітераційного процесу визначення компонентів НДС, потенційної енергії деформації (ПЕД) та, як результату, побудови енергетичного портрета конструкції (просторової діаграми поля щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД) системи, відповідно до якої в подальшому відбувається виявлення концентраторів ЩПЕД — місць майбутнього колапсу). При цьому, на кожному етапі розрахунку послідовно збільшується навантаження та враховується зміна жорсткості системи (вальцевого з'єднання), у припущенні про існування значення ПЕД: $U = \sup U$, після визначення якого, на наступній ітерації відбувається віртуальний колапс.

У загальному вигляді дана процедура представлена на рис. 7.



Рис. 7. Блок-схема алгоритму обчислення НДС системи з можливістю відображення настання прогресуючого обвалення

Імплементуючи означений алгоритм (рис. 7), була розглянута модель підвищеної коректності оболонки спеціального виду, що має геометричні співвідношення та граничні умови короткої в плані оболонки, що розглядалися раніше, та зважаючи на попередній аналіз наявні торцеві діафрагми. СЕ модель відображає віртуальні недосконалості, у вигляді розкриття шва (рис. 3) між арковими конструктивними елементами, через максимальне відхилення кута полиць аркового елемента від вертикалі на $\sim 3^\circ$, згідно з допусками технології виробництва.

При побудові означеної СЕ моделі передбачалося використання нелінійних скінченних елементів. В першу чергу, це використання геометрично нелінійного СЕ оболонки (рис. 8), для врахування деформованої схеми. Для відображення жорсткості вальцевого з'єднання, використання двовузлового скінченного елемента пружної в'язі, призначеного для моделювання в'язі, що сприймає розтягування або стиснення. Для нелінійних задач такого роду застосовується кроковий метод розрахунку, тобто якщо на якійсь із ітерацій (кроці) зусилля у в'язі стало більше (менше) заданого, то в'язь на наступній ітерації вимикається з роботи.

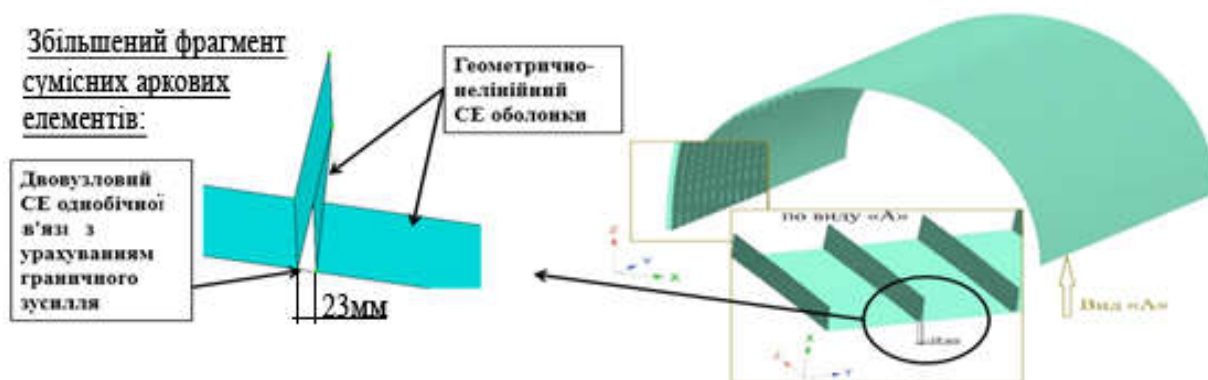


Рис. 8. Схема використання скінчених елементів

Для призначення жорсткості СЕ пружної в'язі, у ПК «Ansys Student», була побудована аналітична модель двох аркових конструктивних елементів, які об'єднані між собою вальцевим з'єднанням. Після чого проведена ідентифікація контактної пари, тобто були позначені зони, в яких під час деформування моделі може відбуватися контакт. Був призначений коефіцієнт взаємодії, що є, в даному випадку, коефіцієнтом тертя «сталь по сталі» рівним 0.8. Проведений аналіз НДС означеного фрагмента, при якому встановили нормальні напруження, що виникають в вальцювальному з'єднанні, та перейшли від них до погонної жорсткості, що призначається елементам однічної в'язі СЕ моделі в ПК «Ліра».

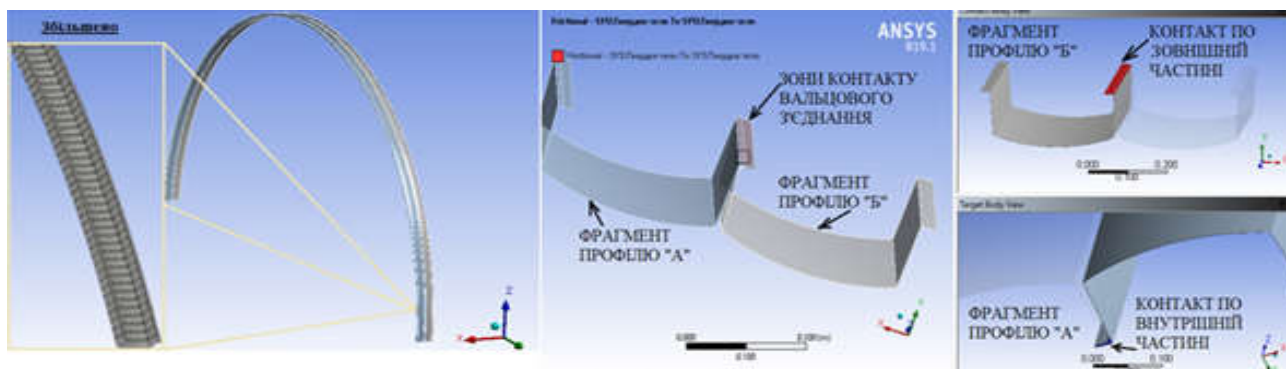


Рис. 9. Визначення характеристик жорсткості вальцевого з'єднання

В ході ітераційного розрахунку в ПК «Ліра», були визначені і проаналізовані компоненти НДС, а також енергетичний портрет оболонки спеціального виду (рис. 10). Відзначені місця концентрації щільності потенційної енергії деформації (ЩПЕД) та ріст значень ЩПЕД на кожному кроці розрахунку (рис. 10).

Як видно з графіка (рис. 12), на останньому кроці розрахунку відзначено наростання значення ПЕД. Сказане підтверджується наростанням вертикальних переміщень (прогинів) даної системи, та досягненням все в більшій кількості двовузлових скінченних елементів однобічної в'язі граничного зусилля (рис. 11) і відбувається виключення їх з «роботи». Тобто, відбувається так зване лавиноподібне усунення в'язей, аж до граничного стану, віртуального колапсу, ПЕД зростає і досягає верхньої межі $U_i = sup U$, коли на наступному кроці система перетворюється в механізм, підтверджуються принципи, покладені раніше.

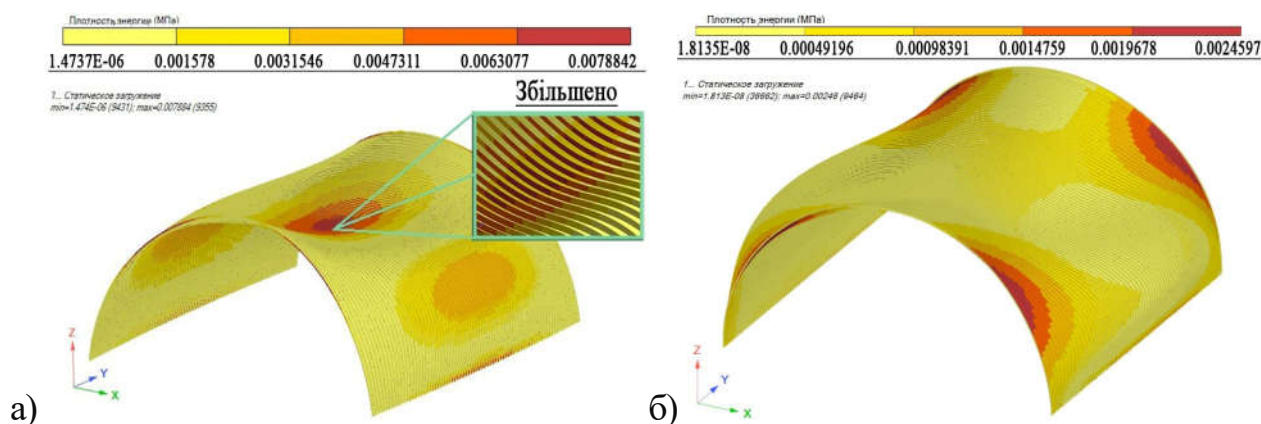


Рис. 10. Просторовий графік розподілення полів ЩПЕД для:
а) першого кроку розрахунку; б) останнього кроку розрахунку



Рис. 11. Зусилля N в скінченних елементах однобічної в'язі на i -тому кроці розрахунку (деформована схема)

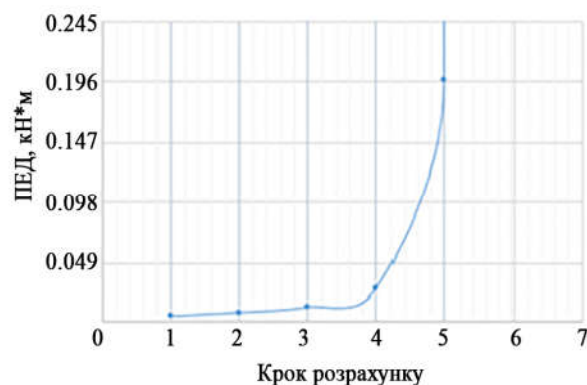


Рис. 12. ПЕД на i -тому кроці розрахунку

Попри необхідність враховувати можливість прогресуючого обвалення, ще одним відкритим питанням залишаються способи його запобігання. Як видно з отриманих результатів, для цього, в рамках зазначених принципів потрібно досягти більш рівномірного (природного) розподілення полів ЩПЕД, та мінімізувати ПЕД системи в цілому. Для цього необхідно забезпечити адекватну спільність роботи аркових конструктивних елементів.

Запропонована конструктивна реалізація (рис. 12), передбачає з заданим кроком встановлення болтових з'єднань (самонарізних шурупів з шайбою Гройвера або заклепок з шайбою). Ця модернізація дозволяє забезпечити спільність деформацій, і трансформувати напружено-деформований стан оболонки спеціального виду в напружено-деформований стан, близький до суцільної ребристої оболонки, отримавши тим самим дискретно-континуальну ребристу оболонку.



Рис. 12. Схема запропонованої конструктивної модернізації

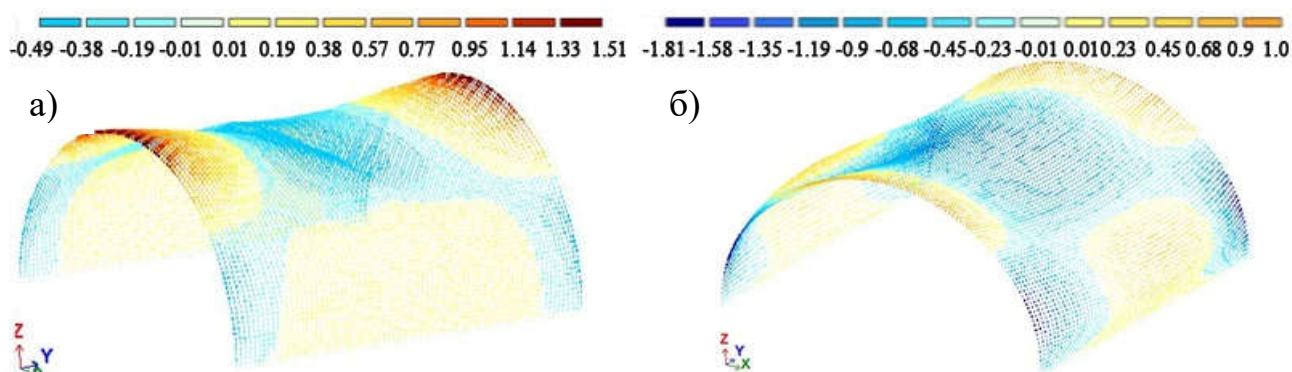


Рис. 13. Зусилля N (кН) у скінченних елементах:
а) однобічної в'язі; б) суцільного перерізу (з болтовим з'єднанням)

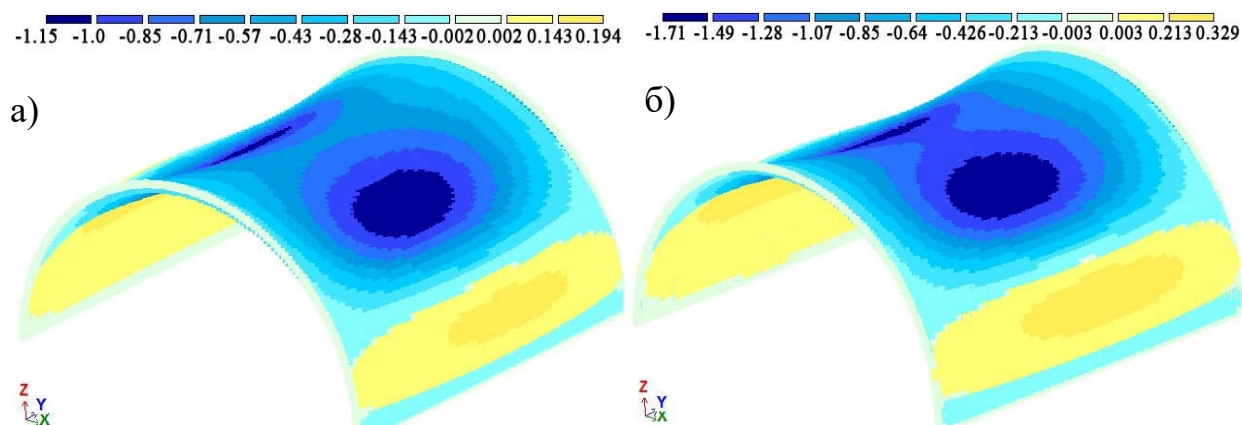


Рис. 14. Переміщення по вертикальній осі «Z» (мм): а) модель ребристої континуальної оболонки; б) модель модернізованої дискретно-континуальної оболонки (з болтовим з'єднанням)

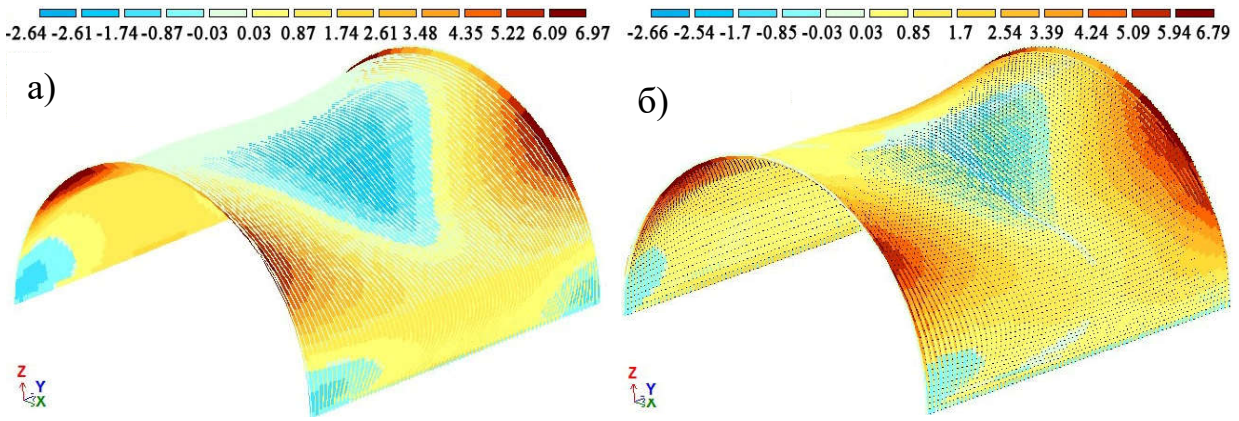


Рис. 15. Ізополя головних напружень « σ_1 » МПа: а) модель ребристої континуальної оболонки; б) модель модернізованої дискретно-континуальної оболонки (з болтовим з'єднанням)

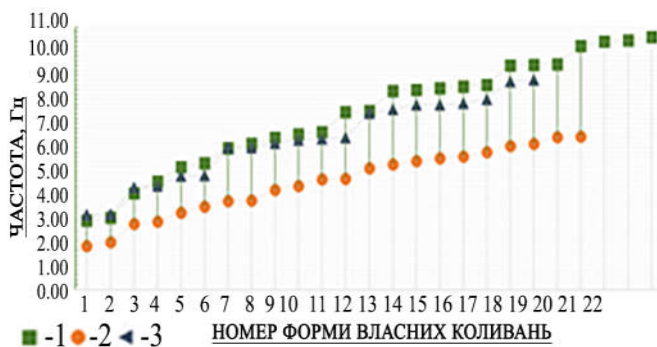


Рис. 16. Графік значень частот власних коливань, для розглянутих моделей

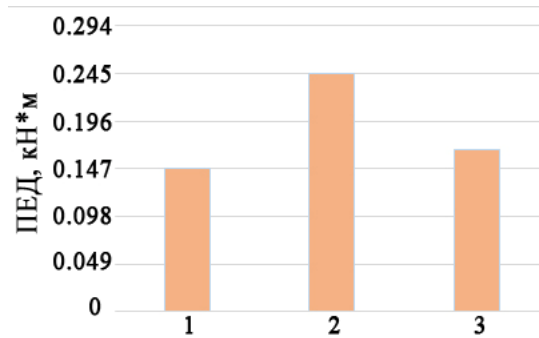


Рис. 17. Значення ПЕД для розглянутих моделей

Де: 1 – континуальна ребриста оболонка;
 2 – дискретно-континуальна модель з одnobічними в'язями;
 3 – модель модернізованої оболонки з болтовим з'єднанням.



1.1... Стадія нелінійного навантаження
 min=0 (9314); max=0.002898 (30559)

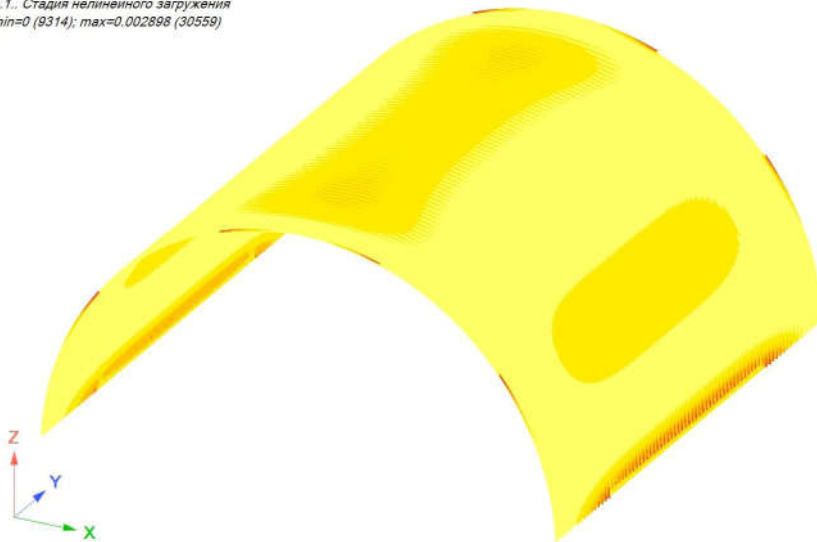


Рис. 18. Просторовий графік розподілення полів ЩПЕД (МПа) для модернізованої оболонки з болтовим з'єднанням

Як видно з проведеного аналізу (рис.13-18), НДС систем і якісно і кількісно схожі між собою. На базі послідовного аналізу побудовано енергетичний портрета конструкції, в рамках зазначених принципів, відзначається квазі-рівномірне розподілення полів ЩПЕД, що доводить ефективність запропонованих заходи конструктивної модернізації вузлів з'єднання досліджуваних конструкцій, що забезпечують стійкість до прогресуючого обвалення. Аналіз показав, що досліджувані оболонки – моментні. Енергія мембранної групи зусиль на останніх стадіях навантаження (перед колапсом) порівнянна з енергією моментної групи зусиль. А після конструктивної модернізації, енергія мембранної групи починає переважувати над моментною групою. Означене підтверджується зіставленням і аналізом напружено-деформованого стану, стійкості та амплітудно-частотних характеристик та ПЕД моделей: (рис. 16-18) суцільної ребристої оболонки, а також дискретно-континуальної оболонки (з моделюванням болтового з'єднання).

Четвертий розділ роботи присвячено верифікації СЕ моделей підвищеної коректності в ході проведення натурального повнорозмірного експерименту.

Об'єкт дослідження – металева оболонка покриття спеціального виду з урахуванням послідовності зведення (до і після конструктивної модернізації).

Предмет дослідження – характер деформування об'єкту дослідження, при дії зосередженого навантаження.

Досліджуваний блок, є близькою до квадратної, в плані, циліндричної складової оболонці покриття, і має наступні лінійні розміри: проліт між бортовими елементами 22м., довжина блоку 15.55м., стріла підйому 8.37м., радіус циліндричної оболонки 11.585м. Товщина сталі основного конструктивного аркового елемента складала 1.2 мм.

Базуючись на проведених раніше дослідженнях і покладених принципах конструювання, що водночас є способом запобігання прогресуючого обвалення 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.



Рис. 19. Габарити досліджуваного блоку металевої оболонки спеціального виду

Навантаження прикладали тарованими вантажами, згідно системи навантаження (рис. 20 б, де F — навантаження що прикладали). Інтервал між ітераціями навантаження становив 1 хвилину. Після чого, згідно з системою вимірювання (рис. 20а, де «П1, П2, П3» - прогиноміри «БПАО» з ціною поділки 0,01 мм, фіксували показання вимірювальних приладів).

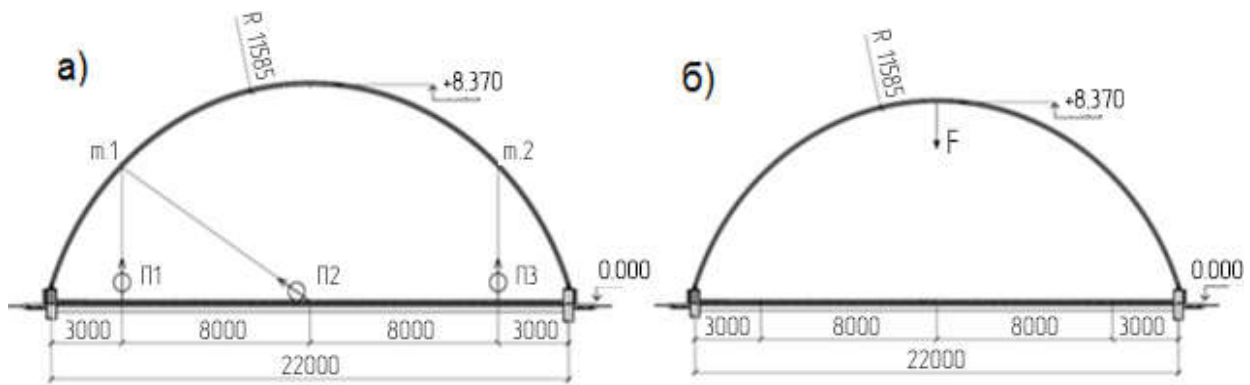


Рис. 20. Системи навантаження та вимірювання:

а) схема системи вимірювання; б) схема системи навантаження

Максимально прикладене навантаження склало 1.962 кН. При дії максимального навантаження (1.962 кН) конструкція перебувала 10 хв. Далі, поетапно по 0.1962 кН проходило розвантаження досліджуваної конструкції покриття. Після завершення розвантаження витримувався часовий інтервал 10 хв., і проводилася фіксація показань вимірювальних приладів без навантаження, для зіставлення з початковими показаннями і отримання 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.

Данні про переміщення зазначених контрольних точок для першого та другого етапів дослідження (до та після проведення конструктивної модернізації) подані в якості графіків на рисунках 21-22, відповідно.

З отриманих даних, 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.

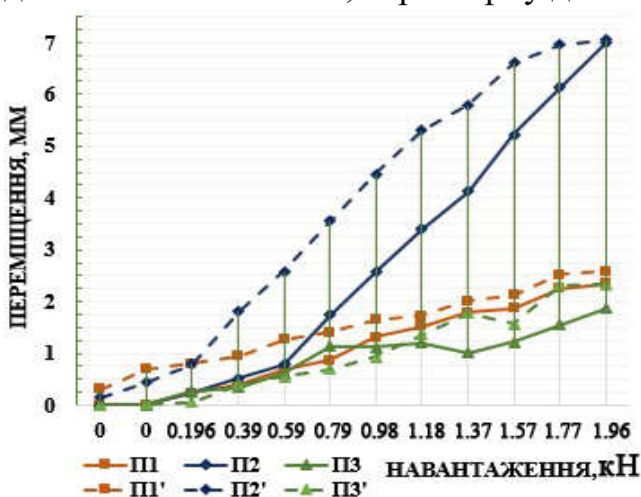


Рис. 21. Графік залежності переміщень (I-ий етап експерименту, до модернізації) контрольних точок від навантаження (розвантаження) де П1, П2, П3 - переміщення контрольних точок; П1', П2', П3' - переміщення контрольних точок при знятті навантаження

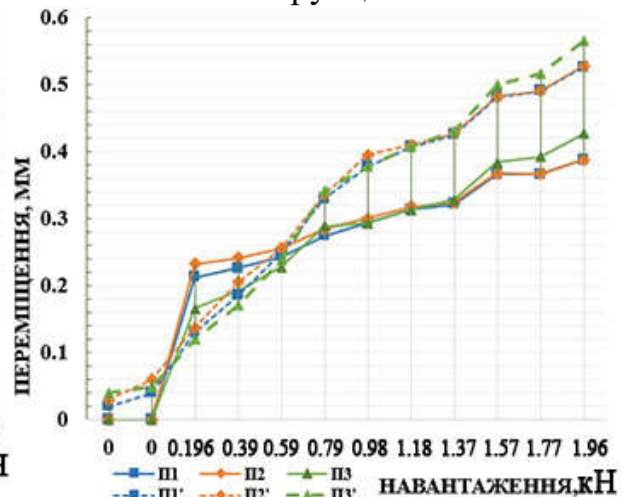


Рис. 22. Графік залежності переміщень контрольних точок (II -ий етап експерименту, після модернізації) від навантаження (розвантаження) де П1, П2, П3 - переміщення контрольних точок; П1', П2', П3' - переміщення контрольних точок при знятті навантаження

Для зіставлення експериментальних результатів з теоретичними, за згаданим раніше алгоритмом (рис. 7), у середовищі ПК «Ліра» побудовано дві розрахункові скінченно-елементні моделі (рис. 23) блоку споруди, що досліджувалась.

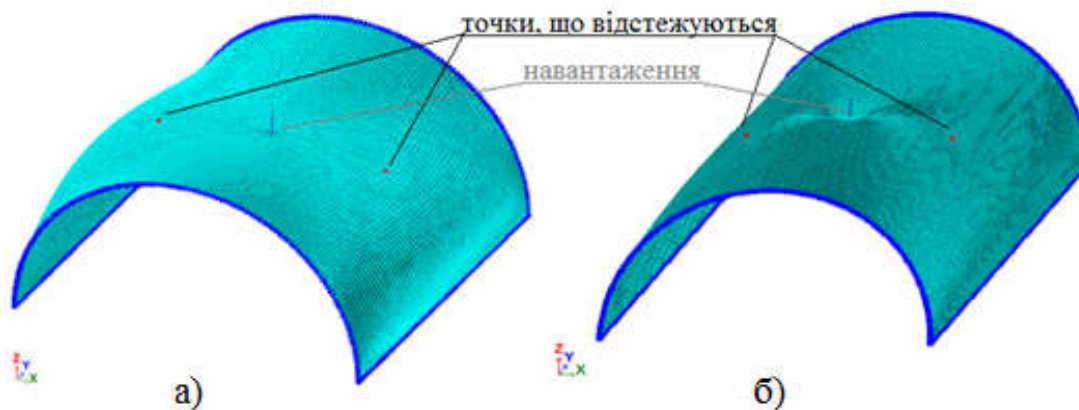


Рис. 23. СЕ моделі блоку спеціальної оболонки (деформована схема, при дії навантаженні 1.962 кН): а) до модернізації; б) після модернізації

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 в площині діафрагми, тобто по осях «X», «Z», у використовуваної глобальній системі координат. При моделюванні оригінальної оболонки спеціального виду використовувалися СЕ 341-геометрично-нелінійний універсальний прямокутний скінченний елемент оболонки, а також СЕ 252 – двовузловий скінченний елемент однієї в'язі. 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», в використовуваної глобальній системі координат. Всі лінійні розміри ідентичні натурній конструкції. Граничні умови моделей ідентичні. Істотною відмінністю моделей є використання в одній з них СЕ 10 - просторового стержня, для моделювання конструктивної модернізації (болтового з'єднання) замість стержня однієї в'язі СЕ 252.

Порівняльний аналіз теоретичних переміщень від фактичних подано в якості графіків на рис. 24-26 для кожного з обумовлених етапів дослідження.

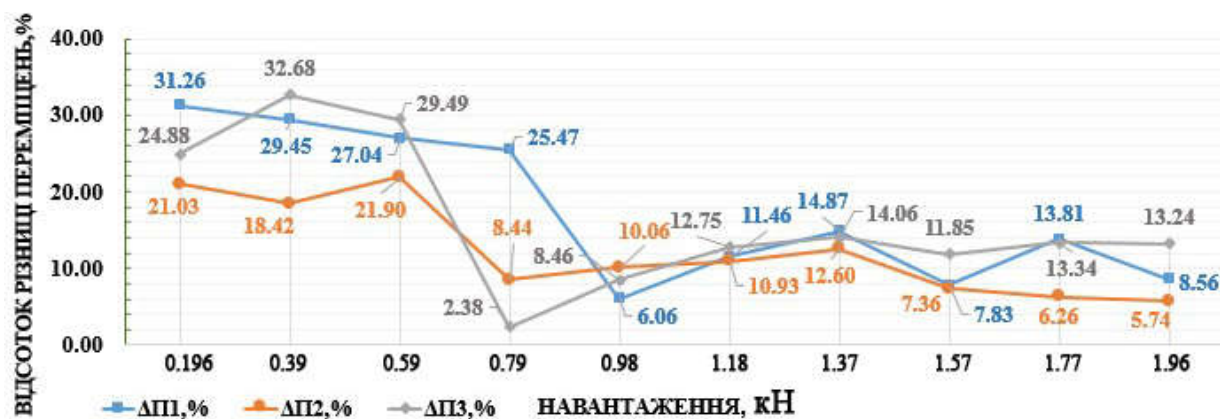


Рис. 24. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних відносно теоретичних): I етап дослідження (до проведення модернізації)

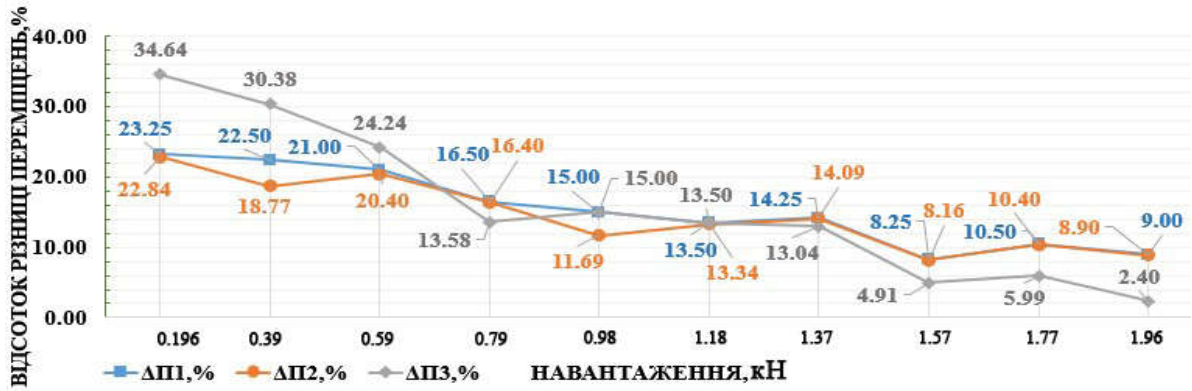


Рис. 25. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних відносно теоретичних): II етап дослідження (після модернізації з'єднання)

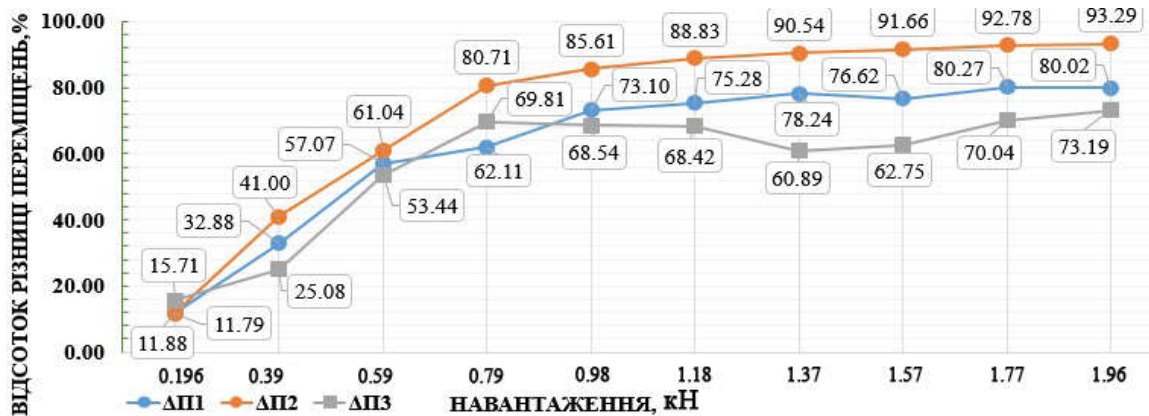


Рис. 26. Порівняльний аналіз значень переміщень (експериментальних): I-го та II-го етапів дослідження (відносно I-го етапу)

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 доводять 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 в якості графіка на рис. 26. 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.

П'ятий розділ присвячено впровадженню результатів наукової роботи в проектний і виробничий цикл підприємства ТОВ «СТРОЙ ІНЖИНІРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ». Результати впроваджувалися при проектуванні і будівництві типових фізкультурно-оздоровчих комплексів (рис. 27). Розроблені принципи побудови розрахункових моделей оболонкових покриттів спеціального типу, впроваджені на етапі проектування розглянутих споруд. Запропонована конструктивна модернізація, також застосована в ході проектування і будівництва. Досвід зведення ряду об'єктів, підтверджує ефективність і доцільність даного рішення.

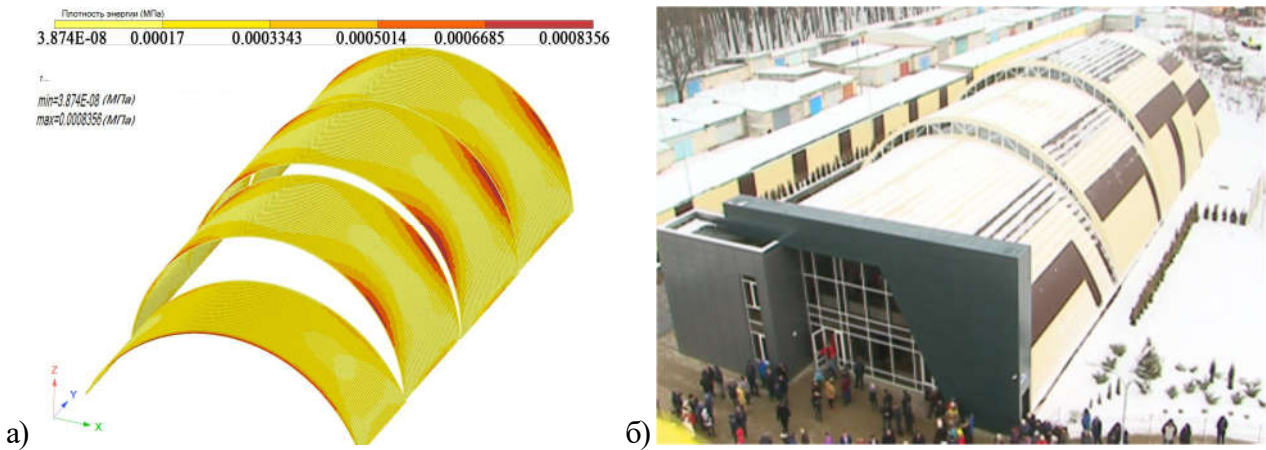


Рис. 27. Об'єкт впровадження: типовий фізкультурно-оздоровчий комплекс:
 а) СЕ-модель ФОКа: Просторовий графік розподілення полів ЩПЕД (від комбінації нормативних навантажень); б) зведений типовий ФОК

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено скінченно-елементні моделі оболонкових покриттів спеціального виду, які допускають проведення коректного аналізу напружено-деформованого стану та стійкості, з урахуванням можливості прогресуючого обвалення. Доведено позитивний вплив наявності торцевих та проміжних діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість розглянутих систем. Наявність діафрагм призводить до падіння головних стискальних та розтягувальних напружень, в середньому на 50-70%, в залежності від довжини оболонки, також відмічається зменшення вертикальних переміщень, в середньому на 63%, та підвищення коефіцієнту запасу стійкості.

2. Розроблено принципи моделювання стиків аркових покриттів спеціального типу, що відображають дійсну роботу досліджуваних конструкцій. На основі проведеного аналізу запропоновано спосіб модернізації стикування, у вигляді болтового з'єднання, задля попередження прогресуючого обвалення. Експериментально встановлено ефективність проведеної конструктивної модернізації з'єднань аркових конструктивних елементів – значення вертикальних переміщень модернізованої конструкції зменшилися, в середньому, на 71%, відносно оригінальної.

3. Побудовано скінченно-елементні моделі оцінювання напружено-деформованого стану та стійкості оболонок спеціального виду, з імплементацією розробленого алгоритму обчислення НДС системи з можливістю прогресуючого обвалення, й урахуванням конструкційної нелінійності та специфічності з'єднання конструктивних елементів.

4. Проведено верифікацію запропонованої моделі повнорозмірним натурним експериментом, яка доводить коректність запропонованого підходу.

Різниця між теоретичними і експериментальними значеннями переміщень склала, в середньому, 10,74%.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Особливості використання ефективних оболонкових систем у промисловому та цивільному будівництві. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. Збірник наукових праць КНУБА*. 2018. №35. С. 123–128. (Особистий внесок: виконано аналіз використання металевих оболонок спеціального виду у промисловому будівництві).

2. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Розрахунок та аналіз безкаркасних аркових систем, виконаних із тонкостінних холоднодеформованих профілів. *Наука та будівництво*. 2018. №1. С. 100–110. (Особистий внесок: виконано дослідження геометричних характеристик конструктивних елементів металевої оболонки, виконано оцінку стійкості рівноваги систем, що досліджували).

3. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Вплив конструктивних особливостей на напружено-деформований стан спеціальних оболонкових систем. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Том 91, №1. С. 317–325. (Особистий внесок: виконано скінчено-елементне моделювання просторових моделей оболонок спеціального виду, проведено експериментальну верифікацію).

4. Коренєв Р. В. Вплив віртуальних недосконалостей на напружено-деформований стан і стійкість спеціальних оболонкових систем. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 140. С. 109–119.

5. Коренєв Р. В. Вплив діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість аркових систем спеціального типу. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія : Теорія і практика будівництва. 2019. Вип. 912. С. 75–83.

6. Коренєв Р. В., Гапонова Л. В., Гребінчук С. С. До визначення характеристик жорсткості вальцьового з'єднання металевих оболонок спеціального виду. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(85). С. 196–177. (Особистий внесок – виконано розробку просторових 3D-моделей конструктивних елементів оболонки спеціального виду).

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних наукометричних баз

7. Коренєв Р. В., Резнік П. А. Особливості деформування споруди оболонкового типу в умовах динамічного навантаження. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2018. Вип. 178. С.78–88. (Особистий внесок – виконано натурне дослідження амплітудно-частотних характеристик споруди оболонкового типу в умовах динамічного навантаження).

8. Koreniev R., Reznik P., Grebenchuk S., Bondarenko V. Research of the specific steel shells progressive collapse prevention. *Academic journal Series: Industrial machine building, civil engineering*. 2019. Issue 1(52). P. 58–64. (Особистий внесок – виконано розробку конструктивної модернізації задля попередження прогресуючого обвалення).

9. Резнік П.А., Гапонова Л. В., Гребінчук С. С., Коренєв Р.В. Експериментально-теоретичні випробування ефективності конструктивних заходів щодо запобігання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2019. Вип. 185. С. 71–81. (Особистий внесок – виконано розробку алгоритму обчислення НДС металевих оболонок спеціального виду з можливістю відображення прогресуючого обвалення, розробку скінченно-елементних моделей оболонок за зазначеним алгоритмом).

Публікації апробаційного характеру:

1. Резнік П. А., Коренєв Р. В. Особливості використання ефективних оболонкових систем у промисловому та цивільному будівництві. *Ефективні технології в будівництві*: зб. Матеріалів доп. учасн. Міжнар. наук.-практ. конф., 28–29 березня 2018 р. Київ : КНУБА, 2019. С. 109–110. (Особистий внесок: виконано аналіз використання металевих оболонок спеціального виду у промисловому будівництві)

АНОТАЦІЯ

Коренєв Р. В. Аналіз можливості виникнення прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2020.

Дисертація присвячена розробці принципів якісної і кількісної оцінки можливості настання прогресуючого обвалення металевих оболонок спеціального виду.

Розроблено принципи моделювання стиків аркових конструктивних елементів оболонок спеціального виду, що відображають дійсну роботу досліджуваних конструкцій. На основі проведеного аналізу запропоновано спосіб модернізації стикування, задля попередження прогресуючого обвалення. На базі розроблених принципів, побудовано скінченно-елементні моделі напружено-деформованого стану та стійкості аркових покриттів спеціального типу.

Досліджено скінченно-елементні моделі аркових покриттів спеціального типу, які допускають проведення коректного аналізу напружено-деформованого стану та стійкості, з урахуванням можливості прогресуючого обвалення. Доведено позитивний вплив наявності торцевих та проміжних діафрагм на напружено-деформований стан та стійкість аркових систем. Наявність діафрагм призводить до падіння головних стискальних та розтягувальних напружень, в середньому на 50-70%, в залежності від довжини оболонки, також відмічається зменшення вертикальних переміщень, в середньому на 63%, та підвищення коефіцієнту запасу стійкості.

Проведено верифікацію запропонованої моделі натурним експериментом, яка доводить коректність запропонованого підходу. Експериментально встановлено ефективність проведеної конструктивної модернізації аркових з'єднань-значення вертикальних переміщень модернізованої конструкції зменшилися, в середньому, на 71%, відносно оригінальної.

Результати дослідження впроваджено в проектний і виробничий цикл підприємства ТОВ «СТРОЙ ІНЖИНІРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ» при розробці стандартних фізкультурно-оздоровчих комплексів.

Ключові слова: оболонка спеціального виду, стійкість, прогресуюче обвалення, напружено-деформований стан.

АННОТАЦІЯ

Коренев Р. В. Аналіз можливості виникнення прогресуючого обрушення металічних оболонок спеціального виду. – Кваліфікаційна научний труд на правах рукописи.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2020.

Дисертація посвящена розробці принципів якісної і кількісної оцінки можливості наступлення прогресуючого обрушення металічних оболонок спеціального виду.

В першому розділі виконано аналіз існуючих конструктивних рішень металічних оболонок спеціального виду, методів їх розрахунку і існуючої нормативної бази. Розглянуто роботи авторів, які займаються теоретичними і експериментальними дослідженнями металічних оболонок спеціального виду. Проведено аналіз аномалій і колапсів, які відбуваються при експлуатації досліджуваних конструкцій. Обозначено головні достоїнства конструктивних рішень, їх недоліки, а також нерешені питання, зокрема проблема прогресуючого обрушення, в зв'язі з чим, були сформульовані цілі і завдання нинішньої дисертаційної роботи.

Во другому розділі описано лабораторне випробування (на натурному зразку) по визначенню вигинної жорсткості (відносно горизонтальної осі) фрагмента арочного профілю, з наступною верифікацією геометричних характеристик, отриманих з допомогою сучасних розрахункових комплексів. Було досліджено три типи розрахункових моделей розглянутих конструкцій: модель у вигляді плоскої арки (згідно рекомендаціям нормативної документації), модель просторової гладкої оболонки (яка відображає конструктивну ортодропію), модель у вигляді просторової ребристої оболонки (яка відображає геометричну нелінійність). Алгоритм (рекомендованою нормативно-технічною документацією) дослідження напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій спеціального типу доповнено аналізом стійкості, при цьому, враховуючи не тільки стійкість плоскої форми вигину, але і вигинно-крутильну форму втрати стійкості. По результатам аналізу НДС, на базі просторових оболоночних моделей, доведено позитивний вплив наявності торцевих і проміжних діафрагм на НДС і стійкість оболонок спеціального типу, і як наслідок зроблено висновок про їх конструктивну необхідність. Наявність діафрагм жорсткості призводить до падіння головних стискаючих і розтягуючих напружень, в середньому на 50-70%, в залежності від

длины оболочки, а также к уменьшению вертикальных перемещений, в среднем на 63% и повышению коэффициента запаса устойчивости.

В третьем разделе разработаны принципы формирования конечно-элементных моделей исследуемых конструкций с учетом фактической жесткости соединения профилей и отражающие виртуальные несовершенства. Предложен энергетический подход, и на базе его, разработан алгоритм качественной и количественной оценки возможности наступления прогрессирующего обрушения. Также, предложены меры конструктивной модернизации узлов соединения исследуемых конструкций, позволяющие избежать прогрессирующего обрушения.

Четвертый раздел посвящен верификации (в ходе проведения полноразмерного натурного эксперимента) расчетных моделей оболочек специального вида, с учетом последовательности возведения (при работе конструкции до и после проведения конструктивной модернизации). Проведено сопоставление данных перемещений исследуемых точек конструкции от действия, приложенной сосредоточенной нагрузки, до и после проведения конструктивной модернизации. Наблюдается значительное снижение перемещений в среднем на 71.21%, наглядно свидетельствующее об улучшении характеристик жесткости исследуемой системы. Разница между теоретическими и экспериментальными значениями перемещений составила, в среднем, 10,74%.

Пятый раздел представляет результаты внедрения научного исследования в ООО «СТРОЙ ИНЖИНИРИНГ ДЕВЕЛОПМЕНТ», при проектировании и строительстве стандартных физкультурно-оздоровительных комплексов.

Ключевые слова: оболочка специального вида, устойчивость, прогрессирующее обрушение, напряженно-деформированное состояние.

ABSTRACT

Koreniev R. V. Analysis of the possibility of progressive collapse of metal shells of a special kind. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in the specialty 05.23.01 "Building constructions, buildings and structures" (19 - Architecture and construction). - Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2020

The dissertation is devoted to the development of principles of a qualitative and quantitative assessment of the possibility of the onset of progressive collapse of metal shells of a special kind.

The first section analyzes the existing structural solutions of metal shells of a special type, methods for their calculation and the existing regulatory framework. The works of authors involved in theoretical and experimental studies of metal shells of a special kind are considered. The analysis of anomalies and collapses occurring during the operation of the investigated structures. The main advantages of constructs, their shortcomings, as well as unresolved issues, in particular the problem of progressive collapse, are identified, in connection with which, the goals and objectives of this dissertation were formulated.

The second section describes a laboratory test (on a full-scale specimen) to determine the bending stiffness (relative to the horizontal axis) of a fragment of an arched profile, followed by verification of geometric characteristics obtained using modern calculation systems. Three types of design models of the structures under consideration were investigated: a model in the form of a flat arch (according to the documentation), a model of a spatial smooth shell (reflecting constructive orthotropy), a model in the form of a spatial ribbed shell (reflecting geometric nonlinearity). The algorithm (recommended by the documentation) for studying the stress-strain state (SSS) of special-type structures is supplemented by a stability analysis while taking into account not only the stability of the flat form of bending but also the bending-torsional form of buckling. According to the results of the SSS analysis, based on spatial shell models, the positive effect of the presence of end and intermediate diaphragms on the SSS and the stability of the shells of a special type is proved, and as a result, a conclusion about their constructive necessity is made. The presence of diaphragms leads to decrease the main compressive and tensile stresses (average) by 50-70%, depending on the length of the shell, as well as to decrease vertical displacements (average) by 63% and an increase in the safety factor.

In the third section, the principles of the formation of finite element models of the structures under study are developed taking into account the actual stiffness of the connection profiles and reflecting virtual imperfections. An energy approach is proposed, and based on it, an algorithm for the qualitative and quantitative assessment of the possibility of progressive collapse is developed. Also, measures have been proposed for constructive modernization of the connection nodes of the structures under the study, to avoid progressive collapse.

The fourth section is devoted to verification (during a full-scale experiment) of design models of shells of a special type, before and after constructive modernization. A comparison of the data of the displacements of the studied structural points from the action of the applied concentrated load, before and after the structural modernization was carried out. A significant decrease in displacements by an average of 71.21% is observed, which clearly indicates an improvement in the stiffness characteristics of the system under study. The difference between the theoretical and experimental values of the displacements was, on average, 10.74%.

The fifth section presents the results of the implementation of scientific research in LLC STROY ENGINEERING DEVELOPMENT, during the design and construction of standard sports and fitness complexes.

Key words: a shell of a special type, stability, progressive collapse, stress-strain state.

Коренєв Роман Валерійович

**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПРОГРЕСУЮЧОГО
ОБВАЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук