

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ГРЕБЕНЧУК СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК[624.074.43:624.012.35](088.87)

**РАЦІОНАЛІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ АНІЗОТРОПНИХ
ОБОЛОНОК**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків 2018

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Гапонова Людмила Вікторівна,
Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
доцент кафедри будівельних конструкцій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
академік Академії будівництва України
Бамбура Андрій Миколайович,
Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій Мінрегіону України,
завідувач відділу надійності будівельних
конструкцій;

кандидат технічних наук, доцент
Гасій Григорій Михайлович,
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка,
докторант кафедри конструкцій з металу,
дерева та пластмас.

Захист відбудеться 5 квітня 2018 р. о 12.30_годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.02 при Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майд. Фейєрбаха, 7.

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

Автореферат розісланий 2 березня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради, к. т. н., доцент  О.В. Лобяк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасний стан теорії розрахунку залізобетонних конструкцій дає змогу створювати криволінійні конструктивні форми, проектувати й зводити будівлі та споруди, унікальні за своєю архітектурою, з довільним плануванням приміщень, великими прогонами тощо.

Досить актуальним питанням у сучасному будівництві України є створення захисних підземних споруд у вигляді оболонки, які можуть сприймати значні динамічні та статичні навантаження. Покриття будівель і споруд сприймають значні навантаження, які спричиняють високий рівень напружено-деформованого стану (НДС) системи. Саме тому доцільно розглядати такі види покриття, які могли б сприймати, рівномірно розподіляти й передавати ці навантаження на опори. Для виконання цієї мети найбільше підходять оболонки різної гауссової кривизни, виконані із залізобетону. Проте пошук раціональних конструкцій оболонки, які сприймають зазначені види навантажень, становить собою досить актуальну, але логічно незавершену проблему. Крім того, оскільки залізобетон є доволі важким матеріалом, доцільно дослідити способи його полегшення. Одним із таких способів є замоноличування всередину конструкції вкладишів-пустотоутворювачів із пінополістиролу, які водночас формують ребра жорсткості оболонки. Водночас, надаючи ребрам жорсткості певної геометрії (за рахунок змінювання форми вкладишів), можна забезпечити найбільш прийнятний розподіл зусиль, який являє собою задану несучу здатність при обмеженому використанні матеріалу.

Резюмуючи перераховане, можна констатувати, що побудова методології формування внутрішньої геометрії з подальшою експериментальною верифікацією є своєчасною й необхідною для практики будівництва проблемою. Її вирішення дозволить підвищити ступінь надійності подібних систем, їх довговічність, а також за рахунок раціоналізації їхніх конструктивних параметрів реалізувати мінімізацію витрат матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконано згідно з планом науково-дослідної роботи ХНУМГ імені О. М. Бекетова у межах держбюджетної теми № 0115U000154 «Розробка та дослідження нової конструктивної будівельної системи багатокритеріальної відповідності» (2015–2016 рр.) і наукової школи «Конструкції та матеріали для житлових і цивільних будівель».

Метою роботи є раціоналізація параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонки з урахуванням концепції «конструкція – матеріал – технологія».

Задачі дослідження:

- дослідити принципово новий тип конструкції, що має задану зовнішню й розрахункову внутрішню геометрію;
- математично змодельовати процес деформування конструктивно-анізотропної оболонки за різних типів зовнішніх і внутрішніх впливів;
- експериментально верифікувати отримані теоретичні результати дослідження;
- упровадити результати дослідження.

Об'єкт дослідження – управління напружено-деформованим станом залізобетонних анізотропних оболонок різної гауссової кривизни.

Предмет дослідження – принципи раціонального конструювання, теоретико-експериментальне вивчення й удосконалення характеристик об'єкта дослідження.

Методи дослідження. У роботі використано класичні й чисельні методи механіки деформованого тіла, а також теоретичний метод, що базується на нових енергетичних принципах. Унаслідок цього створено програмні продукти – програмні компілятори ітераційного типу, які функціонують на базі комерційних програмних середовищ, реалізованих на базі методу скінченних елементів. На базі гідравлічного методу й лабораторних випробовувань вихідних матеріалів проведено комплекс експериментальних досліджень залізобетонних оболонок. Заданий метод відрізняє експлуатація сучасних технічних та інформаційних приладів і обладнань.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

Отримав подальшого розвитку:

- принцип конструювання просторових елементів зі складною геометрією.

Уперше отримано:

- модель деформування двопоясних оболонок, що дозволяє шляхом управління напружено-деформованим станом конструкції обґрунтовано визначити фізико-геометричні параметри системи;
- експериментальну інформацію про особливості деформування двопоясних ребристих оболонок, які мають раціональні конструктивні параметри і різну гауссову кривизну.

Удосконалено:

- метод гідравлічного випробування для оболонок різної гауссової кривизни.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

- удосконалено метод для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни;
- запропоновано і створено стенд для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни;
- упроваджено результати дослідження під час проектування і зведення будівлі за адресою: м. Харків, майдан Павлівський, 4, «Реабілітація нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, подані в дисертації, є самостійними. В опублікованих у співавторстві роботах здобувачеві належить: [1,2] - огляд літератури, вивчення фізичних властивостей нового типу конструкції; [3,4, 9,12,14] - підготовка експериментальної установки, створення експериментального стенду та проведення експериментальних досліджень; [5] - розробка проектних рішень при визначенні пошкоджень та аналізі архітектурно-конструктивних особливостей будівлі; [6,7] - аналіз чисельних даних результату розрахунків; [10] - проведення пошукових досліджень щодо фізичних властивостей конструктивно-анізотропних конструкцій; [11] - проведення пошукових досліджень і раціоналізація чисельних розрахунків; [15,16] - патентний пошук, пропозиції щодо конструктивних особливостей стиків і проведення випробувань.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідались на:

- Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова (м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р.);
- VI науково-практичній конференції «Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві» (м. Харків, 23-24 березня 2016 р.);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (м. Полтава, 4-5 квітня 2016 р.);
- 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016, (April 12–14, 2016) Salahaddin University-Erbil, Kurdistan, Iraq;
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні» (м. Харків, 6-7 квітня 2017 р.);
- II Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективні технології в будівництві» (м. Київ, 6-7 квітня 2017 р.);
- VI Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 19-21 квітня 2017 р.).

Публікації. Основні положення дисертації та результати досліджень опубліковані у 16 друкованих працях, із них: 6 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, із яких 4 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз; 1 публікація у колективній монографії, 4 публікації апробаційного характеру, із яких 2 – у виданнях, що індексуються Scopus; 3 додаткові публікації та 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 202 сторінки, зокрема 146 сторінок основного тексту, 9 таблиць, 119 рисунків, а також список використаних джерел із 132 найменувань та 5 додатків на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, що вирішується, сформульовано мету й задачі дослідження, наукову новизну і практичну цінність результатів роботи, а також подано її загальну характеристику.

Перший розділ присвячено конструктивним особливостям відомих залізобетонних полегшених оболонок, принципам моделювання й методам розрахунку анізотропних оболонок, технологічним принципам виготовлення полегшених залізобетонних оболонок. Особливу увагу приділено експериментальному моделюванню випробовувань шляхом слідкувального навантаження.

Дослідженнями залізобетонних оболонок займалися такі вчені як А.Я. Барашиков, А.М. Бамбура, В.М. Бондаренко, О.І. Вайнберг, Ю.О. Клімов,

Г.А. Молодченко, М.В. Савицький, Л.І. Стороженко, Г.К. Хайдуков, В.В. Шугаєв, О.Л. Шагін, В.С. Шмуклер. Оригінальні методи, що складають основу сучасної теорії управління параметрами конструкцій, вичали Н.П. Абовський, О.С. Городецький, М.І. Рейтман, Є. Хог, К. Чой, А.В. Перельмутер, А.Л. Гольдененвейзер, С.П. Тимошенко, О.Р. Ржаніцин, Б. Фулер, Chien Wei-Zang, Reissner E., Kleinmichel H. та багато інших авторів.

Поняття «раціональна конструкція» вдалось дещо конкретизувати і трансформувати за допомогою цікавих ідей і досліджень Г.В. Василькова і В.С. Шмуклера. Також упровадженню у практику проектування прямих методів сприяли, з одного боку, способи трактування власного поняття «раціональне рішення», а з іншого – широке використання методу скінченних елементів (МСЕ).

Незважаючи на численні наукові праці за цим напрямком, сьогодні, на жаль, відсутні роботи нелінійного чисельного дослідження двопоясних анізотропних оболонок із ребрами в різних напрямках. У наведених літературних джерелах подано досить обмежену інформацію щодо результатів експериментальних досліджень анізотропних залізобетонних оболонок.

Зважаючи на даний факт, а також з метою розширення наявної інформації на базі проведеного аналізу зроблено висновки та сформульовано завдання цього дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено формуванню конструкцій оболонок різної гаусової кривизни й вивченню напружено-деформованого стану залізобетонних анізотропних оболонок. Відмінною особливістю конструкції є використання всередині монолітного залізобетонного елемента вкладишів-пустотоутворювачів. Натурні моделі сферичної та циліндричної оболонки зображені на рис. 1, 2.



Рис. 1. Модель сферичної оболонки



Рис. 2. Модель циліндричної оболонки

Експериментальні зразки – моделі циліндричної і сферичної оболонок покриття будівельної системи з розмірами в плані 2200x2200 мм виконані у вигляді зовнішньої і внутрішньої бетонної обшивки товщиною 50 мм, між якими розташований вкладиш-пустотоутворювач із пінополістиролу товщиною 150 мм.

Армування обшивок виконано сіткою з коміркою 200x200 мм, $d = 6$ мм А240С. За діагональним напрямком оболонки, забезпечуючи спільну роботу обшивок, розташовані ребра шириною 50 мм, армовані плоским каркасом з арматурою $d = 10$ мм А400С.(рис. 3, 4).

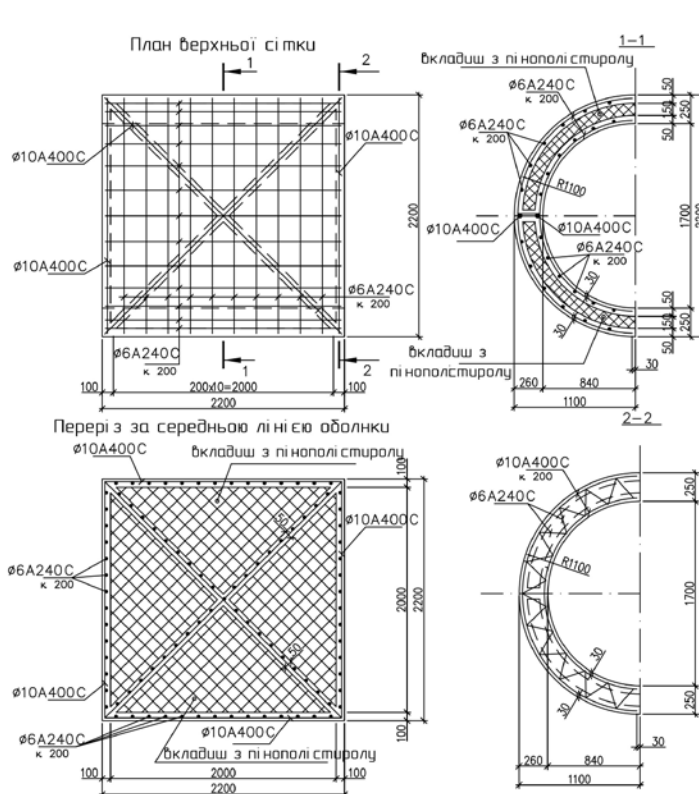


Рис. 3. Геометрія й армування сферичної оболонки

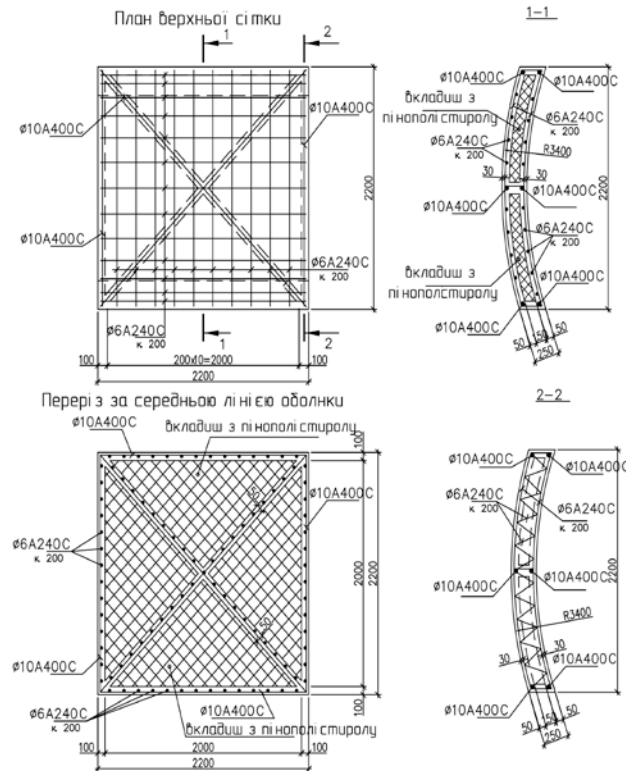


Рис. 4. Геометрія й армування циліндричної оболонки

У роботі побудовано тривимірну скінчено-елементну модель, яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій різної гауссової кривизни розглянутого типу.

У зв'язку з цим, враховуючи складність сформованої структури оболонок, було прийнято рішення не використовувати класичні гіпотези Кірхгофа-Лява-Клебша, а реалізувати 3D-моделювання. У рамках цього дослідження чисельна реалізація здійснена в середовищі ПК «Ansys» (ліц. № 01008608).

Інструментарій цього розрахункового комплексу дозволяє проводити автоматичну триангуляцію складних форм на скінченні об'ємні елементи шляхом автоматичного імпорту з допоміжного програмного комплексу тривимірного моделювання (у даному випадку використовувався ПК «Autodesk Inventor») (рис. 5).

У побудованій моделі циліндричної оболонки налічувалось 209319 вузлів і 100271 кінцевих елементів; а у сферичної оболонки - 459061 елементів і 261791 вузлів.

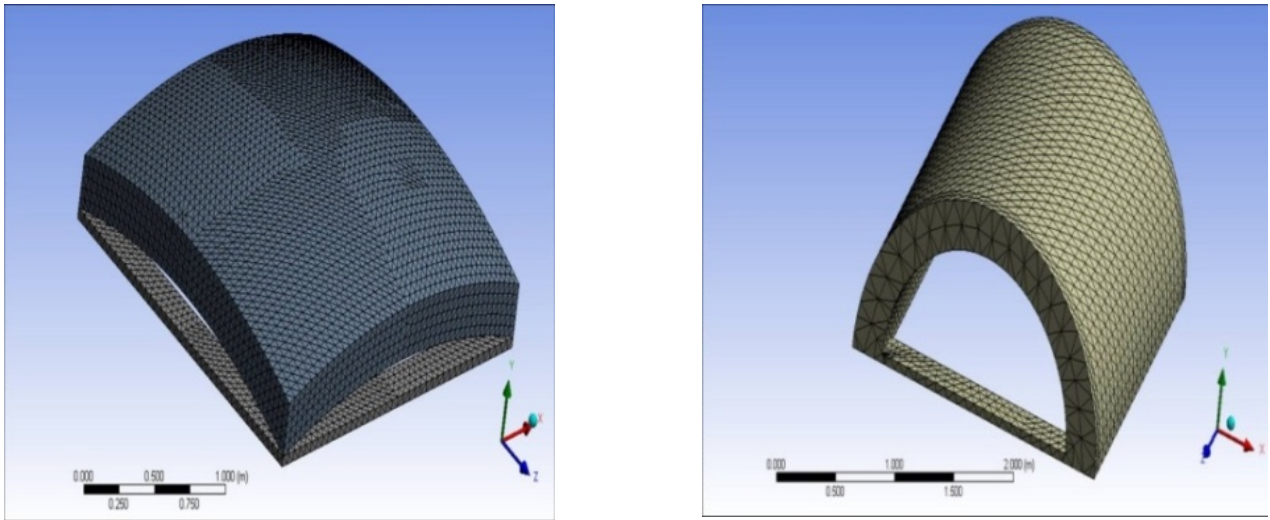


Рис. 5. Модель СЕ для оболонок різної кривизни

Окрім зазначеного, особливості розглянутих анізотропних оболонок різної гауссової кривизни полягали у властивостях обпирання, яке здійснено на кутові точки. Обпирання призначалось шарнірно нерухомим за чотирма кутовими точками оболонки в плані. Навантаження прикладалось рівномірно-розподіленим щодо поверхні циліндричної оболонки за наступними схемами: повна поверхня; 1/2 поверхні та 1/3 поверхні. А до сферичної оболонки - повна поверхня; 1/2 поверхні; 1/4 поверхні та 1/8 поверхні. Зважаючи на значну жорсткість конструкції, величина прикладеного рівномірно розподіленого навантаження становила 10 кН/м^2 .

У третьому розділі представлено постановку й реалізацію завдання щодо раціоналізації конструктивних параметрів запропонованих залізобетонних оболонок. За критерій для даної задачі обрано енергетичний принцип, згідно з яким із усього ряду можливих значень шуканих параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягне нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів, що описують систему, тобто

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1, 2, \dots, \infty : \quad (1)$$

де k – номер варіанта порівняння; $\alpha \in M$,

M – область допустимих значень геометричних параметрів.

Реалізація підходу за таких умов передбачає побудову взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи й одним або групою геометричних параметрів. У роботі реалізовано чисельні методи вирішення поставленого завдання на прикладі циліндричної оболонки, що має внутрішні порожнини прямокутної в плані форми (рис. 6). За інструментарій для вирішення поставленого завдання використовувалась зв'язка програмних продуктів компанії Autodesk. Основоположним тут є скрипт, розроблений у середовищі візуального

програмування Дупато, який дозволяє автоматично формувати геометрію оболонки шляхом задавання всіх необхідних параметрів із числа $\{x\}$.

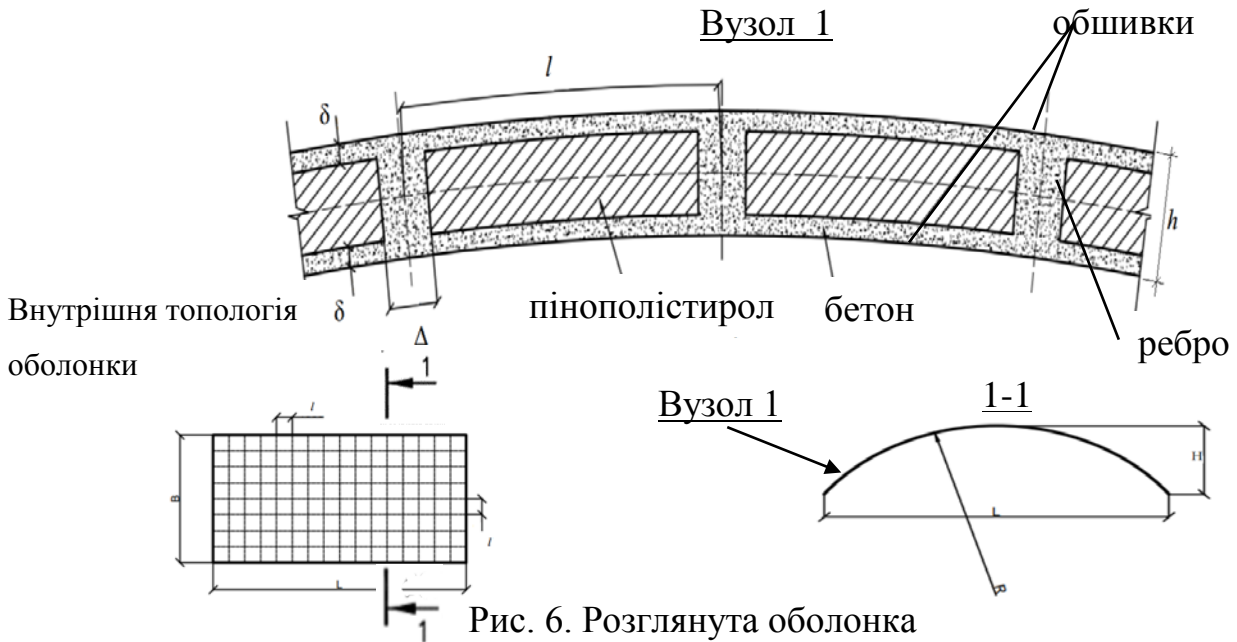


Рис. 6. Розглянута оболонка

У розгляд вводиться вектор керуючих параметрів даної системи:

$$\{x\}^T = \{H, B, V, R, L, l, q, \delta, \Delta, h\}, \quad (2)$$

де H – стріла підйому; B – довжина оболонки; V – об’єм матеріалу; R – радіус кривизни; L – проліт оболонки; l – крок ребер; q – зовнішнє навантаження; δ – товщина обшивок; Δ – товщина ребер; h – висота перерізу оболонки.

При цьому параметри H, B, R, L, q – позиціонуються як зовнішні, а параметри l, δ, Δ, h – як внутрішні.

У загальному вигляді процедура визначення НДС оболонки представлена алгоритмом (рис. 7).



Рис.7. Блок-схема алгоритму обчислювання НДС системи

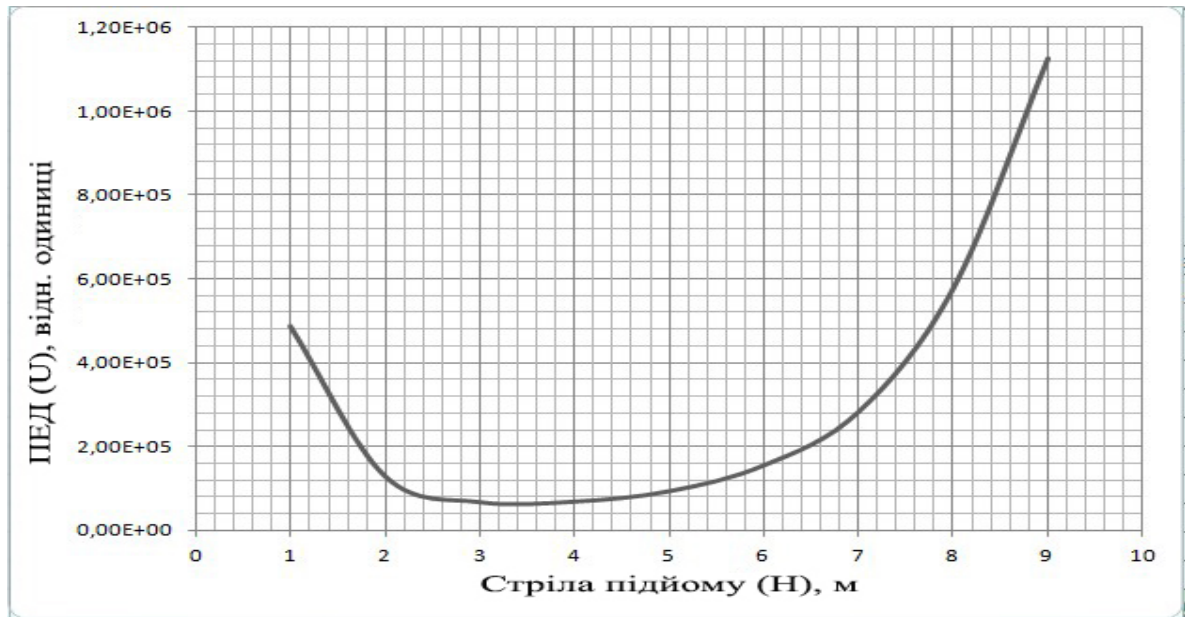
Запропонована процедура дозволяє в автоматичному режимі вибудовувати взаємозв'язок між ПЕД системи і будь-яким геометричним параметром, що її описує. Для ілюстрації розглянуто приклади пошуку зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів оболонки. При аналізі зовнішніх параметрів як змінний прийнято стрілу підйому $H \in (H [0; L / 2])$, інші параметри, що описують геометрію системи, прийнято такі: $V = 9000$ мм; $L = 18000$ мм; $h = 300$ мм, $\Delta = 100$ мм; $l = 1000$ мм. В якості навантаження прийнято власну вагу, обпирання призначено шарнірно нерухомим за двома поздовжніми ребрами, матеріал – бетон С25/30. Покрокове змінюючи параметр H , визначено його взаємозв'язок із величиною ПЕД системи, при цьому в усіх випадках об'єм матеріалу оболонки досі був незмінний – його сталість забезпечувалась шляхом підбору відповідного значення товщини обшивки δ . Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

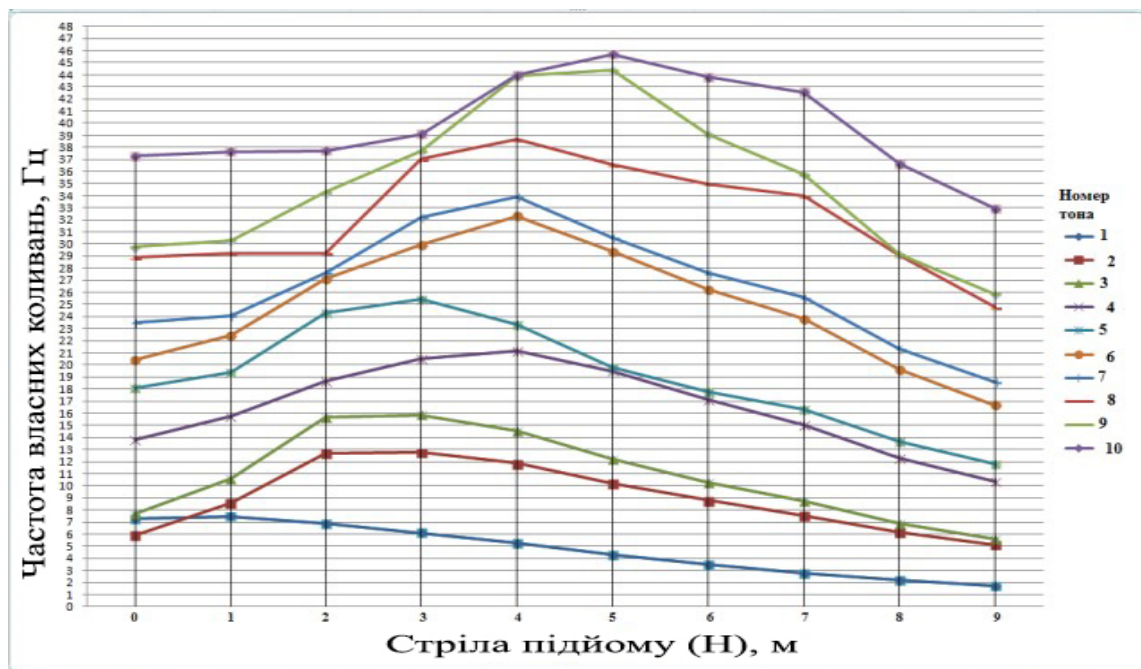
Результати розрахунку

Стріла підйому H	Об'єм матеріалу V	Радіус кривизни R	Товщина обшивок δ	Довжина дуги	ПЕД системи U
м	м ³	м	мм	м	відн. од
0	22,89	∞	50,60	18,00	5,75E+06
1	22,89	41,00	50,00	18,14	4,87E+05
2	22,89	21,25	47,30	18,58	1,30E+05
3	22,89	15,00	45,0	19,30	7,57E+04
4	22,89	12,12	40,70	20,28	6,93E+04
5	22,89	10,60	35,70	21,50	9,38E+04
6	22,89	9,75	31,50	22,93	1,55E+05
7	22,89	9,28	27,10	24,55	2,83E+05
8	22,89	9,06	22,40	26,34	5,77E+05
9	22,89	9,00	18,70	28,27	1,12E+06

На підставі отриманих даних побудовано графік залежності ПЕД від стріли підйому H (рис. 8, а), який уявляє собою унімодальну функцію. Визначено, що для заданих умов при $H \approx 3,8$ м ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H та оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки. Як видно із графіка (рис. 8, б), 7 із 10 тонів власних коливань приймають максимальне значення при значенні H близькому до раціонального. З умови досягнення еквівалентних напружень системи (σ_e) межі міцності матеріалу визначена q_{max} для оптимального значення H і значень на 1 м більше і менше від раціонального (4,8 і 2,8 м відповідно). Так при $H = 3,8$ м $q_{max} = 38,45$ кН/м²; при $H = 4,8$ м $q_{max} = 35,15$ кН/м²; при $H = 2,8$ м $q_{max} = 30,26$ кН/м².



а)



б)

Рис. 8. Взаємозв'язок стріли підйому H і:
а) ПЕД; б) частот власних коливань

Для подальшого аналізу за змінні параметри було прийнято крок внутрішніх ребер оболонки l (рис. 9). Решта атрибутів розрахункової моделі задані за аналогією з прийнятими раніше, за винятком товщини обшивки δ , яку в даному випадку прийнято рівною 50 мм, і стріли підйому H , прийнятої за 3,8 м. Сталість обсягу матеріалу у цьому разі забезпечувалась шляхом підбору відповідного значення товщини ребер Δ . Результати розрахунку наведені в табл. 2. і на графіку (рис. 10).

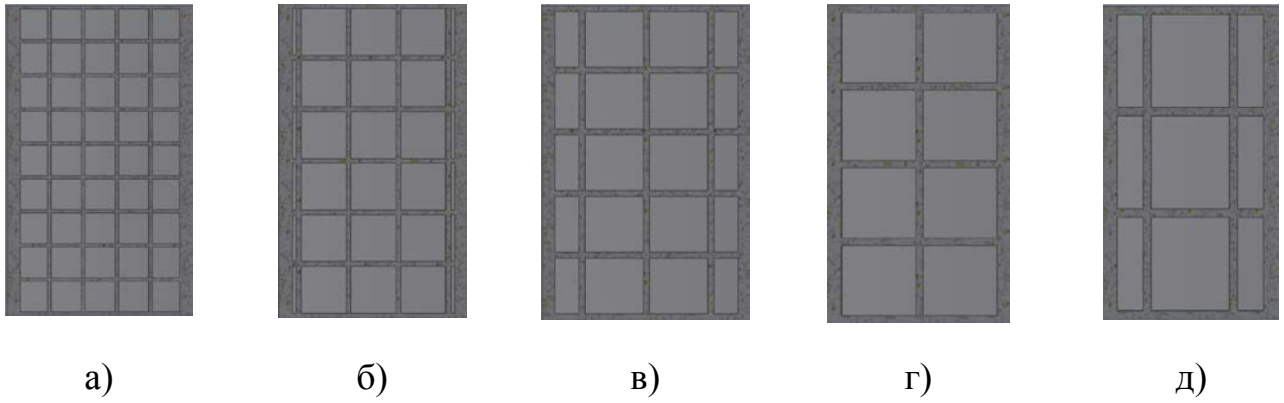


Рис. 9. Варіювання сіткою ребер. Крок ребер
а) 1000 мм; б) 1500 мм; в) 2000 мм; г) 2500 мм; д) 3000 мм

Таблиця 2.

Результати розрахунку

Крок ребер, l	Товщина ребер, Δ	Об'єм матеріалу, V	ПЕД системи, U
мм	мм	м ³	відн. од.
500	50	23,509	1,25125
1000	96,5	23,509	1,250747
1500	137,7	23,509	1,253351
2000	166,9	23,509	1,260031
2500	207,3	23,509	1,267818
3000	241,1	23,509	1,297566

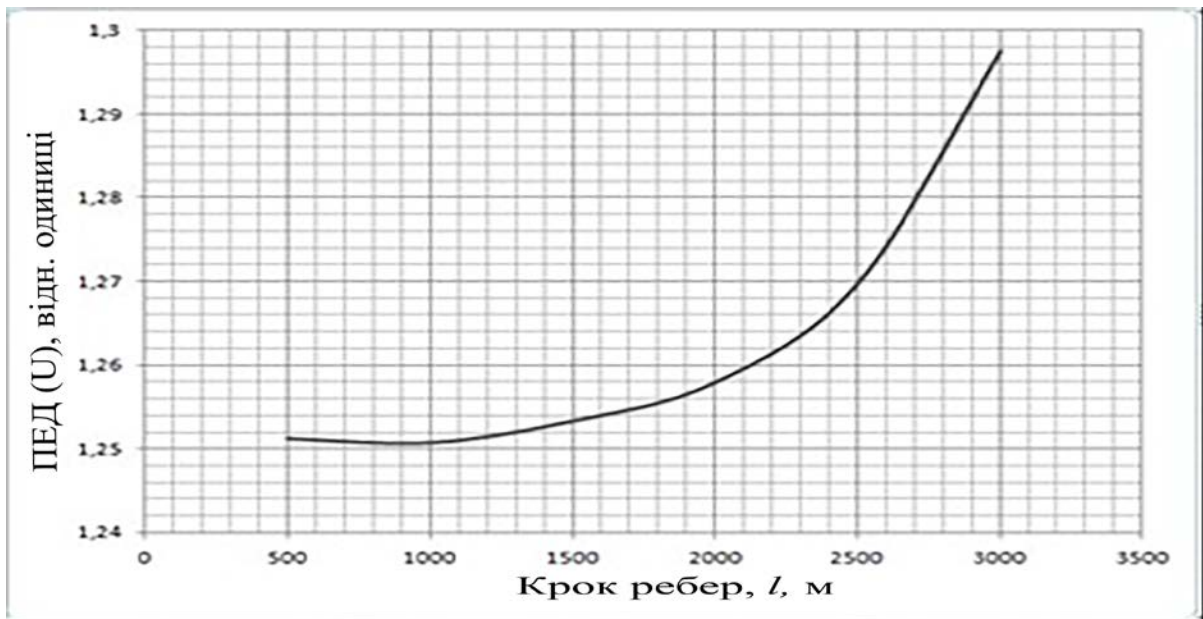


Рис. 10. Графік залежності енергії деформації U від кроку ребер

Як показує графік, при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі. Таким чином, запропонований підхід відкриває можливість визначення раціональних параметрів залізобетонних елементів, що мають складну зовнішню та внутрішню геометрію.

Наведений аналіз розширено завдяки вивченню розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр). У цьому разі критерієм буде залежність

$$e \rightarrow const, \quad (3)$$

де e – щільність потенційної енергії деформації (ЩПЕД).

Рівномірний розподіл поля ЩПЕД (ПК «Ліра») реалізовано за рахунок надання вкладишам-пустотоутворювачам складної форми. У цьому разі сітка ребер не є ортогональною.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням напружено-деформованого стану моделей оболонок при випробуванні їх гідравлічним методом. На першому етапі дослідження в лабораторії кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова були визначені фізичні параметри бетону конструкції шляхом випробування 4-х бетонних призм, відібраних у момент виробництва оболонок. Метою даного випробування було визначення фактичного модуля пружності (E_{ck}) і призмної міцності на стиск (f_{ck}) бетону оболонок.

Випробування проводились відповідно до методології, викладеної в ДСТУ Б.В.2.7 – 217:2009. На підставі усереднених даних, отриманих у ході випробування зразків, побудовано діаграму « σ - ϵ » бетону оболонок. Було отримано модуль пружності чисельно рівний 16 МПа. Арматура для залізобетонних оболонок приймалась конструктивно згідно ДСТУ 3760:2006 (ISO 6935-2:1991, NEQ). Клас арматурного прокату А400С та В500 – згідно з ДСТУ EN 10080:2009. Проведення експерименту гідравлічним методом анізотропних оболонок виконувалось рівномірно-розподіленим навантаженням по всій поверхні оболонок, 1/2 і 1/3 циліндричної оболонки й 1/2, 1/4 і 1/8 сферичної оболонки. Випробування проводились за температурою повітря 20-23⁰С, за відносної вологості 60 %. Випробування мали неруйнівний характер.

Перед початком проведення вимірювань деформацій випробовувані конструкції були повністю завантажені рівномірно-розподіленим навантаженням впродовж доби з навантаженням 1 т/м² для ліквідації усадочних деформацій фундаменту стенду. Випробування проводились послідовно з метою отримання статистичних даних. Кожна схема навантаження/розвантаження виконувалась 6 разів.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено спеціальні стенди, на які встановлювались оболонки (рис. 11, 12). Каркас стенду виготовлений із профілю квадратного перерізу 100x100x6 мм. Конструкція каркасу умовно забезпечувала точкове опираювання оболонок по чотирьох кутах. Висота каркасу для випробовувань була підібрана з урахуванням зручності доступу до нижньої поверхні оболонки, де розміщувались вимірювальні прилади. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок під час дії вертикальних короткочасних і тривалих навантажень наведено на рис. 13, 14.



Рис. 11. Каркас для випробувань



Рис. 12. Установлена циліндрична оболонка на каркас для випробувань

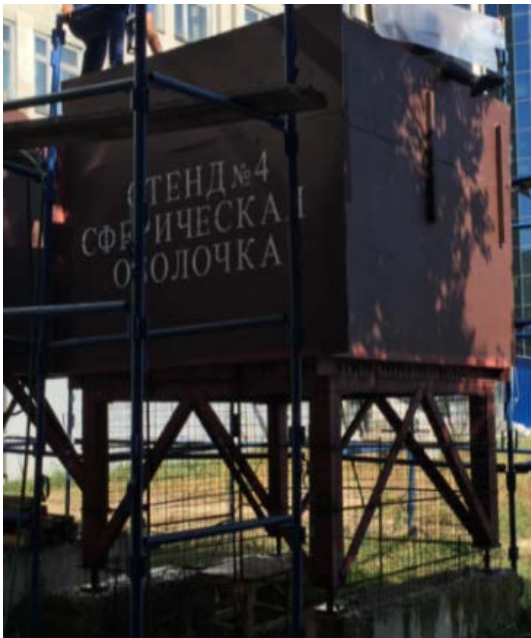


Рис. 13 Стенд для випробувань сферичної оболонки



Рис. 14 Стенд для випробувань циліндричної оболонки

Система навантаження. Дослідження виконувались запропонованим методом натурних випробувань плит і оболонок, впливом на їхню поверхню тиску стовпа рідини, що полягає у встановленні випробуваного зразка на опору, спорудженні безпосередньо над ним басейну, обмеженого встановленими по контуру випробуваного зразка щитами і розділеного за допомогою перегородок на окремі частини, та заповненні басейну водою. Перегородки були розташовані таким чином, що вони утворювали чарункову систему розподілу навантаження на будь-яку криволінійну поверхню випробуваного зразка, після чого встановлювались у чарунки гідроізолюючі поліетиленові футляри, дно яких контактувало з поверхнею випробуваного зразка, і заповнювалось водою, з можливістю прикладання гідравлічного тиску послідовно, зосереджено або ступенево на будь-яку частину чи на всю поверхню випробуваних плит і оболонок різної гауссової кривизни.

Стінки басейну і внутрішні перегородки виготовлялись із багатошарової дощатоклеєної фанери, товщина якої для зовнішніх стінок – 20 мм, для внутрішніх перегородок – 16 мм. Зовнішні стінки басейну опирались на випробовуваний каркас, а внутрішні перегородки жорстко прикріплювались до зовнішніх стінок за допомогою саморізів і клею. Між внутрішніми перегородками басейну й оболонкою встановлювався зазор 5 мм (рис. 15), таким чином забезпечуючи розподілення власної ваги басейну виключно на поверхню оболонки. У кожен із утворених чарунків закладалися спеціально виготовлені поліетиленові футляри, що в цілому забезпечувало герметичність басейну, виконуючи роль гідрофобної плівки (рис. 16, 17). Навантаження виконувалося у відповідності з теоретичними дослідженнями оболонок.



Рис. 15. Установлений зазор між перегородками і сферичною оболонкою



Рис. 16. Корегування рівня води у чарунках



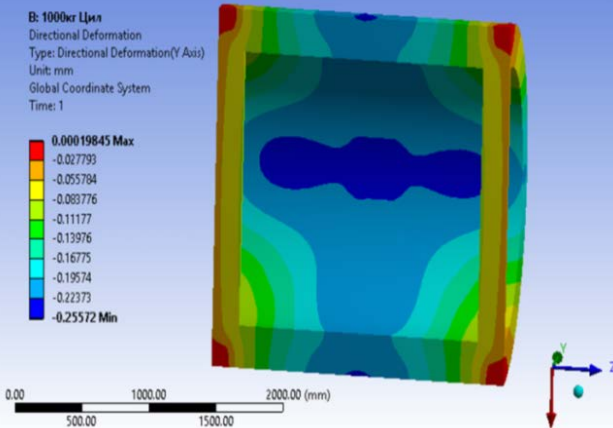
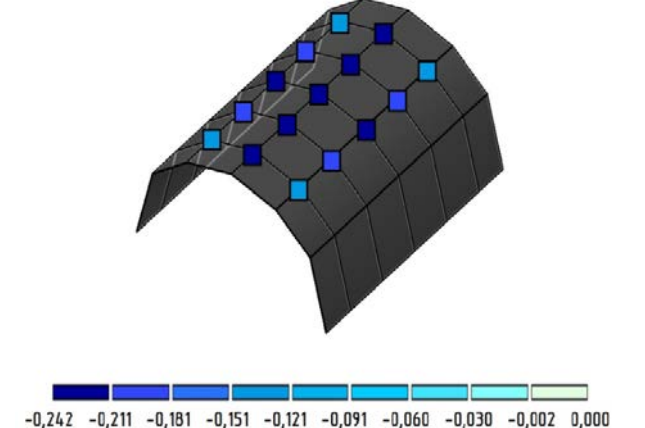
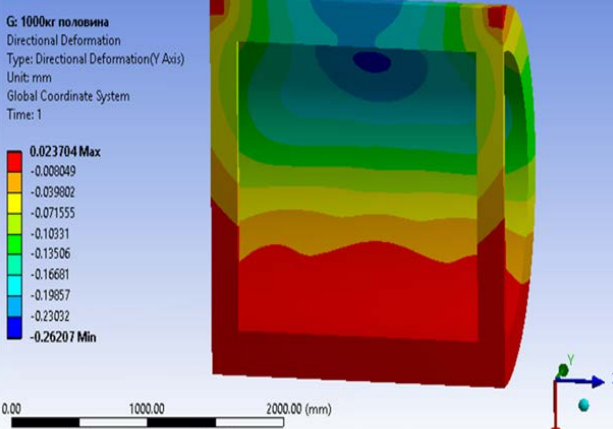
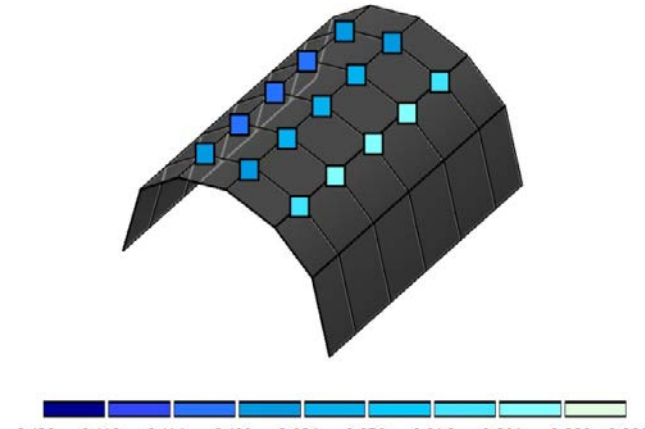
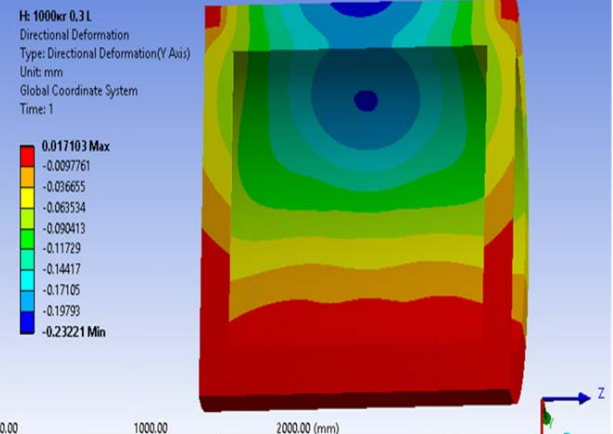
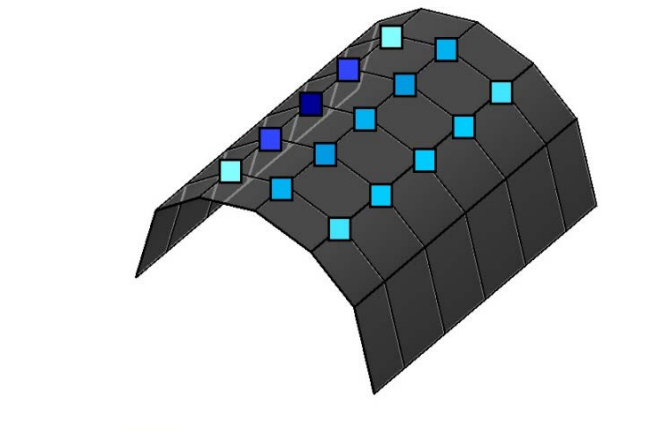
Рис. 17. Заповнення чарунків водою

Система вимірювання. Для визначення якісного й кількісного характеру деформування об'єкта дослідження здійснювались виміри переміщень циліндричної оболонки в 25-ти точках. Зважаючи на складність конфігурації конструкції, що у свою чергу зумовило появу як вертикальних, так і горизонтальних переміщень досліджуваної поверхні оболонки, під дією вертикального навантаження, вимірювання переміщень здійснювалось у двох напрямках.

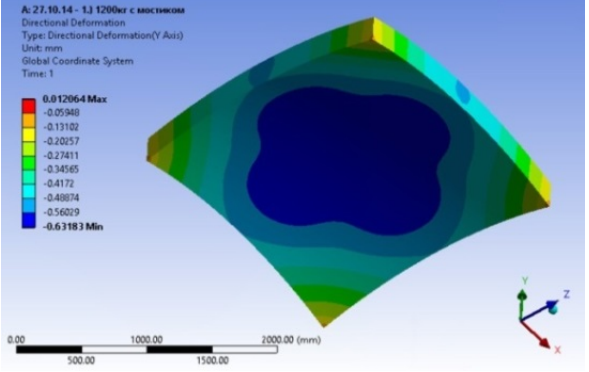
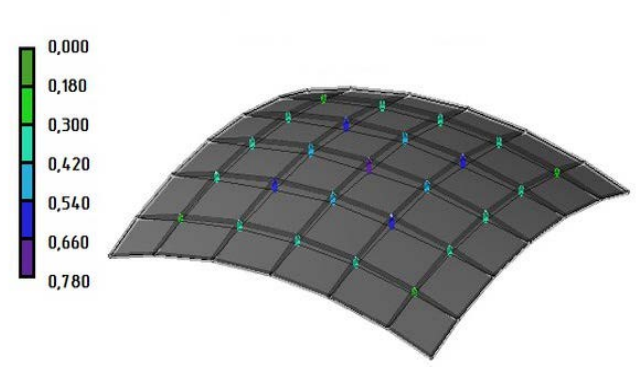
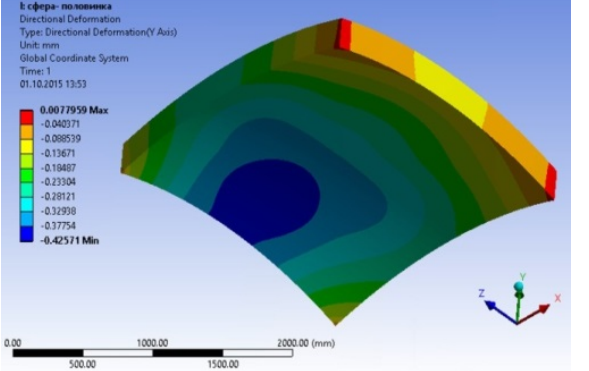
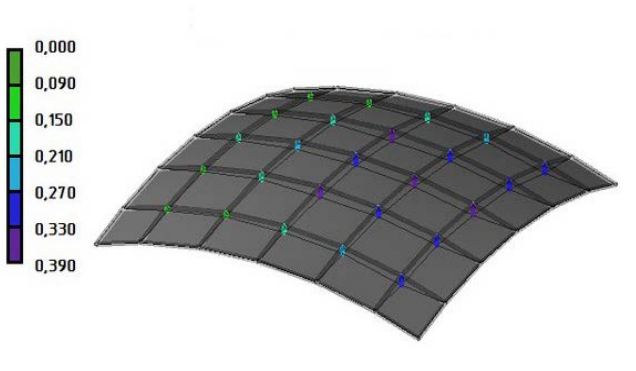
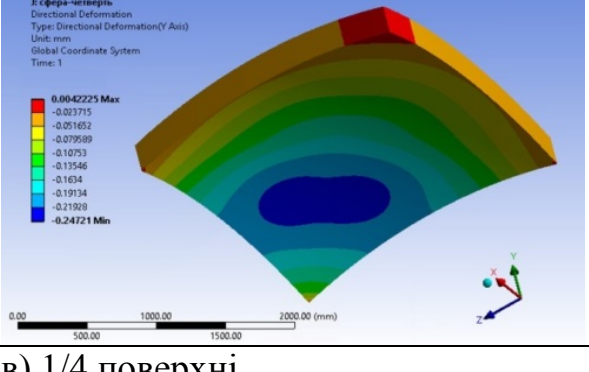
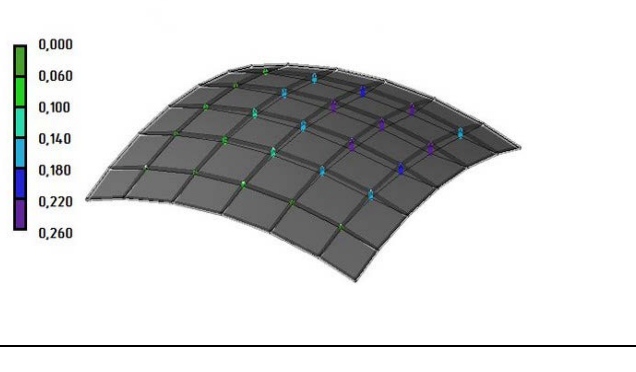
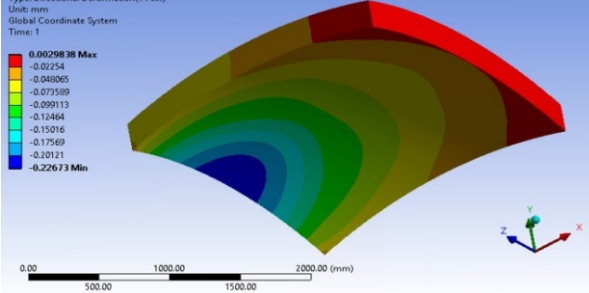
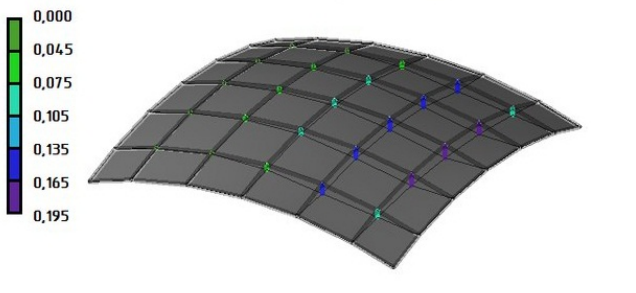
Аналіз досліджень. Аналіз проведених досліджень деформованого стану конструктивно-анізотропних оболонок свідчить, що при навантаженні 10 кН/м^2 максимальні величини переміщень під дією рівномірно-розподіленого навантаження дорівнюють: для циліндричної оболонки - 0,242 мм при повному навантаженні; 0,192 мм при навантаженні на 1/2 поверхні; 0,157 мм при навантаженні на 1/3 поверхні. Для сферичної оболонки 0,78 мм при повному навантаженні; 0,39 мм при навантаженні 1/2 поверхні; 0,26 мм при 1/4 поверхні; 0,195 мм на 1/8 поверхні.

Отримані дослідження доводять, що максимальна розбіжність між теоретичними й експериментальними значеннями переміщень конструктивно-анізотропних оболонок під дією рівномірно-розподіленого навантаження склала 15 %-17%. Таким чином, система навантаження, система вимірювання, розроблений і запатентований метод випробувань плит і оболонок різної гауссової кривизни в комплексі дозволили вирішити у процесі випробувань такі завдання: верифікувати отримані теоретичні данні експериментальним шляхом та оцінити деформований стан залізобетонних анізотропних оболонок (табл. 3, 4).

Таблиця 3. Порівняння теоретичних і експериментальних досліджень циліндричної оболонки

Теоретичне поле переміщень, мм	Експериментальне поле переміщень, мм
<p>В: 1000кр Цилн Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
<p>а) уся поверхня</p>	
<p>С: 1000кр половина Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
<p>б) 1/2 поверхні</p>	
<p>Н: 1000кр 0,3L Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
<p>в) 1/3 поверхні.</p>	

Таблиця 4. Порівняння теоретичних та експериментальних досліджень сферичної оболонки

Теоретичне поле переміщень, мм	Експериментальне поле переміщень, мм
<p>А: 27.10.14 - 1:1 1290мм с максимума</p> <p>Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
а) уся поверхня	
<p>Б: сфера-половина</p> <p>Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1 01.10.2015 13:53</p> 	
б) 1/2 поверхні	
<p>В: сфера-четверть</p> <p>Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
в) 1/4 поверхні	
<p>Г: сфера-восьмина</p> <p>Directional Deformation Type: Directional Deformation(Y Axis) Unit: mm Global Coordinate System Time: 1</p> 	
г) 1/8 поверхні	

В рамках проведеного дослідження була виконана оцінка вогнестійкості конструктивно-анізотропних залізобетонних конструкцій у вигляді чисельного експерименту, що моделює роботу конструкції при односторонньому нагріванні у режимі стандартної пожежі. Виконано розрахунки температурних полів для 30, 60, 90, 120, 180 і 240 хв. Під час аналізу чисельного експерименту поведінки конструкції при впливі на неї стандартної пожежі побудовано тривимірну SE модель конструктивної системи, яка дозволила вирішувати температурну задачу в нестационарних умовах. Розрахунки виконувались у середовищі ПК «Ansys». За утеплювач при розрахунку температур розглядався вогнетривкий екструдований пінополістирол. Отримано розподіл температури як по висоті бетонного перерізу, так і по утеплювачу (рис. 18).

На рис. 19 показано розподіл температури по висоті перерізу плити перекриття через 60 хв. після впливу стандартної пожежі, по товщині залізобетонного перерізу (ребро) і утеплювача (вкладка-пустотоутворювач).

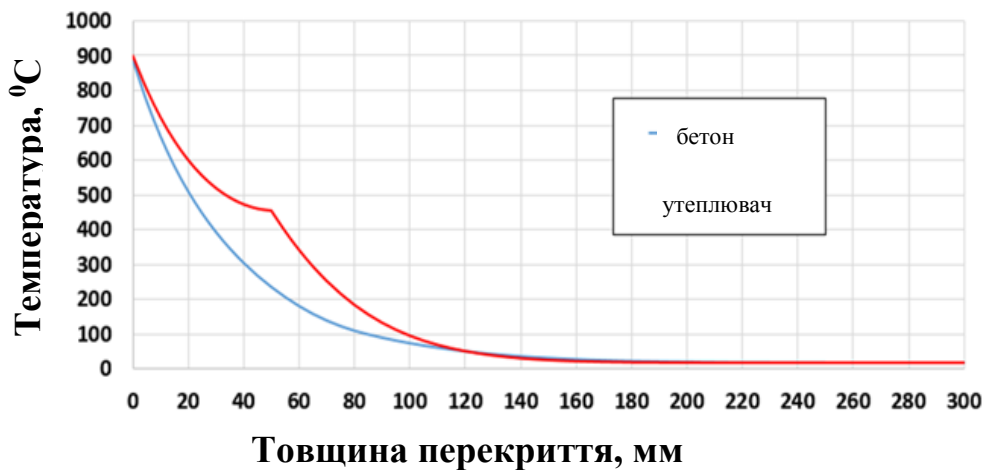


Рис. 18. Розподіл температури за висотою перерізу плити перекриття через 60 хв. при нагріванні в режимі стандартної пожежі

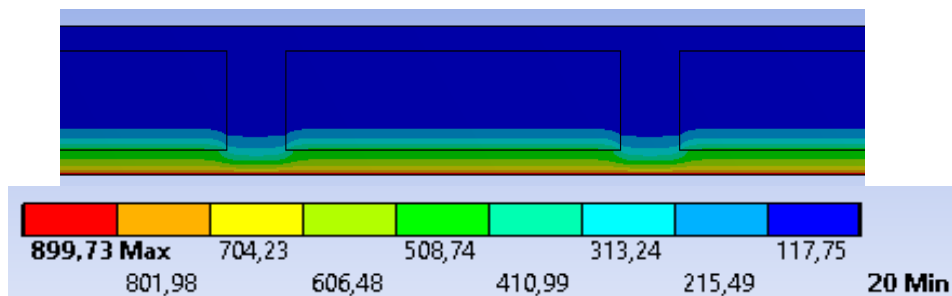


Рис. 19. Ізополі розподілу температур для визначених нормативними документами меж вогнестійкості для плити 300мм

Аналіз температурних ізополів показує, що при встановленні арматурних стрижнів на відстань 30 мм (при товщині обшивки 50 мм), у конструкції товщиною 300 мм діють температури по бетонному перерізу 395°C і по утеплювачу 520°C. Чисельний аналіз температурних полів анізотропних оболонок у нестационарних умовах дозволив оцінити їх вогнестійкість, яка дорівнює REI60.

У п'ятому розділі проведено чисельне дослідження НДС складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса, виконаної з важкого конструкційного бетону з вкладишами з пінополістиролу. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів у спеціалізованих програмних комплексах із додатковою обробкою вихідних даних. Наведено методику аналізу НДС великих об'ємних СЕ моделей будівельних конструкцій з урахуванням виникнення концентраторів напружень і можливості появи вироджених СЕ у результаті автоматичної триангуляції. Вирішено задачу порівняння НДС конструкції, модель якої виконана з об'ємних скінченних елементів, у ПК «Ansys» і ПК «ЛІРА-САПР». Порівняння показало відмінності в результатах по переміщенням до 1% і більш суттєві відмінності по головним напруженням - до 20%.

Об'єктом упровадження стали плити перекриття нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4 у м. Харкові. На рис. 20 наведено об'єкт упровадження, а на рис. 21 показано конструкцію перекриття у процесі зведення.



Рис. 20. Об'єкт упровадження.

Реабілітація нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4 у м. Харкові



Рис. 21. Конструкція перекриття у процесі зведення

У роботі наведено оцінку техніко-економічних показників розглядаємої залізобетонної анізотропної оболонки у порівнянні з класичною.

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень підтверджує її конкурентоспроможність, у порівнянні з вибраним аналогом, та що результати дисертаційної роботи доцільно використовувати при зведенні анізотропних оболонок різної гауссової кривизни (табл. 5).

Таблиця 5. Зіставлення техніко-економічних показників оболонок

№	Конструкція	Конструктивна товщина см	Приведена товщина см	Витрати матеріалів		Трудомісткість люд-год	Відносна вартість %
				арматура кг	бетон м ³		
1	Класична залізобетонна оболонка	300	300	1038	34,8	37,8	100
2	Розглянута залізобетонна анізотропна оболонка	300	150	555	17,9	47,5	65

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено задачу раціоналізації параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок, за рахунок побудови алгоритмів, які реалізують управління їх напружено-деформованим станом.

1. Обґрунтовано, що при застосуванні в якості критерія раціоналізації мінімального значення потенційної енергії деформації, зовнішні параметри оболонки (стріла підйому, крок ребер, тощо), що визначені, забезпечують максимальну несучу здатність конструкції, максимізацію частоти основного тону власних коливань та мінімальні прогини системи. Визначено, що для розглянутих конкретних умов при значенні стріли підйому $H \approx 3,8$ м потенційна енергія деформації досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H та оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки.

2. Шляхом аналізу енергетичного портрету системи визначені внутрішні параметри, що відповідають умові квазіізоенергетичності оболонки. Виконаний аналіз розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр) від кроку внутрішніх ребер для розглянутої оболонки показує, що значення потенційної енергії деформації при кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм досягає нижньої межі.

3. В результаті експериментальних та чисельних досліджень проведена верифікація переміщень конструктивно-анізотропних оболонок під дією рівномірно-розподіленого навантаження по всій поверхні оболонок, а також на 1/2 і 1/3 площі поверхні циліндричної оболонки й 1/2, 1/4 і 1/8 площі поверхні сферичної оболонки. Встановлено, що при навантаженні 10 кН/м^2 максимальні величини переміщень під дією рівномірно-розподіленого навантаження дорівнюють: для моделі циліндричної оболонки - 0,242 мм при повному навантаженні; 0,192 мм при навантаженні на 1/2 поверхні; 0,157 мм при навантаженні на 1/3 поверхні. Для моделі сферичної оболонки 0,780 мм при повному навантаженні; 0,390 мм при навантаженні 1/2 поверхні; 0,260 мм при навантаженні 1/4 поверхні; та 0,195 мм при навантаженні на 1/8 поверхні.

4. Уперше запропоновано і створено стенд і спосіб для натурних випробувань оболонок різної гауссової кривизни при дії різноманітних короткочасних та довготривалих навантажень.

5. Виконано чисельний аналіз поведінки конструкції в нестационарних умовах під впливом на неї стандартної пожежі. Виявлено, що у розглянутої конструкції товщиною 300 мм діють температури по бетонному перерізу 395°C і по утеплювачу 520°C . У зв'язку з чим, оцінена вогнестійкість конструктивно-анізотропних оболонок, яка дорівнює REI60.

6. Результати досліджень реалізовано при виконанні робіт по зведенню перекриття при реконструкції будівлі по майдану Павлівському, 4 у м. Харкові, а також при проектуванні архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Гапонова, Л.В. Рішення температурної задачі для неоднорідної багат шарової конструкції / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць «Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві». – ЛНТУ. – 2016. – Вип. 5. – С. 199-214.

2. Гапонова, Л.В. Оценка огнестойкости конструктивно-анизотропной железобетонной плиты / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, С.С. Гребенчук // Міжвідомч. наук.-техн. зб. (технічні науки) «Будівельне виробництво». – Київ, 2017. – № 62/1. – С. 57-63.

Міжнародні публікації або у збірниках, що входять до міжнародних наукометричних баз

3. Гапонова, Л.В. Експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованого стану сферичної оболонки покриття /Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 157. – С. 102-113.

4. Gaponova L.V. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell / L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk // Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering / Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University – 1(48) 2017. – С.108-120.

5. Гапонова, Л.В. Обследование и анализ архитектурно-конструктивных особенностей памятника архитектуры в городе Харькове / Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук, А.С. Константинов, Д.В. Чибаров // НВБ, 2017. – Т. 88. – № 2. – С. 124-131.

6. Гапонова, Л.В. Напряженно-деформируемое состояние архитектурно-композиционного комплекса в форме ленты Мебиуса / Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук // Зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 229-237.

Колективна монографія

7. Гапонова, Л.В. Архитектурно-композиционный комплекс в форме ленты Мебиуса // Л.В. Гапонова, П.А. Резник, О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 337-350.

Публікації апробаційного характеру:

8. Гребенчук, С.С. Теплоаккумулирующие ограждающие конструкции // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Енергозберігаючі технології теплогазопостачання, будівництва та муніципальної інфраструктури» ХНУМГ імені О.М. Бекетова м. Харків, 23 жовтня – 22 листопада 2013 р. – С.202-203.

9. Babaev, V. N. Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / V.N. Babaev, V.S. Shmukler, S.H. Feirushah, L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk,

O.A. Kalmikov // 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. – Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, 2016. – Iraq. p. 42-49.

10. Oleg Kalmykov. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 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.

11. Oleg Kalmykov. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 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.

Публікації, що додатково відображають матеріали дисертації:

12. Гапонова, Л.В. Напружено-деформований стан циліндричної оболонки / Л.В. Гапонова, О.О. Калмиков, С.С. Гребенчук // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – Вип. 126. – С. 9-18.

13. Гребенчук, С.С. Экспериментальные исследования железобетонных анизотропных оболочек / Гребенчук С.С. // Журнал «Бетон и железобетон в Украине». – Полтава, 2017. – С. 18-26.

14. Емельянова, И.А. Технологические особенности возведения сооружений криволинейной формы по строительной системе «Монофант» с использованием малогабаритного оборудования способом мокрого торкретирования / И.А. Емельянова, С.А. Гузенко, Д.О. Чайка, С.А. Бугаевский, Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук // Колективна монографія «Інноваційні технології в архітектурі і дизайні». – Харків: ХНУБА, 2017. – С. 323-330.

Патенти:

15. Пат. 113750 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. Стенд для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № у 201608761; заявл. 12.08.16; опубл. 10.02.17. Бюл. № 3.

16. Пат. 115153 Україна, МПК G01M 5/00; G01N 3/00. – Спосіб натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, С.С. Гребенчук, Л.В. Гапонова; заявник та патентовласник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. – № у 201608763; заявл. 12.08.16, опубл. 10.04.17, бюл. № 7/2017.

АНОТАЦІЯ

Гребенчук С.С. Рационалізація параметрів залізобетонних анізотропних оболонок. – На правах рукопису.

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, 2018.

Досліджено деформований стан анізотропних конструкцій для будівництва монолітних залізобетонних будівель промислового і цивільного призначення, а також різних споруд. У роботі виконані чисельні дослідження двопоясних анізотропних оболонок із ребрами в різних напрямках. Визначено взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропній оболонці між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати зовнішніх параметрів верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень стріли підйому H і оцінки максимальної несучої здатності (q_{max}) оболонки. Визначено, що для заданих умов при стрілі підйому $H \approx 3,8$ м ПЕД досягає нижньої межі.

У рамках проведеного дослідження вдосконалено експериментальний гідравлічний метод випробування оболонок різної гауссової кривизни. Уперше експериментально досліджено залізобетонні анізотропні конструкції, встановлено максимальні величини переміщень під дією рівномірно-розподіленого навантаження в 10 кН/м^2 . Під час аналізу чисельного експерименту поведінки конструкції під впливом на неї стандартної пожежі побудовано тривимірну СЕ модель конструктивної системи, вирішено температурну задачу в нестационарних умовах. Уперше чисельно досліджено оцінку вогнестійкості анізотропних оболонок, яка дорівнює REI 60. Вирішено задачу порівняння НДС конструкції, модель якої виконана з об'ємних скінченних елементів, в ПК «Ansys» і ПК «ЛІРА-САПР». Результати дисертаційної роботи впроваджені в ряді об'єктів, а саме: «Реабілітація нежитлової будівлі по майдану Павлівському, 4», та при проектуванні складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса в м. Харкові.

Ключові слова: напружено-деформований стан, математичне моделювання, рационалізація конструктивних параметрів, залізобетонна анізотропна оболонка.

АННОТАЦИЯ

Гребенчук С.С. Рационализация параметров железобетонных анизотропных оболочек. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Исследовано деформированное состояние анизотропных конструкций для строительства монолитных железобетонных зданий промышленного и гражданского назначения, а также различных сооружений. В работе выполнены многочисленные исследования двухпоясных анизотропных оболочек с ребрами в разных направлениях. Определена взаимосвязь рациональных параметров в конструктивно-анизотропной оболочке между ПЭД системы внешних и внутренних рациональных параметров: при величине шага ребер близкой к $l \approx 1000$ мм ПЭД достигает нижнего предела. Полученные результаты внешних параметров верифицированы путем анализа частот собственных колебаний системы для всех значений стрелы подъема H и максимальной несущей способности (q_{max}) оболочки. Определено, что для заданных условий при стреле подъема $H \approx 3,8$ м ПЭД достигает нижнего предела.

В рамках проведенного исследования усовершенствован экспериментальный гидравлический метод испытания оболочек различной гауссовой кривизны. Впервые экспериментально исследованы железобетонные анизотропные конструкции, установленные максимальные величины перемещений от равномерно-распределенной нагрузки в 10 кН/м². При анализе численного эксперимента поведения конструкции при воздействии на нее стандартного пожара построена трехмерная КЭ модель конструктивной системы, решена температурная задача в нестационарных условиях. Впервые численно проведена оценка огнестойкости рассматриваемых анизотропных оболочек, равная REI 60. Решена задача сравнения НДС конструкции, модель которой выполнена из объемных конечных элементов, в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР». Результаты диссертационной работы внедрены в ряде объектов, а именно: «Реабилитация нежилого здания на площади Павловской, 4» и при проектировании сложного архитектурно-композиционного сооружения в форме ленты Мебиуса в г. Харькове.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, рационализация конструктивных параметров, железобетонная анизотропная оболочка.

ABSTRACT

Hrebenchuk S.S. Rationalization of the parameters of reinforced-concrete anisotropic shells. – Qualification Scholarly Manuscript.

Ph.D. Thesis in Engineering Science in the specialty 05.23.01 “Building structures, houses and facilities” (192 – Construction and civil engineering). – Ukrainian State University of Railway Transport of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The present Paper researches the deformed condition of the anisotropic constructions for the site-cast concrete buildings for the industrial and civil purposes. The work provides numerous analyses of the two-facial anisotropic shells with the ribs in different directions. The determined interconnection of the rational parameters of the constructive anisotropic shell between SPE of the system of internal and external rational parameters: with ribs step value of about $l \approx 1000$ mm SPE reaches the lower limit. The obtained results of the external parameters are verified through the analysis of the

frequencies of the systems natural vibration frequencies for all values of rise H and maximum shell bearing capacity (q_{\max}). It was determined that for the conditions at the camber of arch $H \approx 3,8$ m SPE reaches the lower limit.

Within this research, the experimental hydraulic method of testing the different Gaussian curvature shells was improved. For the first time the reinforced-concrete anisotropic constructions were experimentally researched, the maximum values of shifts were established from the evenly distributed load in 10 kN/m^2 . When analyzing the numerical experiment of the construction behavior during the impact of the standard fire on it, the standard three-D structural system FE model was created which allowed solving the temperature task under unsteady conditions. The numerical analysis of the temperature fields of the anisotropic shells under unsteady conditions allowed assessing their fire-resistance which is equal to REI 60. The task was solved of the comparison of stress-strained condition structure, the models of which was made of the three-D finite-elements, at Ansys and LIRA-SAPR SC. The Thesis results are implemented in a number of objects, mainly: “The reconstruction of building in 4 Pavlovskaya str”, when constructing the complex architectural and compositional building in the form of Mobius band in Kharkov.

Key words: stress-strained condition, mathematic modeling, rationalization of the constructive parameters, reinforced-concrete anisotropic shell.