

УДК 69.036.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННОГО СТАНУ СФЕРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПОКРИТТЯ

Канд. техн. наук Л.В. Гапонова, канд. техн. наук О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОКРЫТИЯ

Канд. техн. наук Л.В. Гапонова, канд. техн. наук О.А. Калмыков, С.С. Гребенчук

EXPERIMENTAL-THEORETICAL RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE SPHERICAL SHELL COVERING

Cand. of techn. sciences L. Gaponova, cand. of techn. sciences O. Kalmykov, S. Grebenchuk

У статті досліджено характер деформування фрагменту сферичної оболонки покриття системи «Монофант».

Стаття містить результати експериментально-теоретичного дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції покриття, що має складну зовнішню і внутрішню геометрії. Отримана в результаті дослідження інформація зумовлює більш коректне відображення навантаження розглянутої оболонки сніговим навантаженням.

Ключові слова: сферична оболонка покриття, гідростатичний метод, експериментальні дослідження, напружено-деформований стан.

В статье исследован характер деформирования фрагмента сферической оболочки покрытия системы «Монофант».

Статья содержит результаты экспериментально-теоретического исследования напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции покрытия, имеющей сложную внешнюю и внутреннюю геометрии. Полученная в результате исследования информация предопределяет более корректное отображение нагружения рассмотренной оболочки снеговой нагрузкой.

Ключевые слова: сферическая оболочка покрытия, гидростатический метод, экспериментальные исследования, напряженно-деформированное состояние.

The paper contains the results of experimental and theoretical research of the stress-strain state of reinforced concrete roof structure which has complex internal and external geometries. By the complex external geometry refers the spherical surface of the shell shape and by complex internal - that it contains voids filled with insulation material. The paper assessed the technological aspects of the production of monolithic reinforced concrete structures specified form, fabricated by method of wet shotcrete. In turn, built finite element model of the structure allows analyzing the impact of qualitative and quantitative attributes describing the load applied to the surface of the shell to the nature of its deformation. Experimental verification of the theoretical data was obtained in the laboratory. Investigated shell model with plan dimensions was 2.2 x 2.2 meters. The loading was carried out by hydrostatic method (by the device over the surface of the shell a special "honeycomb" pool with filled water). Designed for the experimental measurement system has allowed building the package surface shell deformation under various schemes of loading. These findings determine more correct display of load considered shell by snow load.

Keywords: spherical shell coating; hydrostatic method; experimental studies; stress-deformovannyy state.

Вступ. Технологічні процеси та прийоми сучасного монолітного будівництва, а також сучасний стан теорії розрахунку залізобетонних

конструкцій у цілому, дають змогу створювати довільні криволінійні конструктивні форми, проектувати і зводити будівлі та споруди,

унікальні за своєю архітектурою, з довільним плануванням приміщень, великими прогонами і т.д. Однак, як правило, сміливі і нестандартні рішення архітекторів, унікальність яких нерідко забезпечується за рахунок створення несучих конструктивних елементів складної конфігурації, призводять до значного подорожчання проекту, викликаного в першу чергу чималою перевитратою матеріалу, а також необхідністю розроблення унікальних технологічних операцій і виготовленням «разової» опалубки.

У зв'язку зі сказаним запропонована нова конструктивна система «Монофант» (аббревіатура: монолітна фантазія), яка спрямована на вирішення вищезазначеної проблеми [1]. Відмінною особливістю цієї системи є використання всередині монолітного залізобетонного елемента вкладишів-пустотоутворювачів. Вкладиші можуть бути виконані з будь-якого доступного, легкого матеріалу (наприклад, пінополістиролу, пінопласту, пінополіуретану та ін.). Поміщені всередині залізобетонної оболонки вкладиші перетворюють переріз згинаного елемента з прямокутного у двотавровий, одна полиця якого сприймає напруги розтягнення, інша – стиснення. На стадії проектування визначається необхідна товщина залізобетонних полиць перерізу, виходячи з чого призначаються розміри вкладиша.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Поставлені в статті завдання вирішувались із застосуванням методів, що базуються на основних положеннях фізичного і математичного моделювання. По завершенню теоретичного аналізу виконані експериментальні дослідження напружено-деформованого стану фрагментів нової конструктивної будівельної системи багатокритеріальної відповідності «Монофант» гідростатичним методом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Моделюванням та розрахунком таких систем, з урахуванням їх особливостей займалися безліч видатних науковців: О.К. Аксентян, П.А. Жилін, Е.І. Григолюк, А.Л. Гольденвейзер, Л.М. Кондратьєва, А.І. Лур'є, І. Мек'явік, В.В. Новожилов, А.В. Погорелов, Ю.Н. Работнов, І.Г. Терегулов, С.П. Тимошенко, В.С. Черніна, К.Ф. Черних, В.С. Шмуклер та ін. [2-7].

У роботі [2] проведено аналіз деформативного стану найвідоміших залізобетонних сферичних оболонок, автор – доктор наук Івана Івана Мек'явік описує важливість саме для оболонок досліджувати не тільки деформативну, але й постдеформативну поведінку, оскільки вона має безпосередній вплив на величину руйнівного навантаження.

Автором виявлена залежність значення критичного навантаження від геометрії оболонки, матеріалу, з якого виготовлена оболонка, розташування арматурної сталі і типу навантаження. Також встановлено, що сферичні оболонки можуть бути надзвичайно чутливі до незначних відхилень від ідеальних параметрів (геометрія, граничні умови, нелінійні властивості матеріалів тощо).

П.А. Жилін у своїх роботах [3] розглянув теорії простих оболонок, а також двошарових та тришарових оболонок симетричної побудови та постійної товщини. За допомогою наведеного методу стає можливим розглядати оболонки складної внутрішньої побудови, чого не можна зробити при класичних методах розрахунку (у тому числі через їх складність).

Напружено-деформований стан кривих оболонок детально розглянула д-р техн. наук Л.М. Кондратьєва у своїй роботі [4]. Вона довела, що такі оболонки раціонально використовувати у будівлях з великими прогонами, оскільки зломи серединної поверхні працюють як ребра жорсткості. При цьому параметри Ляме та кривизни оболонки повинні відповідати рівнянням Кодацци-Гаусса. Математична модель оболонки урахує геометричні та фізичні співвідношення, функціонал повної енергії деформації, з умови мінімуму якого отримують рівняння рівноваги в переміщеннях.

Безмоментна теорія А.Л. Гольденвейзера [5] при розрахунку напружено-деформованого стану базується на тому, що, окрім основного напруженого стану, в оболонці виникають крайові ефекти, які мають локальний характер. Для розрахунку напружено-деформованого стану ці фактори розраховуються окремо, а потім об'єднуються за допомогою задавання краєвих умов для оболонки.

Закономірності включення у залізобетонну конструкцію вкладишів із іншого матеріалу та принцип розрахунку таких конструкцій викладено у роботі [6].

У роботі [7] описані принципи розроблення оптимальних будівельних структур. З урахуванням цих факторів було розроблено декілька систем, зокрема «РАМПА», «ІКАР», «ДОБОЛ».

Визначення мети та задачі дослідження

Мета дослідження – дослідити характер деформування фрагменту сферичної оболонки покриття системи «Монофант».

Для досягнення мети поставлені такі задачі:

1. Дослідити напружено-деформований стан (НДС) полегшеної сферичної оболонки покриття.

2. Порівняти отримані експериментальні дані з теоретичними та підтвердити коректність розрахункової моделі оболонки.

Об'єкт дослідження – фрагмент сферичної оболонки покриття, що має розміри в плані 2200x2200 мм. Загальна схема конструкції наведена на рис. 1. Зовнішня і внутрішня бетонні обшивки вироблялися товщиною 50 мм, а між ними розташовувався вкладиш-пустотоутворювач з екструдованого пінополістиролу товщиною 160 мм. Обшивки армовано однаково сіткою 200x200 мм, $d = 6$ мм. По діагональних напрямках оболонки розташовувалися забезпечуючі спільну роботу обшивок ребра шириною 100 мм, які армовані плоским каркасом з $d = 10$ мм.

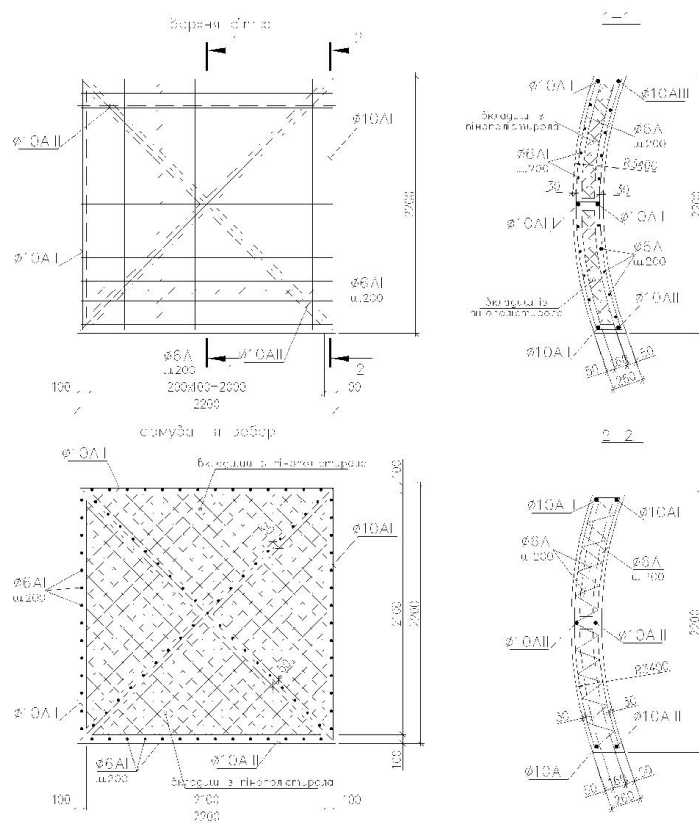


Рис. 1. Геометрія й армування оболонки

Основна частина дослідження, отримана в результаті дослідження. Розроблена конструктивна система «Монофант» потребує аналізу напружено-деформованого стану запроєктованого і виготовленого фрагмента сферичної оболонки покриття. Як відомо, для північноєвропейського регіону в цілому,

зокрема для України, найбільш суттєвою складовою навантаження на елементи покриття будівель і споруд є снігове навантаження. Урахування впливу снігового навантаження регламентується як загальноєвропейськими, так і національними нормами [10, 11], при цьому найбільш впливовим фактором на величину і

характер розподілу навантаження від снігового навантаження є конфігурація поверхні покриття. Ураховуючи сказане, в рамках цього дослідження побудована скінченноелементна модель розробленої оболонки в середовищі ПК «ANSYS» (рис. 2). Інструментарій згаданого розрахункового комплексу дає змогу проводити автоматичну триангуляцію складних форм на

кінцеві об'ємні елементи шляхом автоматичного імпорту з допоміжного програмного комплексу тривимірного моделювання (у цьому випадку використовувався ПК «Autodesk Inventor»). Побудована модель складалася з 459 061 елементів і 261 791 вузлів.

На рис. 2 показано побудову сітки скінченних елементів для розглянутого об'єкта.

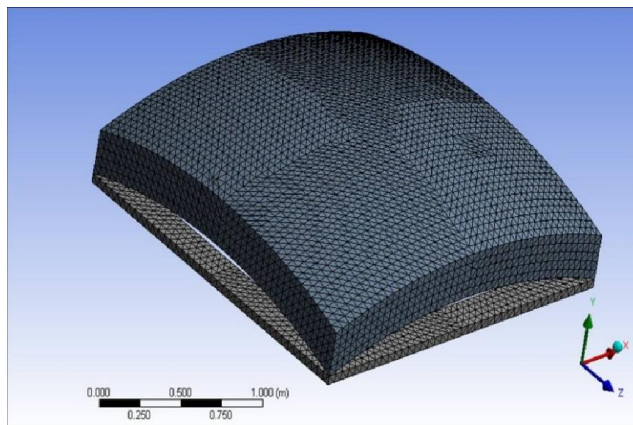


Рис. 2. Побудова сітки скінченних елементів для оболонки

Експериментальні дослідження анізотропної оболонки. Для випробовування використовувався метод дослідження, оснований на гідростатичному навантаженні, коли навантаження задається вагою води, та її величина регулюється висотою водяного стовпа [8, 9].

За основу для наведених випробовувань використали пристрій для натурних випробовувань плит та оболонок при дії вертикальних короточасних та довготривалих навантажень (рис. 3) [8].

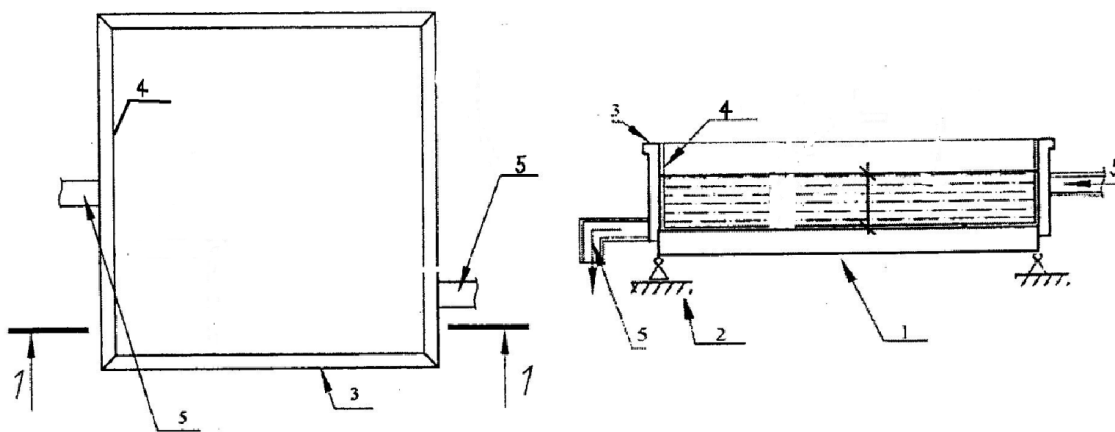


Рис. 3. Схема пристрою для натурних випробовувань

Пристрій має у собі випробовувану конструкцію 1, установлену на опори 2, щитки 3, що створюють резервуар та встановлені по контуру навантажуваної області, гідрофобну плівку 4 усередині резервуара, підвідні та

відвідні патрубки 5. Ця конструкція відзначається простотою та невеликою вартістю, вона легко сполучається із системою вимірювання. У випробуваннях сферичної

оболонки цій пристрій набув вигляду стенда, зображеного на рис. 4.

Для проведення експериментальних досліджень оболонка була встановлена на спеціально виготовлений каркас (рис. 4, 5), виконаний з профілю квадратного перерізу



Рис. 4. Стенд для випробовувань сферичної оболонки



Рис. 5. Каркас для випробовувань

Система вимірювання. Для визначення якісного та кількісного характеру деформування об'єкта дослідження виконувалися заміри вертикальної складової переміщень оболонки у 25 точках (рис. 6, 7). Беручи до уваги значну жорсткість досліджуваної конструкції, котра в свою чергу є основним фактором малості величин очікуваних переміщень, у реальному експерименті

використовувалися індикатори годинникового типу з ціною поділки шкали 2 мк та ходом штока 2 мм (рис. 8, 9). Індикатори закріплювалися у вказаних точках за допомогою спеціально виготовлених каркасів, виконаних із профілю квадратного перерізу 40x3 мм та металевого прута 10x10 мм, котрі у свою чергу за допомогою зварювання прикріплювалися до основного експериментального каркаса.



Рис. 6. Конструкція для закріплення індикаторів

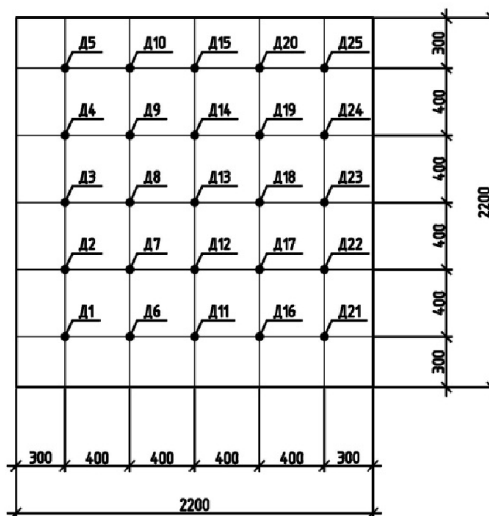


Рис. 7. Схема розстановки індикаторів



Рис. 8. Індикатори годинникового типу



Рис. 9. Закріплення індикаторів

Система навантаження. Навантаження досліджуваної оболонки виконувалося гідростатичним методом, який дає змогу максимально точно, на думку авторів, моделювати дію рівномірно-розподіленого навантаження, що прикладене до поверхні конструкції. Цей метод припускає спорудження над досліджуваною конструкцією спеціального басейну, при заповненні рідиною якого створюється гідростатичний тиск на дно басейну, котрим, власне, і є поверхня об'єкта

дослідження. Ураховуючи складність конфігурації навантажуваної поверхні дослідження, для рівномірного розподілення тиску від стовпа води стало необхідним спорудження додаткових перегородок усередині басейну у подовжньому та поперечному напрямках. Таким чином, споруджений над оболонкою басейн являв собою комірчасту систему, що складається з 121 комірки розмірами 200x200 мм та має висоту 1200 мм (рис. 10, 11).



Рис. 10. Комірчаста система, споруджена над оболонкою



Рис. 11. Загальний вигляд комірчастого басейну

Стінки басейну та внутрішні перегородки виконувалися із семишарової дощатоклеєної фанери, товщина якої для зовнішніх стінок –

20 мм, для внутрішніх перегородок – 10 мм. Зовнішні стінки басейну опиралися на випробуваний каркас, а внутрішні

перегородки жорстко прикріплювалися до зовнішніх стінок за допомогою саморізів та клею. Між внутрішніми перегородками басейну та оболонкою встановлювався проміжок 10 мм (рис. 12), що під час зведення заповнювався монтажною піною, тим самим забезпечуючи розподілення власної ваги басейну виключно на каркас для випробовувань.



Рис. 12. Установлений проміжок між внутрішніми перегородками басейну та оболонкою

У кожному із утворених комірок улаштувалися спеціально виготовлені поліетиленові футляри, що в цілому забезпечували герметичність басейну, виконуючи роль гідрофобної плівки (рис. 13-18).

Навантаження виконувалося за чотирма схемами, аналогічними теоретичним дослідженням оболонки (рис. 19).



Рис. 13. Корегування рівня води у комірках



Рис. 14. Заповнення комірок водою



Рис. 15. Корегування рівня води у комірках



Рис. 16. Комірка, заповнена водою

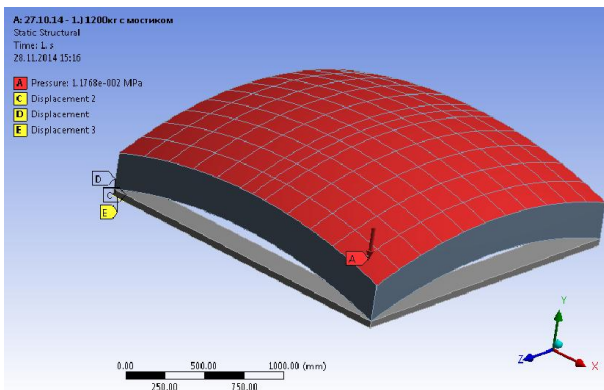


Рис. 17. Комірки, заповнені водою

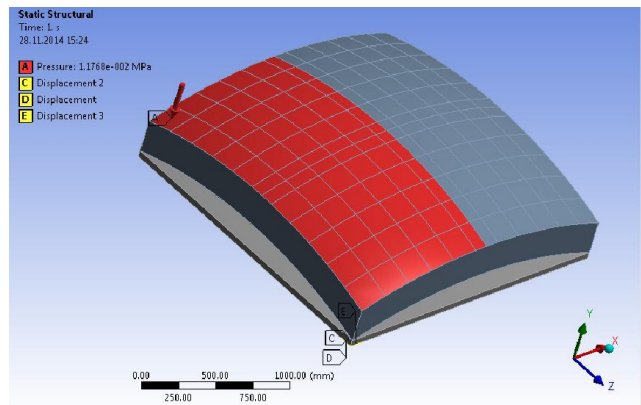


Рис. 18. Комірки, заповнені водою

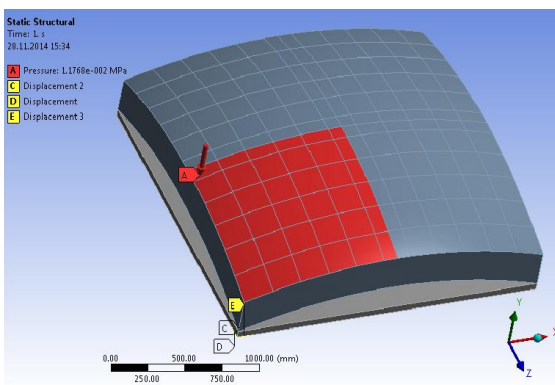
а



б



в



г

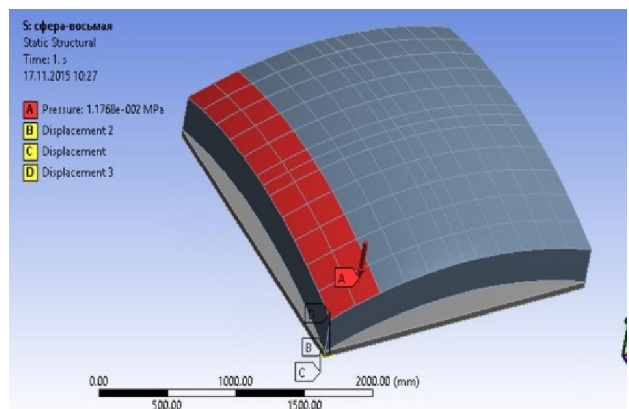


Рис. 19. Схеми навантаження: а – повна; б – 1/2 поверхні; в – 1/4 поверхні; г – 1/8 поверхні

За кожною з чотирьох схем виконувалося 6 незалежних циклів завантаження/розвантаження. До аналізу бралися усереднені дані

за результатами проведення шести завантажень, що наведені у таблиці та на рис. 20.

Усереднені дані індикаторів

| Датчик | Вертикальні переміщення, мм | | | | | | | |
|--------|-----------------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
| | повне | Δ | 1/2 поверх- ні | Δ | 1/4 поверх- ні | Δ | 1/8 поверх- ні | Δ |
| 1 | 0,275 | 0,021 | 0,117 | 0,004 | 0,044 | 0,026 | 0,016 | 0,006 |
| 2 | 0,382 | 0,009 | 0,136 | 0,000 | 0,055 | 0,024 | 0,023 | 0,006 |
| 3 | 0,419 | 0,082 | 0,153 | 0,021 | 0,068 | 0,013 | 0,027 | 0,007 |
| 4 | 0,377 | 0,013 | 0,133 | 0,003 | 0,051 | 0,003 | 0,020 | 0,009 |
| 5 | 0,264 | 0,030 | 0,115 | 0,006 | 0,039 | 0,031 | 0,015 | 0,007 |
| 6 | 0,383 | 0,008 | 0,157 | 0,023 | 0,142 | -0,021 | 0,042 | 0,001 |
| 7 | 0,597 | -0,021 | 0,195 | 0,004 | 0,149 | -0,018 | 0,054 | 0,000 |
| 8 | 0,496 | 0,026 | 0,197 | 0,011 | 0,159 | -0,003 | 0,063 | -0,004 |
| 9 | 0,590 | -0,014 | 0,185 | 0,014 | 0,093 | 0,003 | 0,049 | 0,005 |
| 10 | 0,387 | 0,004 | 0,153 | 0,027 | 0,050 | 0,004 | 0,039 | 0,003 |
| 11 | 0,417 | 0,084 | 0,231 | 0,020 | 0,208 | 0,014 | 0,077 | -0,009 |
| 12 | 0,490 | 0,031 | 0,257 | 0,031 | 0,231 | -0,014 | 0,091 | 0,000 |
| 13 | 0,686 | -0,054 | 0,281 | 0,022 | 0,178 | -0,026 | 0,096 | -0,001 |
| 14 | 0,495 | 0,026 | 0,265 | 0,023 | 0,156 | -0,005 | 0,095 | -0,004 |
| 15 | 0,420 | 0,081 | 0,241 | 0,010 | 0,064 | 0,019 | 0,080 | -0,012 |
| 16 | 0,384 | 0,007 | 0,295 | 0,005 | 0,233 | -0,016 | 0,108 | -0,016 |
| 17 | 0,595 | -0,019 | 0,331 | -0,010 | 0,237 | 0,011 | 0,130 | -0,008 |
| 18 | 0,498 | 0,021 | 0,349 | 0,012 | 0,227 | -0,018 | 0,184 | -0,015 |
| 19 | 0,593 | -0,017 | 0,335 | -0,006 | 0,151 | -0,020 | 0,127 | -0,005 |
| 20 | 0,381 | 0,010 | 0,308 | -0,008 | 0,059 | 0,020 | 0,103 | -0,012 |
| 21 | 0,268 | 0,026 | 0,238 | -0,039 | 0,178 | 0,021 | 0,120 | -0,017 |
| 22 | 0,386 | 0,004 | 0,349 | -0,008 | 0,236 | -0,013 | 0,138 | -0,011 |
| 23 | 0,413 | 0,088 | 0,405 | -0,007 | 0,211 | 0,011 | 0,223 | 0,003 |
| 24 | 0,380 | 0,010 | 0,358 | -0,017 | 0,144 | -0,023 | 0,135 | -0,008 |
| 25 | 0,275 | 0,021 | 0,246 | -0,047 | 0,047 | 0,019 | 0,118 | -0,015 |

Зіставлення отриманих експериментальних даних з теоретичними наочно демонструє коректність розрахункової моделі оболонки, а також чистоту проведеного експерименту (рис. 21).

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. З проведеного дослідження випливає, що конструктивні елементи наділені всіма необхідними міцнісними та жорсткісними

атрибутами несучих елементів будівель з монолітного залізобетону.

У цілому слід зауважити, що виконані дослідження визначають репрезентативність системи «Монофант», що відкриває принципово нові можливості у монолітному домобудуванні. Наочним підтвердженням сказаному є проект комплексу у м. Харків, будівництво якого заплановане на весну 2016 року (рис. 22).

Прогин, мм

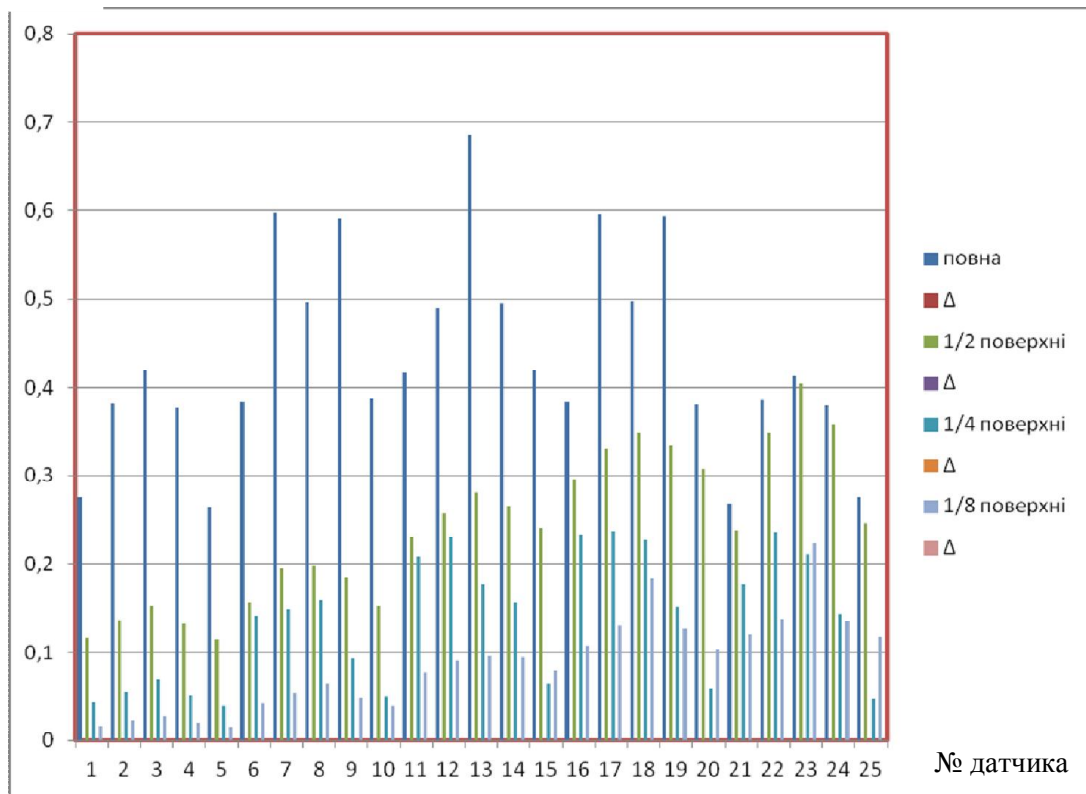
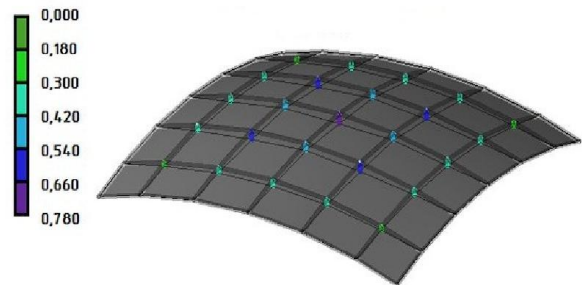
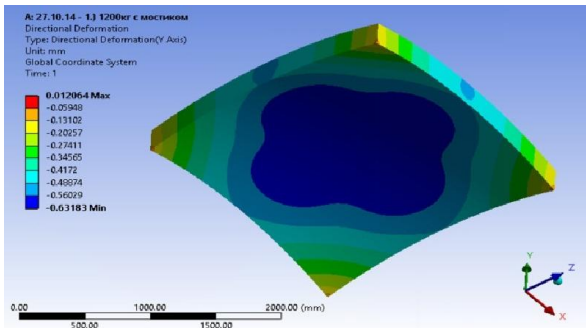


Рис. 20. Графічне зображення вертикальних переміщень оболонки

а)



б)

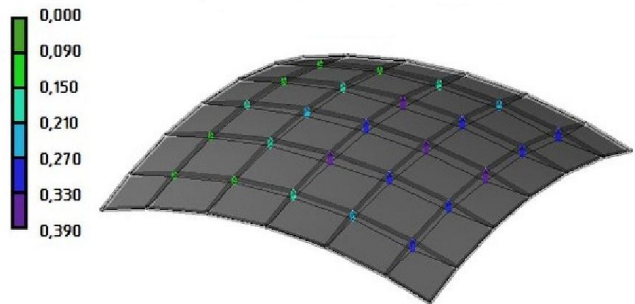
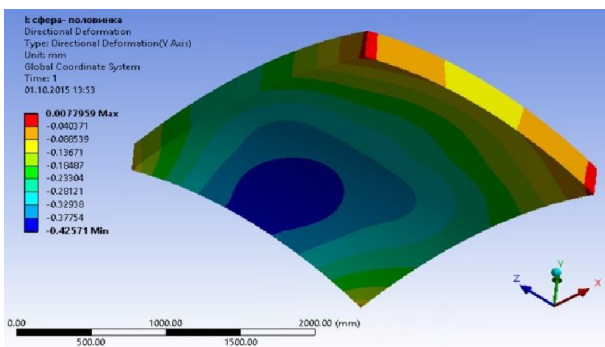
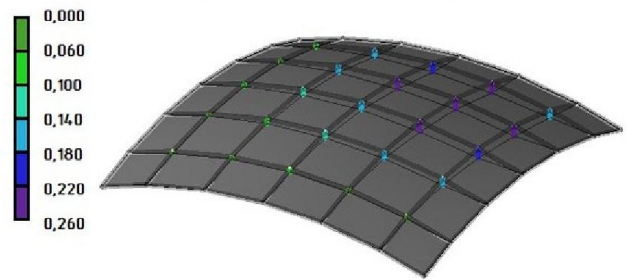
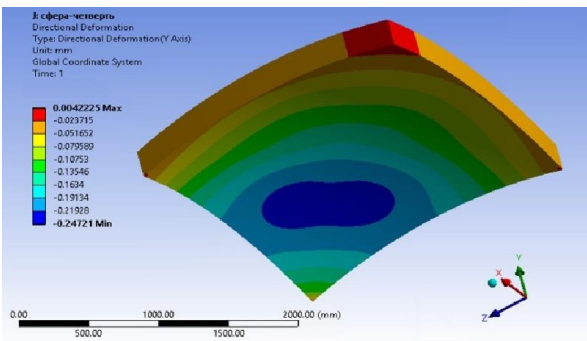


Рис. 21. Порівняльний аналіз ізоліній переміщень: а – рівномірно розподілене навантаження на всю поверхню; б – рівномірно розподілене навантаження на 1/2 поверхні

В)



Г)

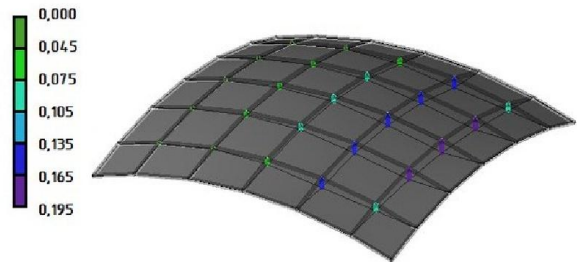
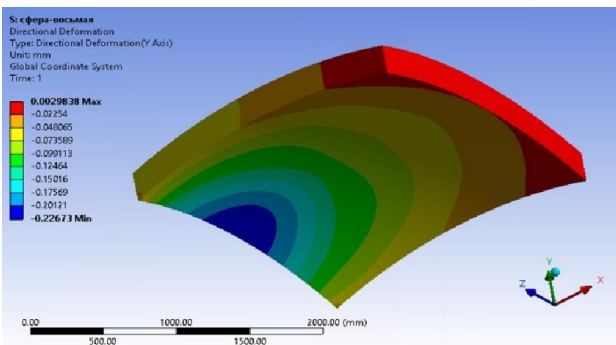


Рис. 21. Порівняльний аналіз ізоліній переміщень: в – рівномірно розподілене навантаження на 1/4 поверхні; г – рівномірно розподілене навантаження на 1/8 поверхні (продовження)

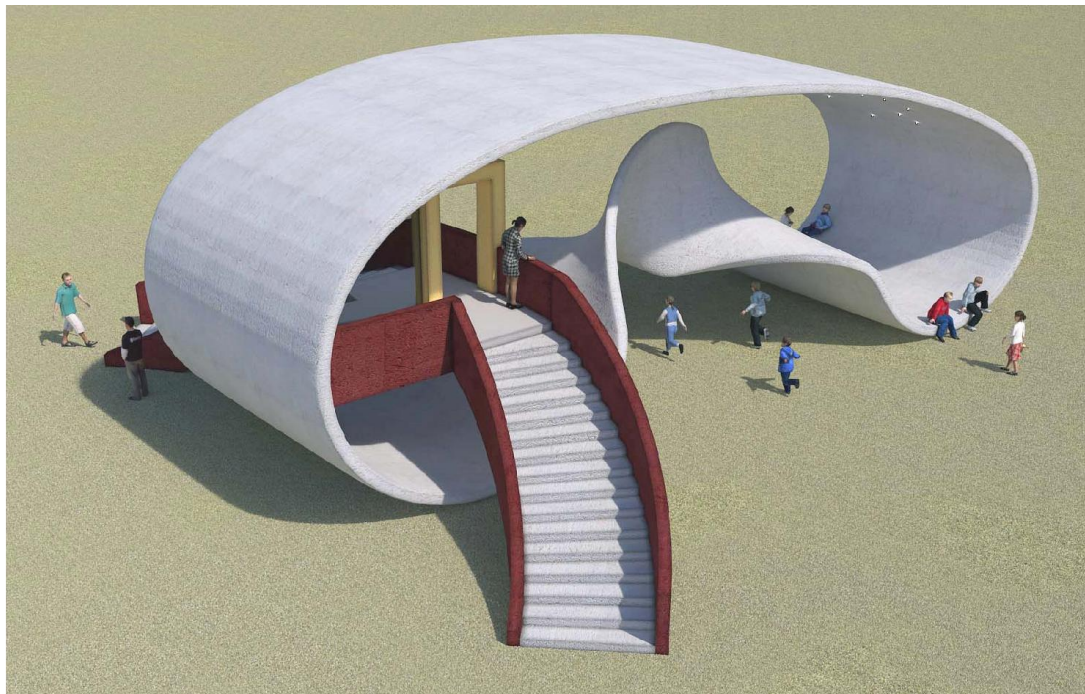


Рис. 22. Проект (система «Монофант»)

Список використаних джерел

1. Патент на корисну модель №89464 Україна, Е 04В 1/В (2006.01) Каркасна будівля «Монофант» / В.С. Шмуклер, В.М. Бабаєв, С.О. Бугаєвський, К.В. Бережна, І.А. Карякін, В.І. Кондращенко, І.М. Сеїрські. – № u 2013 11919; заявка 10.10.2013; публікація 25.04.2014. Бюл. №8.
2. Mekjavić, I. Analiza izbočavanja betonskih sfernih ljustaka [Text] // Tehni ki vjesnik (Zagreb). – 2011. – №18. – Р. 633-639.
3. Жилин, П.А. Прикладная механика. Основы теории оболочек [Текст] / П.А. Жилин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 167 с.
4. Кондратьева, Л.Н. Напряженно-деформированное состояние, устойчивость и колебания тонких пологих оболочек с изломами поверхности в линейной и геометрически нелинейной постановках [Текст]: дис... д-ра техн. наук: 05.23.17 / Кондратьева Лидия Никитовна. – СПб., 2001. – 248 с.
5. Гольденвейзер, А.Л. Теория упругих тонких оболочек [Текст] / А.Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
6. Майборода, В.М. Трехслойные железобетонные конструкции [Текст] / В.М. Майборода, В.Ф. Карпюк. – К.: Будівельник, 1990. – 144 с.
7. Шмуклер, В.С. Каркасные системы облегченного типа [Текст] / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.
8. Патент України на корисну модель №44125, МПК G01M19/00, G01N3/00, G01M5/00. Пристрій для натурних випробувань плит і оболонок / В.С. Шмуклер, А.А. Чупринін, Р. Аббасі. – № u200901598; заявл. 24.02.09; опубл. 25.09.09, Бюл. №12.
9. Шмуклер, В.С. Метод натурних испытаний плит и оболочек [Текст] / В.С. Шмуклер, А.А. Чупринин, Р. Аббаси // Коммунальное хозяйство городов. – 2009. – №90. – С. 450-475.
10. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження й впливи. Норми проектування [Текст]. – К.: Мінбуд України, 2006. – 58 с.
11. Еврокод 1. Воздействия на конструкции – Часть 1-3: Общие воздействия. Снеговые нагрузки (EN 1991-1-3:2003/A1:2015Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads).

Рецензент д-р техн. наук, професор В.С. Шмуклер

Гапонова Людмила Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. 066-366-00-57. E-mail: lvgaponova@rambler.ru.

Калмиков Олег Олександрович, канд. техн. наук, асистент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. 067-992-94-27. E-mail: kalmikov88@mail.ru.

Гребенчук Сергій Сергійович, здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. 050-301-25-29. E-mail: moisei2529@mail.ru.

Gaponova L., cand. of techn. sciences, associate professor of department of building construction O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkiv. Tel. 066-366-00-57. E-mail: lvgaponova@rambler.ru.

Kalmykov O., cand. of techn. sciences, assistant of department of building construction O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkiv. Tel. 067-992-94-27. E-mail: kalmikov88@mail.ru.

Grebenchuk S., graduate student of O.M. Beketov national university of urban economy in Kharkiv. Tel. 050-301-25-29. E-mail: moisei2529@mail.ru.

Стаття прийнята 11.12.2015 р.