

ЕФЕКТИВНІ ЗАЛІЗОБЕТОННІ ОБОЛОНКИ І ЇХ ВИБІР ДЛЯ ЗАДАНОГО ПЛАНУ БУДІВЛІ

EFFECTIVE REINFORCED CONCRETE SHELLS AND THEIR CHOICE FOR A GIVEN PLAN OF THE BUILDING

**Коломійчук Г.П., к.т.н., доцент, Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент,
Коломійчук В.Г., студент (Одеська державна академія будівництва та
архітектури, м. Одеса)**

**Kolomiychuk G.P., PhD., associate professor, Maystrenko O.F., PhD.,
associate professor, Kolomiychuk V.G., student (Odessa State
Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa)**

Виконано аналіз сучасних конструктивних рішень ефективних тонкостінних залізобетонних оболонок покриття. Розроблено програмний комплекс в середовищі Delphi з вибору оптимальних монолітних залізобетонних оболонок для заданої форми плану будівлі або споруди.

The analysis of modern constructive decisions of world leaders in the design and erection of effective thin-walled reinforced concrete shells is performed. The efficiency of large-span shells is ensured by: low cost of construction; high load-bearing capacity; speed of erection; repeated use of formwork; safety in exploitation, even if a part of the structure is damaged; small self-weight, which does not have much influence on the geotechnical situation; the possibility of erection on hard-to-reach territories.

A software package was developed in the Delphi environment for the selection of optimal monolithic reinforced concrete shells for a given form of a building or structure plan. Mathematical models of shells are obtained depending on the following parameters: cost of construction; cost of pneumatic formwork; the load-bearing capacity, determined by the method of limiting equilibrium; stability.

Ключові слова: залізобетонна оболонка, сучасні конструктивні рішення, програмний комплекс, оптимізація.

Keywords: reinforced concrete shell, modern designs, software package, optimization.

Вступ. Виконано аналіз сучасних конструктивних рішень світових лідерів в проектуванні та зведенні ефективних тонкостінних залізобетонних оболонок [1-3]. Ефективність великопрольотних оболонок забезпечується: низькою вартістю конструкції; високою несучою здатністю; швидкістю зведення; багаторазовим використанням опалубки; безпекою в експлуатації, навіть при пошкодженні частини конструкції; малою власною вагою, що не робить великого впливу на геотехнічну обстановку; можливістю зведення на важкодоступних територіях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основними критеріями для оцінки конструктивних рішень оболонкових покриттів в нормативних документах використовуються техніко-економічні показники. В роботі [4] на основі аналізу конструктивних рішень і статистичного узагальнення техніко-економічних показників великопролітних покриттів розроблена методика багатомірної оцінки конструкцій по витраті матеріалів (сталі і бетону), праці, енергії, вартості, а також обмеження сумарних витрат ресурсів для об'єктивного вибору раціональної конструкції. Але ця методика не враховує сучасні підходи з розрахунку, конструювання та зведення монолітних залізобетонних оболонок і особливо зміну їх технічного стану в процесі експлуатації.

Цілі і завдання. На Україні головною причиною, яка стримує застосування просторових тонкостінних залізобетонних оболонок в будівництві, є диспропорція між оптимальністю тонкостінних конструкцій і недосконалістю методів їх зведення, що базуються переважно на досвіді будівництва плоских систем. У зв'язку з вищесказаним метою цієї статті є дослідження споруд світових забудовників, які досягли значних успіхів у проектуванні та зведенні монолітних залізобетонних оболонок, їх аналіз та напрацювання математичних моделей і комп'ютерної програми для попередньої оцінки нових конструктивних рішень на стадії проектування.

Основна частина. В нас роботи по розробці ефективної опалубки для зведення монолітних залізобетонних оболонок виконувалися [5-7], хоча з відставанням від світового досвіду [1-3], і

їх основне застосування в якості покрить ракетних комплексів.

У вересні 1976 року за допомогою пневмоопалубки була зведена секція утепленого ребристого зводу прольотом 12 м, довжиною 18 м і висотою в замку 6,1 м [5]. Звід спирався на вертикальні стіни заввишки 2,03 м. Товщина плити зводу - 30 мм, висота поперечних ребер - 350 мм, ширина ребер - 120 мм, відстань між поперечними ребрами - 3 м. Конструкція склепіння, включаючи облицювання, пароізоляцію, теплоізоляцію і армовану бетонну суміш, була піднята в проектне положення за 45 хвилин. Залізобетонна оболонка знаходилася на пневмоопалубці при прогріванні гарячим повітрям температурою 60°C протягом 59 годин. Витрата матеріалів на 1 м² оболонки складала: бетону - 0,053 м³, сталі - 8,3 кг.

В СРСР перший монолітний купол діаметром 21 м зведений за допомогою пневмоопалубки в 1989 році [2]. Купольна пневмоопалубка запроектована і виготовлена з прогумованої тканини. Маса пневмоопалубки - 1400 кг, розрахункова оборотність - 40 разів. Оболонку армували готовими панелями-пелюстками. В якості робочої арматури служила зварена сітка № 100/100/4/4 з холодногнотутого дроту Вр-1 по ГОСТ 23279-85. В основі куполу, на висоту до 3,3 м, укладали дві сітки. Сітки зварні відокремлювали одну від одної арматурними стержнями Ø8 А240С, укладеними в кільцевому напрямку з кроком 300 мм.

Тонкостінний монолітний залізобетонний купол (товщина оболонки 45 мм) мав такі техніко-економічні показники: площа підлоги - 346 м²; працезатрати на 1 м² площі підлоги - 1,26 люд.-дн.; витрата бетону на 1 м² площі підлоги - 0,08 м³, сталі - 6,3 кг; вартість на 1 м² площі підлоги - 33,86 \$.

Для зведення монолітних хвилястих склепінь використовувалася пневмоопалубка АПВ-12 [2] з наступними характеристиками: габарити - 12×36×6 м; маса - 450 кг; ширина поперечної хвилі - 3 м; стріла підйому хвилі - 0,75 м; розмір «плями» бетонування - 12×24 м; розрахункова оборотність - 20 разів. Зведення хвилястих склепінь з армоцементу на пневмоопалубці дозволяє істотно знизити основні техніко-економічні показники на 1 м² плану: вартість зведення - 13,38 \$; трудомісткість зведення - 1,55 люд.-дн; приведена товщина бетону - 4,00 см; витрата сталі - 10,69 кг.

Для демонстрації еволюції залізобетонних оболонок в часі наведемо лише приклад купольних конструкцій, що зводяться з

застосуванням пневматичної опалубки, і за економічних показниками значно ефективніші плоских систем.

Архітектором Данте Біні в Crespellano (Італія) було зведено методом підйому монолітний залізобетонний купол на пневматичній опалубці діаметром 12 м по новій технології Benishell. З цього об'єкту почався славний шлях по будівництву більше 1600 куполів у 23 країнах світу. Інновацією Біні було те, що він винайшов пневматичну опалубку, яка могла генерувати форму стійких структур, таких як залізобетонні оболонки.

З 1974 року по 1980 Данте Біні працював в Австралії над реалізацією соціальних програм уряду [8]. Було зведено по технології Benishell, за цей час, 27 куполів (17 діаметром 36 м, 8-18 м і 2 - інформації немає). На дату написання статті [8] збереглося 7 куполів діаметром 36 м і 4 куполи діаметром 18 м. Ще 4 куполи діаметром 36 м знаходяться в занедбаному стані. Був накопичений багатий досвід і навіть два куполи отримали пошкодження під час зведення і були зруйновані. Основною причиною отриманих пошкоджень була низька кваліфікація виконавців робіт. В подальшому цей недолік було виправлено.

Використовуючи технологію Binishells розроблено каталог монолітних залізобетонних куполів різних розмірів (табл. 1) [9].

В якості основного матеріалу використовується бетон, що складається із звичайної суміші з високою оброблюваністю і поміщається на пневматичну опалубку на рівні землі. Характеристики суміші такі: пісок – 60%; співвідношення вода/цемент - 0,50; гравій (фракція 12-15 мм) - 40%; осадка конуса – 16-18 см; цемент – 400 кг/м³. Армується кожен купол спіральною арматурою з 10-15 типорозмірів, а також прямими сталевими стержнями діаметром від 5 до 8 мм.

Таблиця 1

Геометричні розміри куполів-сховищ сипучих матеріалів

Діаметр (D), м	Висота (H), м	Об'єм (V), м ³
15	5,0	600
20	6,3	1360
25	8,0	2580
32	10,2	5450
36	11,0	7450
40	12,0	10050

В результаті будівництва вартість економії складає до 60% в порівнянні з бетонними сховищами, побудованими за традиційними системами. Економія у витратах обумовлена: зменшенням кількості робочої сили і матеріалів, необхідних для будівництва (товщина конструкцій: 4-8 см); малими розмірами фундаментів, що мають безперервну круглу форму і обмежену глибину (навантаження на ґрунт складає 0,6-0,8 кг/см²); простотою обладнання, його легким транспортуванням і багаторазовим повторним використанням в наступних застосуваннях; скороченням транспортних витрат і інвестицій в будівельне обладнання; усуненням експлуатаційних витрат; скороченням накладних витрат через швидкість і простоту виконання.

З 1966 року фірми США розробляють монолітні залізобетонні куполи із зовнішнім теплоізоляційним шаром і зводяться із застосуванням пневмоопалубки [2]. Можливе будівництво споруд діаметром від 150 до 300 м. Форма споруд в плані, як правило, кругла або еліптична, а закінчене спорудження має форму півсфери або еліпсоїда, проте за бажанням замовника може бути запроєктовано спорудження довільної форми.

Американська фірма «Dome Technology» [10] проектує та будує монолітні тонкостінні залізобетонні куполи з використанням пневмоопалубки. Нанесення торкрет-бетону в тіло оболонки здійснюється високоточним обладнанням. Армування куполів виконується рифленою арматурою в два шари. З зовнішнього боку додатково купол покривається високоміцним довговічним полімерним матеріалом. Ця технологія дозволяє будувати куполи з більш високими параметрами кривизни, що додає конструкції більшої міцності і надійності. Серед проектних розробок і побудованих споруд можна виділити: купол для зберігання рафінованого цукру в Монтгомері (штат Іллінойс, США) діаметром 56 м, висотою 40,8 м (об'єм цукру - 60000 м³); сейсмостійкий купол в м. Сантьяго (Чілі) для зберігання клінкера на цементному заводі діаметром 57 м, висотою 28,5 м (об'єм клінкера - 50000 м³); купол для зберігання бурого вугілля в Кемпер Каунті (штат Міссісіпі, США) об'ємом - 100000 м³; два однакових куполи для зберігання біомаси, що здатні витримати ураганний вітер 300 миль на годину, в порту Вілмінгтон (штат Північна Кароліна, США) діаметром 53,6 м, висотою 47,8 м; купол для зберігання руди в Лідвіллі (штат Колорадо, США) на висоті 3353 м діаметром 101 м (об'єм руди –

130000 м³; купол розрахований на снігове навантаження 5,27 кН/м²).

В Відні ведуться дослідження на моделях монолітних залізобетонних оболонок сферичної та овальної форм [11]. Оболонка поділяється на сектори і виготовляється на площині таким чином, що при підйомі її в проектне положення пневмоопалубкою всі складові частини оболонки з'єднуються. В кінці зведення необхідно лише замонолітити стики.

Таблиця 2

Математичні моделі залізобетонних оболонок різної геометрії

Форма оболонки покриття	Математична модель ефективних геометричних розмірів оболонки покриття
Сферичний купол діаметром (D) від 30 до 150 м	$Y(1) = ((-0,00483) \times D^2 + 1,60958 \times D + 76,33049) \times 10^{-3}$
Прямокутна оболонка додатної кривизни з меншим розміром плану (L) від 30 до 120 м	$Y(2) = ((-0,05268) \times L^2 + 7,83251 \times L + 128,24286) \times 10^{-3}$
Прямокутна оболонка від'ємної кривизни з (L) від 30 до 90 м	$Y(3) = ((-0,01245) \times L^2 + 3,52857 \times L + 29,96667) \times 10^{-3}$
Прямокутна оболонка від'ємної кривизни шатрового типу з (L) від 20 до 80 м	$Y(4) = ((-0,01995) \times L^2 + 4,67482 \times L + 120,73393) \times 10^{-3}$
Довга прямокутна циліндрична оболонка з розміром плану хвилі (L) від 15 до 45 м	$Y(5) = (0,00569 \times L^2 + (-0,81429) \times L + 86,50951) \times 10^{-3}$
Коротка прямокутна циліндрична оболонка з розміром плану хвилі (L) від 30 до 150 м	$Y(6) = ((-0,00253) \times L^2 + 0,70354 \times L + 209,40939) \times 10^{-3}$
Прямокутна лійкоподібна оболонка від'ємної кривизни з меншим розміром плану (L) від 20 до 60 м	$Y(7) = ((-0,03575) \times L^2 + 7,95764 \times L + 44,22101) \times 10^{-3}$
Прямокутна парасолькова оболонка від'ємної кривизни з меншим розміром плану від 20 до 60 м	$Y(8) = ((-0,07071) \times L^2 + 11,26114 \times L + 4,94077) \times 10^{-3}$

Показники досліджених авторами сучасних натурних оболонкових покриттів дали можливість отримати математичні

моделі ефективного застосування гладких залізобетонних оболонок різної геометрії для попередньої оцінки нових конструктивних рішень на стадії проектування (табл. 2). В таблиці Y(I) – відношення стріли підйому до прольоту (діаметру) залізобетонної оболонки покриття в плані.

Для практичного впровадження в проектування нових, більш ефективних проектних рішень, отриманні знання були використані в побудові каталогу математичних моделей, що налічує близько 100 різних типів оболонок, а також розробленому алгоритмі і комп'ютерній програмі в середовищі Delphi, за допомогою якої можна виконати вибір для заданої форми плану декількох конструктивних рішень оболонок.

Останні дослідження монолітних залізобетонних оболонок пов'язані з використанням в них надміцних бетонів [12, 13], а також арматури стійкої до агресивного середовища, дають можливість в створенні нових типів ефективних оболонкових покриттів. Але для розглянутих сучасних конструктивних рішень оболонок важливою проблемою постає і вміння оцінити поведінку оболонки під час експлуатації [14, 15].

Висновки і перспективи досліджень. Виконано аналіз сучасних монолітних залізобетонних оболонок і показано їх доцільне ефективне використання в громадських будівлях та промислових спорудах. Отримано математичні моделі і комп'ютерну програму за допомогою якої можна виконати вибір для заданої форми плану декількох конструктивних рішень монолітних залізобетонних оболонок.

1. Богданова Е.Н. Железобетонные оболочки покрытий общественных зданий: (Обзор) / Е.Н. Богданова, М.Б. Краковский. –М: ЦИНИС, 1974. – 73 с.

2. Дорофеев В.С. Природоохранные подходы в проектировании и возведении производственных комплексов с применением тонкостенных железобетонных оболочек / В.С. Дорофеев, Г.П. Коломийчук // Вісник ОДАБА, Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. – Вип. 36. – С. 154-159.

3. Patent USA № 4170093. Method and apparatus for erecting substantially dome-like building structures / Mario Cappellini, Dario Zucchi. – Published 09.10.1979, 4 p.

4. Никонов Н.Н. Большепролетные покрытия. Анализ и оценка / Н.Н. Никонов. – М.: Издательство АСВ, 2000. – 400 с.

5. Авторское свидетельство СССР №335354, кл. E04G11/04. Мягкая

опалубка для возведения цилиндрического железобетонного свода / Б.И. Петраков. – Оpubл. 11.04.1972. – Бюл. №13. – 2 с.

6. Авторское свидетельство СССР №383817, кл. E04G11/04. Пневматическая опалубка для возведения многогранного купола / Б.И. Петраков, В.П. Селиванов. – Оpubл. 23.05.1973. – Бюл. №24. – 2 с.

7. Авторское свидетельство СССР SU №1749427 A1, кл. E04G11/04. Способ возведения многогранного железобетонного купола / А.С. Никитин, В.П. Селиванов, Б.И. Петраков. – Оpubл. 23.07.1992. – Бюл. №27. – 4 с.

8. Pugnale, Alberto, and Alberto Bologna. “Dante Bini’s ‘New Architectural Formulae’: Construction, Collapse and Demolition of Binishells in Australia 1974-2015.” In *Proceedings of the Society of Architectural Historians, Australia and New Zealand: 32, Architecture, Institutions and Change*, edited by Paul Hogben and Judith O’Callaghan, Sydney: SAHANZ, 2015, pp. 488-499.

9. Michelagnoli, A. Pneumatically formed reinforced concrete domes for grain storage facilities, built with Binishells technology. In: “Controlled Atmosphere Storage of Grains”, An International Symposium held from 12 to 15 May 1980 at Castelgandolfo (Rome) Italy, 1980, pp. 475-486.

10. <http://www.dometech.com>

11. Kromoser, B. and Kollegger, J. “Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century”, *Structural Concrete*, vol. 16, no. 2, 2015, pp. 161-171.

12. Zimmermann, G., Teichmann, T., 2004. Membrane concrete grid shells – UHPC grid shells. In: *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 13-15 September 2004, Kassel, Germany, Eds. M. Schmidt, E. Fehling, C. Geisenhanslüke (Kassel, Germany: Kassel University Press, 2004), pp. 839-852.

13. Zimmermann, G., Grohmann, M., 2008. UHPC free form design with pneumatic formwork. In: *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, 5-7 March 2008, Kassel, Germany, Eds. E. Fehling, M. Schmidt, S. Stürwald (Kassel, Germany: Kassel University Press, 2008), pp. 871-878.

14. Коломийчук Г.П. Техническая оценка железобетонных оболочек покрытия / Г.П. Коломийчук // *Вісник ОДАБА*, –Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. – Вип. 34. – Частина 2. – С. 428-435.

15. Коломийчук Г.П. Практические рекомендации по расчету устойчивости пологих железобетонных оболочек с учетом начальных несовершенств / Г.П. Коломийчук // *Вісник ОДАБА*, – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2006. – Вип. 22. – С. 138-144.