

Г.М. Тонкачев,

докт. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0002-6589-8822

А.О. Тригуб,

аспірант

ORCID: 0009-0004-9455-4828

О.Г. Шандра,

ст. викладач, аспірант

ORCID: 0000-0002-2486-0529

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦЬЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СТРІЛЧАСТИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СКЛЕПІНЬ

В статті розглянуті конструктивні та технологічні рішення застосування залізобетонних склепінь. На даному етапі розвитку суспільства в складних умовах виживання під час воєнних дій актуальним стає питання безпеки життя людей. Конструктивне рішення споруд у вигляді склепінь є придатним для рішення подібних задач. Критерієм вибору конструктивного рішення є надійність та функціональний об'єм споруди. Найбільш надійними є залізобетонні монолітні склепіння із сучасних матеріалів. Найбільш надійною є стрілчаста форма склепіння. Аналіз різних форм арок склепінь показав, що на відміну від пологих і повної циліндричної форми стрілчасті склепіння мають більш корисне використання пристінного простору на висоті до 6,0 м, що робить приміщення більш функціональними. Критерієм вибору технології є швидкість зведення склепіння. Проблемним питанням зведення монолітних залізобетонних склепінь залишається недосконала технологія влаштування опалубки, армування та бетонування. При бетонуванні криволінійної випуклої поверхні споруди відбувається сповзання бетону. Вирішенню цієї проблеми присвячена дана стаття. При переході на стрілчасті склепіння не відомі питання наскільки змінюється технологія виконання процесів влаштування опалубки, армування і бетонування. Проведений аналіз існуючих технологій зведення монолітних склепінь показав, що існуючі конструктивні і технологічні рішення не вирішують завдання прискорення швидкості зведення споруд. Для унеможливлення процесу сповзання бетону запропоновано використання фібри. Передбачаються додаткові дослідження для вивчення впливу фібробетону на сповзання. Визначена потреба проведення досліджень у напрямку поліпшення конструктивних і технологічних рішень, удосконалення засобів механізації процесу та у напрямку створення системи нормування витрат праці на процеси зведення стрілчастих склепінь.

Ключові слова: *склепіння залізобетонні, технологія зведення, бетонна суміш, трудомісткість, нормування, ефективність.*

Постановка проблеми. Зведення монолітних склепінь в Україні має ряд проблем, які обмежують їхнє застосування: висока вартість робіт; відсутність

стандартів і нормативів, які регламентують будівництво склепінь; недосконалість технологій зведення.

До переліку проблемних віднесено наступні питання: не вивчений вплив форми склепіння на трудомісткість процесу зведення; відсутність нормативної бази для визначення трудомісткості процесу; відсутність достатньої інформації стосовно використання фібробетону для зведення склепінь; недостатньо вивчений досвід застосування рухомих опалубних систем для зведення криволінійних споруд; підтвердження надійності та міцності конструкцій склепіння різних параметрів і форм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Склепінні будівлі мають давню історію в Україні. Склепінні конструкції широко застосовують в промисловому та цивільному будівництві. Актуальними на час воєнного стану для захисту людей, техніки та інфраструктури міст становляться споруди ангарів, бомбосховищ тощо [1].

Швидкість реагування на небезпечні події висувають за першочергові вимоги – скорочення термінів на зведення таких споруд. Наступними, важливими вимогами до технологій зведення – є підвищена надійність і якість склепінь [2].

Підвищення надійності споруд пов'язане із застосуванням залізобетонних монолітних конструкцій, які на відміну від інших конструктивно-технологічних рішень (КТР) супроводжуються найбільшими термінами зведення.

Аналіз літератури [3, 4] свідчить про достатньо поширений досвід проектування і зведення склепінь з металоконструкцій. Схожі проблеми виникають і при зведенні куполів [5].

Що стосується нормування процесів при зведенні склепінь, існуюча нормативна база [6, 7] не дозволяє достовірно оцінювати технології зведення склепінь, а, відповідно, приймати правильне, обгрунтоване рішення [8].

Цікава інформація закордонного досвіду [9, 10], але ж її теж недостатньо для вирішення поставлених проблем.

Постановка завдання. Виявлення проблемних питань та пошук шляхів їх вирішення для розробки конструктивно-технологічних рішень (КТР) монолітних залізобетонних склепінь стрілкової форми, обгрунтування доцільності їх використання.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Криволінійна і випукла поверхня склепінь є проблемною при їх зведенні за монолітною технологією, в процесі вкладання і ущільнення відбувається сповзання бетону.

Для унеможливлення сповзання, як правило, застосовують за консистенцією бетонні суміші марки S1 [11].

Роботи по вкладанню і ущільненню таких сумішей характеризуються підвищеною трудомісткістю і низкою якістю [12].

Криволінійна поверхня куполів і склепінь сильно ускладнює організацію процесів влаштування опалубки і армування. Криволінійна форма опалубки значно збільшує трудомісткість і вартість процесу на її влаштування. Виготовлення криволінійного арматурного каркасу дуже трудомісткий процес.

Встановлено вплив форми склепіння на трудомісткість процесу його зведення. З точки зору зручності і здешевлення процесу зведення, за існуючим рівнем розвитку технологій, переваги надають пологім формам склепінь (рис. 1).

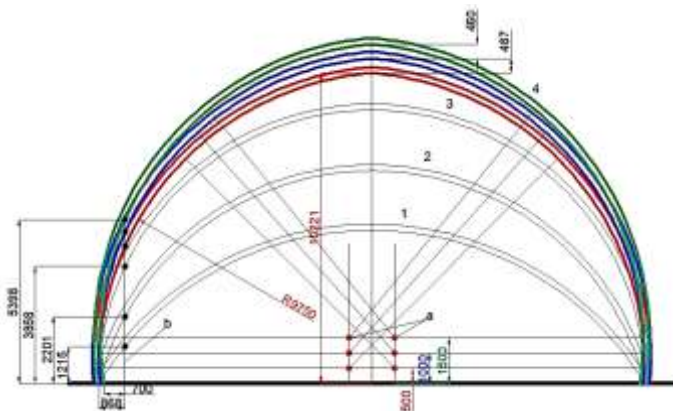


Рис. 1. Комбінована схема форм склепінь:
1, 2 – пологі форми циліндричних склепінь; 3 – повне циліндричне склепіння; 4 – стріласті склепіння різної кривизни; а – положення точок радіусів кривизни стріластих склепінь; б – геометрія пристінного простору різних склепінь

Для нагальних потреб конструкції склепінь повинні мати форми більш випуклі, з більшою кривизною. Аналіз різних форм арок склепінь показав, що на відміну від пологих і повної циліндричної форми стріласті склепіння мають більш корисне використання пристінного простору на висоті до 6,0 м, що робить приміщення більш функціональними. Це дає більшу можливість для схову людей і військової техніки: танків, літаків, самохідних артилерійських установок тощо.

Важливими питання при переході на стріласті склепіння стають: наскільки змінюється технологія виконання процесів влаштування опалубки, армування і бетонування; як зменшиться несуча здатність конструкції; як позначиться це на витратах матеріалів і на трудомісткість процесу зведення.

Склепіння великої протяжності (більш 18 м) членують по довжині на окремі ділянки з улаштуванням робочих швів, перпендикулярних утворенню склепіння. Ділянки склепінь можна розглядати як з'єднані між собою арки завширшки відповідно технічних можливостей опалубки і несучої здатності арок.

При невеликих прольотах склепіння (до 20 м) і малій товщині (0,2...0,3 м) ділянки бетонують безперервно, укладаючи суміш смугами одночасно з двох сторін від опор до замку (рис. 2, а).

Для зменшення сповзання бетону зменшують чарунки арматурних каркасів до 100 x 100 мм, що для арок більшої кривизни не допомагає стримувати сповзання бетону.

Наступна технологія передбачає використання зовнішньої опалубки, яка влаштовується по черзі на кожному ярусі для зручності і надійності вкладання бетонної суміші (рис. 2, б). Для цього смугу бетонування зменшують до 2...3 м, щоб надати можливість більш якісного заповнення бетоном простору між щитами. Враховуючи той факт, що стіни склепіння армовані густо, забезпечити якість заповнення і ущільнення суміші марки S1 не завжди вдається. Перехід на марку

суміші S2 або S3 спрощує процес її вкладання, але ж відтягує час на розпалубку конструкцій.

Одним з варіантів КТР для склепінь більшої кривизни є влаштування поперечних бар'єрів завтовшки і заввишки відповідно товщини склепіння. Крок між бар'єрами приймається в межах 3...6 м, що зменшує тиск верхнього ярусу свіжого бетону на той, що був забетонований раніше, що, у свою чергу, зменшує явище сповзання (рис. 2, в).

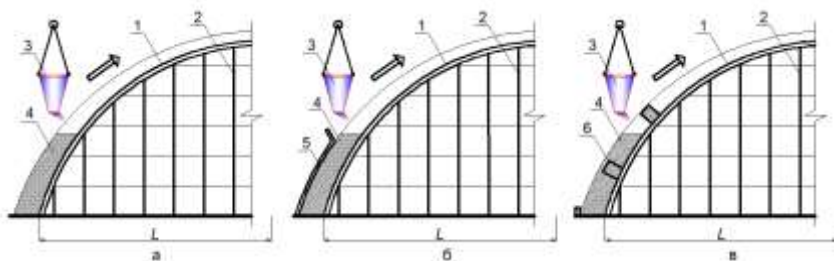


Рис. 2. Схеми бетонування склепінь:

- а – пологих склепінь; б – циліндричних і стрілоччастих склепінь з додатковою опалубкою зверху; в – циліндричних і стрілоччастих склепінь з попереднім влаштуванням ребр; 1 – щити опалубки; 2 – риштування; 3 – баддя; 4 – свіжий бетон; 5 – зовнішні щити опалубки; 6 – бетонні ребра

Технологія з влаштуванням бар'єрів збільшує трудомісткість робіт, оскільки потребує влаштування додаткової опалубки. Якість конструкції зменшується за рахунок появи в тілі склепіння бетонів з різними термінами виготовлення. Бар'єри повинні набрати достатню міцність для утримання свіжих шарів, що призводить до утворення швів між старим і новим бетоном та стримує термін зведення та робить конструкцію неоднорідною.

Існує ще один спосіб бетонування склепінь. Зверху арматурного каркасу влаштовують арматурну конструктивну сітку зі зменшеними чарунками (30...50 мм), скрізь які бетонна суміш не проходить. Для вкладання суміші вирізають і відгинають смуги сітки (до 0,5 м) з кроком не більш 3,0 м, потім повертають сітку на місце. Така технологія більш витратна за матеріалами і, відповідно, за трудомісткістю.

Укладку бетонної суміші на кожній ділянці пологих склепінь потрібно вести безперервно. Першими бетонують ділянки, що прилягають до опор. Потім, щоб уникнути спучування опалубки у вершині арки бетонують замкову ділянку. Після цього укладають бетонну суміш у рядові ділянки рівномірно з двох сторін.

У разі виникнення небезпеки спучування опалубки в процесі бетонування бічних частин, незаповнені ділянки опалубної конструкції необхідно завантажити, наприклад, мішками з піском.

Роздільні смуги бетонують через 6-8 діб після того, як відбудеться усадка бетону основних ділянок. Для роздільних смуг застосовують суміш марки S3.

До недоліків технологій з використанням сумішей марки S1 слід віднести недостатню продуктивність процесу. Суміш подається і вкладається лише краном у баддях. Після вкладання виконуються ущільнення бетонної суміші.

Якщо товщина стін склепіння менша за 0,25 м, то після заливання бетону проводиться ущільнення суміші за допомогою вібраторок або плитних поверхневих вібраторів [13]. При більшій товщині стін склепіння для ущільнення рекомендується використовувати внутрішні (глибинні) вібратори.

Масивні склепіння прольотами понад 18 м у межах кожної ділянки членують на непарну кількість ділянок, що утворюють паралельно. Бетонування виконують через смугу. Це пов'язано з більшою усадкою бетону і з більшою імовірністю появи усадочних тріщин. Ширину розділових смуг між ними можна зменшити і прийняти рівною за товщиною склепіння.

Аналіз літературних джерел показав недостатньо вивченим питання правильного підбору складу бетонної суміші та відсутність достатньої інформації по використанню для криволінійних споруд фібробетону. Важливо встановити, як фібробетон буде впливати на сповзання, і, чи можливо підвищити марку бетонної суміші до S4. Для цього планується провести додаткові дослідження.

Обґрунтування доцільності використання технологій зведення склепінь потребує сучасної нормативної бази для визначення затрат праці на виконання відповідних будівельних процесів, а її немає. Маємо проблему, яка не дозволяє правильно, об'єктивно і спрощено оцінювати техніко-технологічні рішення, що в свою чергу є стримуючим чинником у розвитку будівельних технологій, особисто при розробці проєктів стрілочастих склепінь.

Використання елементів методики мікроелементного нормування з методикою розробки карт трудових процесів [14] дозволяє створити методику цілочислового нормування часу елементів процесу зведення склепінь.

Для підтвердження надійності та міцності конструкцій склепіння різних параметрів і форм проведені відповідні дослідження.

У роботі [15] йдеться про основні критерії для оцінки конструктивних рішень оболонкових покриттів. В цій роботі 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. Що обумовлено для оболонкових конструкцій в якості основного матеріалу використовувати бетон. Але методика цієї оцінки не враховує витрат бетону, що може збільшитися в цілому через більшу площу оболонки при цьому враховуючи, що оболонки склепінь можуть бути різними.

Для проведення дослідження були використані наступні методи.

Аналіз мозаїки напружень та карт армування. Мозаїки напружень були отримані за допомогою методу кінцевих елементів. Карти армування були отримані на основі мозаїки напружень та вимог до міцності склепіння.

Виконані порівняння результатів для двох видів склепінь для циліндричного і стрілочастого профілю. Результати для циліндричного та стрілочастого склепінь були порівняні за такими показниками: згинальних моментів по M_x та M_y ; витратам арматури; витрата бетону.

Монолітні склепіння вимагають інженерних рішень та технологічних розрахунків, враховуючи такі фактори: форма склепінь, розміри склепінь, матеріали з яких виготовляються склепіння. При цьому конструкція повинна бути не лише міцною, але і стабільною. Одним з найголовніших аспектів невизначеності розрахункових моделей цієї конструкції є урахування невизначеності зовнішнього навантаження.

При порівнянні технологій будівництва монолітних склепінь, циліндричного з стрілочастим, необхідно звернути увагу на напруження які виникають в готовій конструкції, що може значно вплинути на армування.

Висновки та рекомендації. Результати дослідження і відповідні розрахунки показали, що застосування стрілочастого склепіння зменшує напруження в оболонці, що дозволяє зменшити витрати арматури на підсилення, але витрати на бетон навіть можуть збільшитися через більшу площу поверхні оболонки.

Криволінійна поверхня склепіння ускладнює конструкцію опалубки, процеси армування і бетонування, що негативно впливає на продуктивність процесу, що потребує проведення досліджень як у напрямку поліпшення рішень конструктивних і технологічних, так і у напрямку удосконалення засобів механізації процесу.

Відсутність нормативної бази для визначення витрат праці не дозволяє об'єктивно оцінювати варіантні рішення, що потребує проведення досліджень у напрямку нормування часу елементів процесу зведення склепінь.

Список літератури:

1. Абизов В.А. Історія розвитку архітектурних-будівельних систем. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2008. Вип. 19. С.123-127.

2. Носовський А.В. Об'єкт укриття. *Енциклопедія Сучасної України*. Редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2022. URL: <https://esu.com.ua/article-75107>

3. Свердлов В.Д., Сіянов О.І. Металеві циліндричні стержневі покриття: монографія. Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. 134 с.

4. Сіянов О.І. Металеві одношарові циліндричні стержневі покриття: конструювання та розрахунок: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.23.01. Вінниця, 2002. 22 с.

5. Тонкачєєв В.Г. Визначення оптимальних конструктивних параметрів ребристо-кільцевих куполів покриття приміщень з корисною площею 200...500 м². *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 62. Ч. 1. С. 525–531.

6. ЕНиР Сб. Е4. Монтаж сборных и устройств монолитных железобетонных и бетонных конструкций. Вип. 1. Здания и промышленные сооружения. М: Стройиздат, 1987. 65 с.

7. КНУ Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Бетонні та залізобетонні конструкції монолітні (Збірник 6). [Чинний від 2023-02-22]. URL: <https://e-construction.gov.ua/files/upload/2022-11-05/68e480d0-673b-406b-a4ec-b0040bdbe9d9.pdf>

8. Молодід О.С., Шандра О.Г. методи нормування процесів зведення монолітних будівельних конструкцій. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. Вип. 52. Ч. 1. С. 55-61. DOI:10.32347/2707-501x.2023.52(1).55-61

9. Veenendaal D., Block Ph. Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork. *Engineering Structures*. 75 (2014). P. 39-55. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.05.036

10. Concrete Shells: Design Principles and Examples. URL: <https://www.archdaily.com/895536/concrete-shells-design-principles-and-examples>

11. Рухливість бетону – методи визначення і характеристики. URL: <https://s-beton.com.ua/uk/podvizhnost-betona-metody-opredeleniya-i-harakteristiki.html>
12. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б. та ін.. Будівельне матеріалознавство: підручник. К.: Видавництво Ліра-К, 2012. 624 с.
13. ДСТУ-Н Б В.2.6-203:2015. Настанова з виконання робіт при виготовленні та монтажі будівельних конструкцій. [Чинний від 2016-04-01]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63372
14. Рекомендації по составлению карт трудовых процессов строительного производства. М.: СИ, 1983. 23 с.
15. Коломійчук Г.П., Майстренко О.Ф., Коломійчук В.Г. Ефективні залізобетонні оболонки і їх вибір для заданого плану будівлі. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. Вип. 8. С. 111-118. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_8_17

References:

1. Abyzov, V.A. (2008). Istoriia rozvytku arkhitekturnykh-budivelnnykh system. *Visnyk Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, 19, 123-127.
2. Nosovskyi, A.V. (2022). Obiekt ukryttia. *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy*. Redkol.: I.M. Dziuba, A.I. Zhukovskyi, M.H. Zhelezniak [ta in.]; NAN Ukrainy, NTSh. K.: Instytut entsyklopedychnykh doslidzhen NAN Ukrainy. URL: <https://esu.com.ua/article-75107>
3. Sverdlov, V.D., Siianov, O.I. (1999). Metalevi tsylindrychni sterzhnevi pokryttia. *Monohrafiia*. Vinnytsia: «UNIVERSUM-Vinnytsia». 134 s.
4. Siianov, O.I. (2002). Metalevi odnosharovi tsylindrychni sterzhnevi pokryttia: konstruiuvannia ta rozrakhunok: abstract dys...kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Kyiv. 22 s.
5. Tonkacheiev, V.H. (2016). Vyznachennia optymalnykh konstruktivnykh parametriv rebrysto-kiltsevykh kupoliv pokryttia prymishchen z korysnoiu ploshcheiu 200...500 m². *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. Vyp. 62. Ch. 1. S. 525–531.
6. YENiR Sb. Ye4. (1987). Montazh sbornykh i ustroystvo monolitynykh zhelezobetonnykh i betonnykh konstruksiy. Vyp. 1. Zdaniya i promyshlennyye sooruzheniya. M: Stroyizdat. 65 s..
7. Estimated standards of Ukraine Resource elemental estimated standards for construction works. Concrete and reinforced concrete structures are monolithic (Collection 6). [Effective from 2023-02-22]. URL: <https://e-construction.gov.ua/files/upload/2022-11-05/68e480d0-673b-406b-a4ec-b0040bdbe9d9.pdf>
8. Molodid, O.S., & Shandra, O.H. (2023). Methods of standardizing processes of construction of monolithic building structures. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 52(1), 55-61. DOI:10.32347/2707-501x.2023.52(1).55-61
9. Veenendaal, D., Block, Ph. (2014). Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork. *Engineering Structures*, 75 P. 39-55. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.05.036
10. Concrete Shells: Design Principles and Examples. URL: <https://www.archdaily.com/895536/concrete-shells-design-principles-and-examples>
11. Rukhlyvist betonu – metody vyznachennia i kharakterystyky. URL: <https://s-beton.com.ua/uk/podvizhnost-betona-metody-opredeleniya-i-harakteristiki.html>

12. Kryvenko, P.V., Pushkarova, K.K., Baranovskyi, V.B. et al. (2012). *Budivelne materialoznavstvo*. K.: Vydavnytstvo Lira-K. 624 s.

13. DSTU-N B V.2.6-203:2015. Instructions for the execution of works in the manufacture and installation of building structures. [Effective from 2016-04-01]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63372

14. Rekomendatsyyu po sostavleniyu kart trudovykh protsessov stroytelnoho proyzvodstva. M.: SY, 1983. 23 s.

15. Kolomiychuk, G.P., Maistrenko, O.F., Kolomiychuk, V.G. (2017). Effective reinforced concrete shells and their selection for a given building plan. *Modern technologies and calculation methods in construction*. Issue 8. P. 111-118. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_8_17

H. Tonkacheiev, A. Tryhub, O. Shandra

Justification of the feasibility of using arrival reinforced concrete vaults

The article discusses constructive and technological solutions for the use of reinforced concrete vaults. At this stage of society's development, in the difficult conditions of survival during hostilities, the issue of the safety of people's lives becomes urgent. The structural solution of buildings in the form of vaults is suitable for solving similar problems. The criterion for choosing a constructive solution is the reliability and functional volume of the building. The most reliable are reinforced concrete monolithic vaults made of modern materials. The most reliable is the arrow-shaped vault. The analysis of different forms of vault arches showed that unlike flat and full cylindrical vaults, pointed vaults have a more useful use of wall space at a height of up to 6.0 m, which makes the premises more functional. The criterion for choosing a technology is the speed of building the vault. The problematic issue of erecting monolithic reinforced concrete vaults remains the imperfect technology of arranging formwork, reinforcement and concreting. When concreting the curvilinear convex surface of the structure, the concrete slips. This article is dedicated to solving this problem. When switching to pointed vaults, it is not known how much the technology of performing the processes of formwork installation, reinforcement and concreting changes. The analysis of the existing technologies for the construction of monolithic vaults showed that the existing structural and technological solutions do not solve the problem of accelerating the construction speed. In order to prevent the process of slipping of concrete, the use of fiber is proposed. Additional studies are planned to study the effect of fiber concrete on sliding. The need for conducting research in the direction of improving constructive and technological solutions, improving the means of mechanization of the process, and in the direction of creating a system of normalization of labor costs for the processes of erecting pointed vaults has been identified.

Keywords: *reinforced concrete vaults, construction technology, concrete blend, labor intensity, standardization, efficiency.*