

Г.В. Шпакова,

докт. екон. наук, професор
ORCID: 0000-0003-2124-0815

Д.В. Прокопенко,

магістр
ORCID: 0009-0001-6085-2032

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ТЕХНОЛОГІЯ ВЛАШТУВАННЯ ТУНЕЛІВ НЕГЛИБОКОГО ЗАКЛАДАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПНЕВМАТИЧНОЇ ОПАЛУБКИ

У даній статті розглянуто технологію будівництва підземних тунелів метро з використанням пневматичної опалубки, яка має на меті покращити та полегшити зведення тунельних об'єктів. Ознайомившись із проблематикою будівництва тунельних об'єктів, зокрема споруд метрополітену, та проаналізувавши ключові аспекти даного будівництва, хочемо запропонувати використання даної технології для будівництва тунелів метро неглибокого закладання. Особливістю даної технології є оптимізація будівельного процесу та покращення якісних характеристик спорудженого тунелю шляхом заміни готових збірних залізобетонних елементів на суцільний монолітний тунель, що зводиться безпосередньо на будівельному майданчику. Головною технологічною відмінністю є використання пневматичної опалубки замість стандартних опалубних щитів та систем опорних стійок і повздовжніх балок. Основним робочим елементом у системі пневматичної опалубки є оболонка куполоподібної форми, що виготовлена із міцної мембрани та виконує роль опалубки для бетону. Цю мембрану наповнюють повітрям під великим тиском за допомогою компресорів, та підтримують задану їй форму в продовж усього технологічного процесу до моменту схоплення бетонної суміші. Така пневматична опалубка включає у себе набагато менше монтажних елементів, що дозволяє поліпшити техніко-економічні показники. Використання пневматичної опалубки у сучасному будівництві може стати ключовим моментом у збільшенні ефективності будівництва, адже зведення такої опалубної системи займає набагато менше часу ніж для більш поширених щитових систем.

Розвиток технології пневматичної опалубки має потенціал не лише у зведенні тунелів метро, а і у інших будівельних напрямках. До прикладу, даний метод може стати у нагоді під час вирішення назального питання зі зведення бомбосховищ та укриттів для населення, або, навіть, для підприємств, адже пневматична опалубка може бути виготовлена різноманітної форми залежно від поставлених вимог конкретного об'єкту.

Ключові слова: *технологія пневматичної опалубки, підземне будівництво, будівництво тунельних об'єктів, будівництво метро неглибокого закладання.*

Постановка проблеми. *Постановка проблеми. У зв'язку з тим, що стрімкий розвиток великих міст випереджає розвиток транспортної інфраструктури, мешканці мегаполісів щоденно зіштовхуються з проблемою пересування по місту. Також актуальний недолік сучасних міст - поділ їх на спальні та робочі райони,*

що викликає маятникову міграцію людей. Великі відстані, перевантажені дороги та слабorozвинута мережа громадського транспорту - саме ці перешкоди стали проблемою для більшості містян, тож вони мали би бути вирішені спеціалістами з урбанізації. Винахід метрополітену вплинув на вирішення одразу трьох цих питань, але будівництво метрополітену – це дороговартісний та складний комплекс робіт який має враховувати безліч аспектів. Це стає викликом для будівельних компаній, що займаються влаштуванням підземних тунелів метро, вони мають врахувати технічні та економічні параметри під час розробки проекту, максимально підвищивши ефективність будівництва [1]. Геологічні особливості, такі як залягання підземних вод та нестабільні ґрунти, або, навіть, щільна забудова на поверхні землі має безпосередній вплив на підземну споруду, тож технології з облаштування підземного тунелю можуть відрізнятися на різних ділянках тунелю [2-6].

Аналіз існуючих технологій. Будівництво підземних тунелів є трудомісткою роботою, тож для покращення показників ефективності інженери-технологи розробили та продовжують вдосконалювати різнобічні технології у цьому напрямку. Сучасне підземне будівництво тунелів метро поділяється на два основні способи: відкритий спосіб та буровий (закритий) спосіб. За технологіями відкритого способу зводяться майже всі тунелі неглибокого залягання [1-3]. До бурового способу ж вдаються під час зведення ділянок тунелю на великій глибині.

Найрозповсюдженіші технології:

– Технологія механізованої проходки – це сучасний спосіб влаштування тунелів із використанням тунелебурильних комплексів (ТПК) або прохідних щитів. Спосіб полягає у неперервному процесі із роздроблення підземних порід без використання вибухівки, та одночасним зведенням стін тунелю у щойно утвореній порожнині. ТПК виконує всі етапи, починаючи із розробки ґрунту, його транспортування по гвинтовому конвеєру та подальшим влаштуванням стін тунелю, що складаються із заздалегідь виготовлених бетонних сегментів [2, 6-8].

Хоча ця технологія є дуже ефективною, все ж, основний недолік даної технології - це дорога вартість, ціноутворення якої включає доставку, утримання та обслуговування величезного комплексу ТПК.

– Новоавстрійський тунельний метод є більш економічно вигідним порівняно з механізованою проходкою, при цьому процес виконання технічних робіт займає більше часу. Основний акцент робиться на детальні розрахунки, емпіричні вимірювання та геофізичні дослідження ґрунту, адже ключовою ідеєю є розрахунок геологічного напруження гірського масиву для уникнення повного навантаження на стінки тунелю. Прокладання шляху у гірській породі виконується за допомогою буропідричних робіт, а стінки оправи виготовляють безпосередньо за місцем будівництва за допомогою торкрет-бетонування [9-11].

– Відкритий спосіб використовують для будівництва тунелів неглибокого закладання у зонах вільних від забудови, або спеціально виділених зонах. Такий спосіб будівництва значно простіший та дешевший завдяки уникненню використання тунелепрохідних комплексів, та в загальному підземних робіт як таких [5, 8, 12-14]. Всі будівельні роботи виконуються у котловані. Технологія полягає у попередньому вилученні ґрунтових порід з місця будівництва, зведення тунелю, та подальшій зворотній засипці ґрунту. Тунельну оправу зазвичай будують із укрупнених залізобетонних елементів, що були заздалегідь виготовлені на заводі та доставлені на місце будівництва. На кінцевому етапі, після

відновлення насипного шару, над тунелем можна будувати шляхопроводи, парки та сквери, або, навіть, віддати під невелику малоповерхову забудову.

Порушення проблем. Через стрімке збільшення населення у містах з'являється все більше сталених районів, що зазвичай будуються на околицях міст. Велика концентрація людей, які щоденно намагаються потрапити у центральні райони створює величезну проблему – затори. Нагальним питанням стала проблема громадського транспорту, яка потребує швидких, ефективних та економічно вигідних рішень. Пріоритетне місце у розвитку громадського транспорту має зайняти мережа метрополітену, адже цей вид транспорту має змогу за короткий час перевозити великі маси людей на великі відстані при цьому не завантажуючи автошляхи. Але будівництво тунелів метро це складний, дорогий та тривалий процес. До того ж, тунелі що знаходяться на великих глибинах мають проблеми з інклюзивністю, адже організувати спуск для маломобільних людей на великі глибини досить проблематично.

Для вирішення даного питання може послугувати концепція будівництва тунелів метро неглибокого закладання з використанням технології пневматичної опалубки. Ця технологія дозволить за менший проміжок часу зводити більше кілометрів тунелів метро на невеликих глибинах порівняно з раніше перерахованими методами будівництва. Головною перевагою у цьому способі є легкість монтажу опалубки на місці будівництва, а також створення суцільної монолітної залізобетонної оболонки замість збірних конструкцій.

Основна частина. Виготовлення тунелю метро неглибокого закладання із використанням пневматичної опалубки не є складним процесом, але потребує детально розробленого технологічного плану та особливої уваги на окремих етапах такого будівництва. Найважливішим у даному будівництві є якість бетонної суміші та вірно розрахований час постачання на будівельний майданчик цієї суміші [2, 11-12, 15]. Також важливим моментом є контроль тиску в опалубній системі, адже тиск має постійно утримуватись на конкретній позначці, яка була попередньо розрахована та задана технологом.

Технологічний процес будівництва тунелю поділяється на такі етапи:

- *Підготовка території.* На цьому етапі на будівельному майданчику відбуваються стандартні підготовчі роботи, такі як: розчищення території, зведення захисного паркану, завезення обладнання і матеріалів та інші.

- *Влаштування котловану.* Другим етапом будівництва тунелю є зведення опорних стін та земляні роботи. Тунелі неглибокого залягання можуть знаходитись на п'яти, десяти та, навіть, до двадцяти метрів під землею. В залежності від прийнятої глибини будівництва, технологія облаштування котловану буде змінюватись. Можуть бути влаштовані котловани як із природніми укосами, так і з вертикальними стінами із металевих або буронабивних паль.

- *Влаштування фундаментної плити.* Після завершення підготовчих та земляних робіт будівельники переходять до заливки основи тунелю. Фундаментом виступає монолітна армована плита, що має з обох сторін спеціальні округлі виймки, які будуть використані для закріплення майбутньої опалубки. Для плити облаштовують опалубку із щитів, вслід за встановленням опалубки виконуються роботи з бетонування. Заливку, на даному етапі, виконуються звичним способом - за допомогою бетононасосу.

- *Розміщення пневматичної опалубки.* Четвертим кроком є встановлення пневматичної опалубки на робочі відмітки відрізка майбутнього тунелю. Нижню частину пневматичної опалубки закладають у спеціальну округлу канавку, що заздалегідь передбачена під час бетонування фундаментної плити. Наступним кроком є надування пневматичної трубки, що вшита у нижню частину мембрани. Під час надування ця трубка має знаходитись у канавці та щільно притиснути мембрану до стінок канавки не давши їй рухатись під час подальших робіт. Пневматичну трубку надувають повітряним насосом через відповідні сопла під тиском $1,2 \text{ кН/м}^2$ (рис. 1).

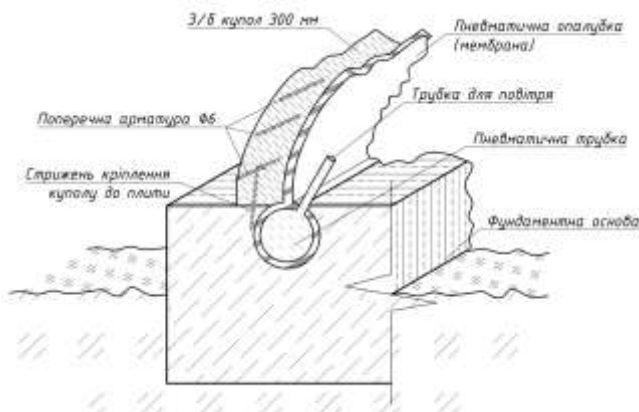


Рис. 1. Кріплення мембрани до фундаменту за технологією пневматичної трубки

- *Надування мембрани.* П'ятий етап починається після перевірки якості усіх кріплень мембрани. Для надування опалубки використовують компресор-насос, що встановлюють на достатній відстані, де він не буде заважати проводити подальші роботи. Насос має бути накритим спеціальним захисним боксом з отворами для циркуляції повітря. Насос приєднується до мембрани соплами, що постачаються у комплекті з нею. Після того як наша мембрана повністю надулась та прийняла проектну форму, насоси переводять у режим підтримки заданого тиску всередині мембрани (рис.2).

- *Армування оправи тунелю.* Далі розпочинаються роботи із в'язання каркасу арматурної сітки оправи тунелю. Каркас повинен мати два шари арматурної сітки, тож між шарами необхідно розміщувати «жабки» (зігнуті арматурні елементи). Дуже важливо витримати захисний шар бетону 70 мм, для цього мають бути використані пластикові тримачі арматури, що запобігають доторку арматурних стержнів до опалубки. Завдяки такому захисному шару арматура буде захищена від зовнішнього впливу.

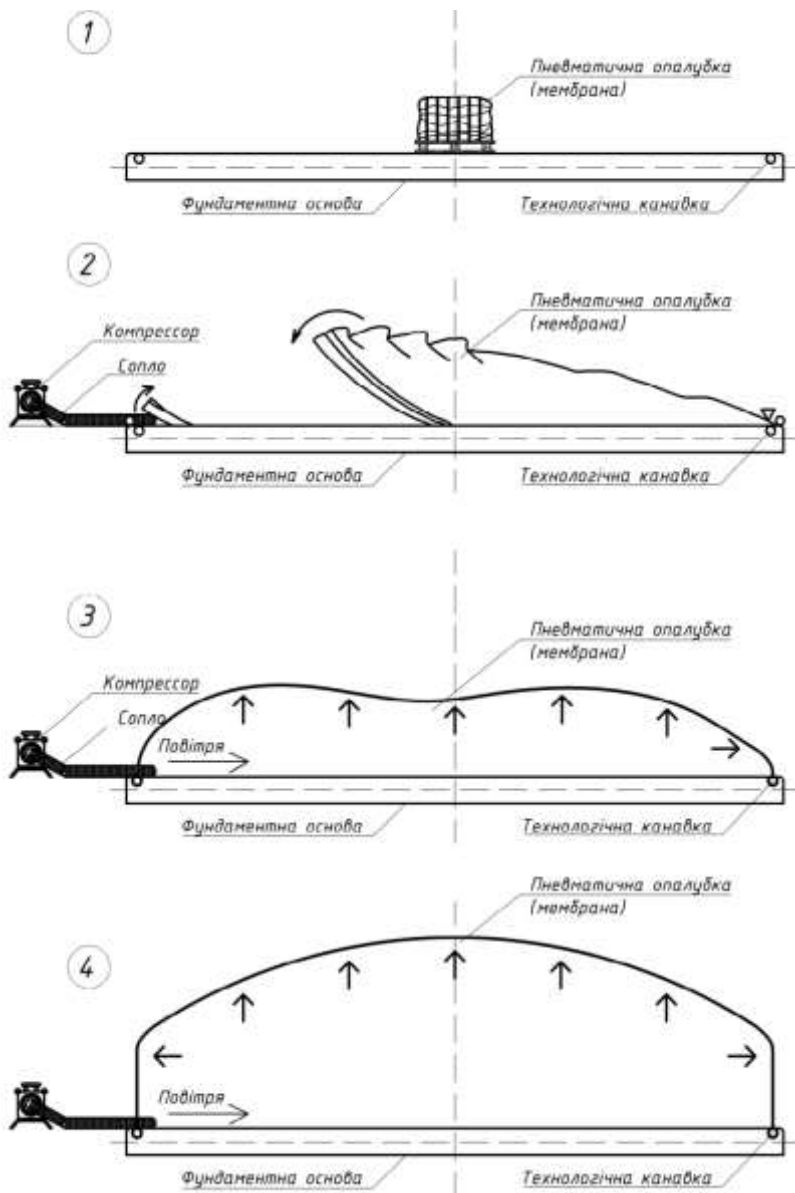


Рис. 2. Поетапне влаштування пневматичної опалубки

- *Бетонування тунелю.* Нанесення бетонної суміші відбувається за технологією сухого торкретування. Бетонна суміш укладається у 4-8 шарів, в залежності від прийнятої товщини стінки тунелю. Кожен шар має 3-5 см завтовшки. Після нанесення одного шару має пройти технологічна перерва від 4 годин для попереднього схоплення бетонної суміші.

- *Гідроізоляція тунелю.* Після повного схоплення бетону має бути виконана гідроізоляція поверхні тунелю. Гідроізоляція виконується методом набризку пінополіуретану на бетонну поверхню. Гідроізоляція має бути нанесена особливо делікатно, без пропусків, для уникнення просочення ґрунтових вод у стіни тунелю та подальшого його руйнування.

- *Зворотня засипка.* До останнього етапу можна приступати лише після завершення проведення усіх робіт що вимагають доступу до оправи тунелю ззовні. Подальші будівельні роботи будуть проходити лише у самому тунелі, під землею.

- *Опоряджувальні роботи.* У проєкті мають бути передбачені роботи із облаштування території над тунелем. Таку територію краще за все використати для облаштування місць рекреації та відпочинку – зелених зон, велодоріжок, спортивних майданчиків. У нинішньому світі екологічність будівництва повинна бути невід’ємною складовою усіх сучасних будівельних проєктів.

Висновки. Використання пневматичної опалубки у зведених тунельних споруд неглибокого залягання є ключовим варіантом для подальшого розвитку та модернізації цього напрямку будівництва. Цей метод дозволить ефективно будувати тунелі метро, шляхопроводи, а також підземні бункери та сховища.

Конструкція таких тунелів має чудову міцність та гарантує довгий термін служби зведених споруд. Крім того дана технологія поліпшує показник часу витраченого на будівництво окремих ділянок тунелю. Також така технологія позбавить будівельні компанії від високовартісної доставки збірних елементів до будівельного майданчику, адже усі роботи з бетонування відбуваються безпосередньо на місці будівництва.

Отже, використання технології влаштування підземних тунельних об’єктів з використанням пневматичної опалубки є доцільним у тунелебудівничій галузі. Ця технологія поєднала у собі надійність, економічність та ефективність і являється привабливим рішенням для компаній що займаються будівництвом тунелів метро.

Список літератури:

1. Шпакова, Г., Гриців, Б. Технологія влаштування підземних поверхів в існуючих будівлях з використанням вдавлювальних трубобетонних паль. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин.* КНУБА, 2023. № 52. С. 22-33. <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/297546>.

2. Petra C. van Hennik & Rogier Houtman. Textile Composites and Inflatable Structures II. *Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells.* 2010.8: 99-116 p.

3. Kromoser, B. & Huber, P. *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering.* Vienna, Austria. 2016. 2-8 p.

4. Sobek, W. & Sobek, U. *Auf Pneumatisch Gestützten Schalungen Hergestellte Betonschalen.* Stuttgart, Germany, 1987.

5. Kromoser, B. & Huber, P. *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering,* 2016.

6. Bini, D. Concrete domes. *Official Journal of the Master Builders' Association of New South Wales*, vol. 3, no. 7. 1974.
7. Sobek, W. Ultraleichtbau, *Stahlbau*. 2014. Vol. 83, no. 11, pp. 784-789.
8. Bini D. *Method for erecting structures*. US Patent 3,462,521.1969.
9. Head J. *No Nails, No Lumber – The Bubble Houses of Wallace Neff*, Princeton Architectural Press. New York, NY, USA, 2011.
10. Kromoser B., Kollegger J. Application areas for pneumatic forming of hardened concrete. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2015. Vol. 56. No. 3, pp. 187-198.
11. Kromoser B., Kollegger J. Herstellung von schalentragwerken aus Beton mit der 'Pneumatic Wedge Method'. *Beton-und Stahlbetonbau*. 2014. Vol. 109. No. 8, pp. 557-565.
12. Kromoser B., Kollegger J. Pneumatic forming of hardened concrete-building shells in the 21st century. *Structural Concrete*. 2015. Vol. 16. No. 2. Pp. 161-171.
13. Herzog T., Minke G., Eggers H. *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Stuttgart: Gerd Hatje. 1976.
14. Quinn G., Gengnage, C. A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork. in *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile, Adaptable and Rapidly Assembled Structures (MARAS '14)*, June 2014. Pp. 129-144.
15. Каталог компанії SO.CA.P, яка орієнтується на виготовлені мембранних опалубок у Італії. <http://www.socapsrl.com/>

References:

1. Shpakova, G.; Grytsiv, B. (2023). Technology of constructing underground floors in existing buildings using pressed pipe-concrete piles. *Ways to improve construction efficiency in the context of the formation of market relations*. KNUSA. No. 52. pp. 22-33. <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/297546>.
2. Petra C. van Hennik & Rogier Houtman. (2010). Textile Composites and Inflatable Structures II. *Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells*. 8: 99-116 p.
3. Kromoser, B. & Huber, P. (2016). *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering*. Vienna, Austria. P.p. 2-8.
4. Sobek, W. & Sobek, U. (1987). *Auf Pneumatisch Gestützten Schalungen Hergestellte Betonschalen*. Stuttgart, Germany.
5. Kromoser, B. & Huber, P. (2016). *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering*.
6. Bini, D. (1974). Concrete domes. *Official Journal of the Master Builders' Association of New South Wales*, vol. 3, no. 7.
7. Sobek, W. (2014). Ultraleichtbau, *Stahlbau*. vol. 83, no. 11, pp. 784-789.
8. Bini, D. (1969). *Method for erecting structures*. US Patent 3,462,521.
9. Head, J. (2011). *No Nails, No Lumber – The Bubble Houses of Wallace Neff*, Princeton Architectural Press. New York, NY, USA.
10. Kromoser, B. and Kollegger, J. (2015). Application areas for pneumatic forming of hardened concrete. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. Vol. 56. No. 3, pp. 187-198.

11. Kromoser, B. and Kollegger, J. (2014). Herstellung von schalentragerwerken aus Beton mit der 'Pneumatic Wedge Method'. *Beton-und Stahlbetonbau*. Vol. 109. No. 8, pp. 557-565.

12. Kromoser, B. and Kollegger, J. (2015). Pneumatic forming of hardened concrete–building shells in the 21st century. *Structural Concrete*. Vol. 16. No. 2. Pp. 161-171.

13. Herzog, T., Minke, G. and Eggers, H. (1976). *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Stuttgart: Gerd Hatje.

14. Quinn, G. and Gengnagel, C. (2014). A review of elastic grid shells, their erection methods and the potential use of pneumatic formwork. in *Proceedings of the 4th International Conference on Mobile, Adaptable and Rapidly Assembled Structures (MARAS '14)*, June 2014. Pp. 129-144.

15. Catalog of SO.CA.P, a company specializing in the production of membrane formwork in Italy. <http://www.socapsrl.com/>

H. Shpakova, D. Prokopenko

Shallow tunnel construction technology using pneumatic formwork

This article considers the technology of underground tunnel construction using pneumatic formwork, which aims to improve and make easier construction of tunnel facilities. Having familiarized with problems of the construction, in particular subway facilities, and analyzed its basic aspects of this construction, I would like to propose using this technology for construction of shallow subway tunnels. The peculiarity of this technology is to optimize a building process and improve quality characteristics of constructed tunnels by replacing prefabricated elements with a solid monolithic tunnel which is built directly on the construction site. The fundamental technological difference is applying pneumatic formwork instead of standard formwork panels and systems of support posts and longitudinal beams. The main working element in pneumatic formwork system is a dome-shaped shell made of a durable membrane that serves as a formwork for concrete. This membrane is filled with air under high pressure using compressors and maintains its shape throughout the entire technological process until the concrete mixture sets. Such pneumatic formwork includes much fewer mounting elements, which improves technical and economic performance. Utilization of pneumatic formwork in modern construction can be a key point in improving technical and economic indices, as construction of such a formwork system takes much less time than for more common panel systems.

The development of pneumatic formwork technology has potential not only in the construction of subway but also in other construction areas. As an example, this method can be useful in solving an urgent issue of building bomb shelters for population, and even for enterprises because pneumatic formwork can be made in various shapes depending on the requirements for a particular facility.

Keywords: the technology of pneumatic formwork, underground construction, tunnel construction, construction of shallow tunnels for subway.