

DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53\(3\).308-317](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).308-317)
УДК: 69:624/624.03+624.1

Ганна ШПАКОВА

докт. екон. наук, професор

ORCID: 0000-0003-2124-0815

Даниїл ПРОКОПЕНКО

аспірант

ORCID: 0009-0001-6085-2032

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ПНЕВМАТИЧНА ОПАЛУБКА ЯК ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД БУДІВНИЦТВА ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

Сучасне будівництво підземних споруд є особливо відповідальною та високовартісною цариною галузі, впровадження в яку інноваційних технологій дозволяють значно підвищити ефективність зведення об'єктів, зменшити витрати часу та забезпечити високу якість конструкцій, і, як наслідок, знизити кінцеву вартість. Однією з таких технологій є пневматична опалубка, що відкриває нові можливості для будівництва різноманітних підземних об'єктів. Ця технологія полягає у використанні оболонки з міцної мембрани, наповненої повітрям під великим тиском, і може бути адаптована для зведення різних типів підземних споруд. Зокрема, застосування пневматичної опалубки може бути ефективним при будівництві тунелів метрополітену, що є одними з найбільш складних і трудомістких об'єктів підземного будівництва. Технологія виконання монолітних бетонних конструкцій у пневмоопалубці дозволяє значно скоротити час, необхідний для монтажу опалубки та демонтажу. Крім того, пневматична опалубка має великий потенціал для застосування в будівництві інших видів підземних споруд, таких як бомбосховища, укриття, складські приміщення, підземні електростанції та сховища для питної води.

Особливо перспективним є застосування пневматичної опалубки для будівництва тунелів метро неглибокого закладання, де особливості конструктивних вимог та обмеження зручності будівельних робіт потребують застосування компактних, безпечних і швидких у виготовленні та монтажі допоміжних конструкцій. Однією з головних переваг цієї технології є її здатність швидко адаптуватися до різноманітних вимог проекту, зокрема щодо форми і розмірів конструкції. Пневматичні опалубки можуть бути виготовлені різних форм і розмірів в залежності від конкретних вимог підземного об'єкта. Це дозволяє будувати не лише тунелі, а й інші важливі об'єкти, які можуть бути використані для різних потреб: від цивільних укриттів до об'єктів критичної інфраструктури.

Метою цієї статті є дослідження можливостей використання пневматичної опалубки у будівництві різноманітних підземних споруд, таких як тунелі метрополітену, бомбосховища, укриття та інші об'єкти інфраструктури, а також оцінка її технічних переваг і потенціалу в умовах сучасних викликів.

Ключові слова: *підземне будівництво, пневматична опалубка, тунелі, мембрана, будівництво підземних об'єктів, укриття.*

Постановка проблеми. Сучасне будівництво підземних споруд стикається з низкою важливих викликів, що потребують пошуку ефективних та інноваційних рішень. Однією з основних проблем є високі витрати, пов'язані з процесом зведення підземних конструкцій. Будівництво підземних споруд вимагає значних капіталовкладень, що пов'язано з використанням спеціалізованих матеріалів, складних технологій, а також високими витратами на транспортування та монтаж [1].

Швидкість виконання робіт є не менш важливим аспектом, оскільки зазвичай підземне будівництво є довготривалим процесом, який може затягуватися через непередбачувані фактори, такі як геологічні умови або технічні складнощі. У зв'язку з цим, зниження часу, необхідного для завершення робіт, має безпосередній вплив на економічну ефективність проектів і їх загальну вартість.

Технологічність процесу будівництва також є важливою проблемою. Використання традиційних методів спорудження підземних конструкцій часто вимагає великих людських ресурсів та висококваліфікованих спеціалістів, що не тільки збільшує витрати, але й може призводити до технічних помилок. У той самий час, впровадження новітніх технологій дозволяє оптимізувати робочі процеси, підвищити точність і зменшити кількість помилок на етапі будівництва.

Енергоефективність є невід'ємним викликом у сучасному будівництві і будівництво підземних споруд не є винятком, тож це також є важливим чинником у контексті їх експлуатації. Підземні об'єкти, такі як сховища, складські приміщення або інші інфраструктурні елементи, повинні бути не лише міцними і надійними, але й енергоефективними для забезпечення зниження витрат під час їх зведення та на їх утримання. Тому інтеграція сучасних технологій енергоефективності у процес будівництва підземних споруд стає необхідною умовою для досягнення оптимальних економічних та експлуатаційних характеристик.

Враховуючи всі ці фактори, важливо шукати нові підходи та рішення, які можуть знизити вартість, прискорити процес зведення та підвищити ефективність будівництва. Одним із таких рішень є використання пневматичної опалубки, яка має потенціал для вирішення низки вищезазначених проблем завдяки своїй технологічності, швидкості монтажу, зниженню витрат та покращенню енергоефективності підземних споруд.

Аналіз існуючих технологій. Будівництво підземних споруд, таких як тунелі, автотунелі, сховища, військові об'єкти, укриття, традиційно вимагає використання громіздких та складних систем опалубки. Ці системи зазвичай включають щитову опалубку, систему стійок, балок та інших елементів, що забезпечують стабільність конструкції на час заливки бетону. У порівнянні з цими методами, пневматична опалубка пропонує значні переваги, але й має певні обмеження, які також варто враховувати.

- *Швидкість будівництва*

Пневматична опалубка значно скорочує час, необхідний для зведення підземних споруд. Оскільки основним елементом є надувна оболонка, яка заповнюється повітрям і підтримує форму під час заливки бетону, цей процес потребує значно менше часу на монтаж та демонтаж у порівнянні з традиційними щитовими системами. Традиційні методи, при їх використанні у аналогічних роботах, потребують більшої кількості монтажних елементів, що ускладнює процес і збільшує загальний час будівництва.

- *Вартість будівництва*

Традиційні методи будівництва підземних споруд часто вимагають великих витрат на матеріали та робочу силу. Щитові опалубки та їх установка потребують великої кількості робітників і техніки. Водночас, пневматична опалубка, завдяки зменшеній кількості монтажних елементів і меншій потребі в технічному персоналі, здатна значно знизити загальні витрати [2]. Також, використання пневматичних оболонок дозволяє зменшити витрати на матеріали, оскільки для її виготовлення використовуються мембрани, що є легшими та дешевшими у порівнянні з традиційними металевими чи залізобетонними конструкціями.

- *Енергоспоживання та ефективність*

З точки зору енергоефективності, пневматична опалубка також має кілька переваг. Оскільки мембрани займають менше місця і використовують повітря під тиском, потреба в енергозатратних механізмах для підтримки форми опалубки значно зменшується. Мембранну опалубку можна встановлювати методом «пневматичного клинку». Пневматичні клини, встановлені між бетонними елементами, захищають тонку плівку, що використовується як підйомна опалубка, і регулюють відстань між цими елементами під час трансформації [3]. У традиційних системах опалубки, зазвичай, використовуються важкі механізми для підтримки конструкції, що призводить до більш високих витрат енергії на етапах монтажу та експлуатації.

- *Гнучкість та адаптивність*

Пневматична опалубка дозволяє адаптуватися до різних форм і розмірів підземних споруд [4]. Це особливо важливо в умовах складного рельєфу або при будівництві споруд у містах з обмеженим простором. Традиційні методи опалубки зазвичай мають стандартизовані розміри і форми, що може обмежувати їх використання у специфічних умовах [15].

- *Безпека та надійність*

Незважаючи на свої переваги, пневматична опалубка також має певні обмеження з точки зору надійності та безпеки. Традиційні методи, зокрема, щитова опалубка, вже зарекомендували себе на практиці і гарантують високу надійність у складних умовах. У той час як пневматична опалубка демонструє хороші результати при правильному її застосуванні, для її ефективного використання необхідне ретельне планування та точне контролювання тиску повітря, що може бути проблемою в умовах екстремальних навантажень або в нестабільних ґрунтах. Також пневматичну опалубку можна споруджувати в змішаних метало-залізобетонних конструкціях. Доцільність такого рішення визначається малими напруженнями в мембрані. У бетонних оболонкових конструкціях зсувні та згинальні напруження можуть бути мінімізовані, якщо геометрія конструкції оптимізована, а постійні навантаження, зокрема власна вага, можуть в основному передаватися через мембранні сили в площині [5].

- *Використання в умовах міста та обмеженого простору*

Особливою перевагою пневматичної опалубки є її можливість застосування в обмежених умовах міського середовища. У таких випадках, де будівництво потребує зведення об'єктів на невеликих ділянках або в умовах щільної забудови, пневматична опалубка дозволяє реалізувати проекти, що потребують швидкого монтажу і мінімальної площі для будівництва. Традиційні методи будівництва можуть вимагати значно більше простору для встановлення великогабаритних конструкцій, що може бути проблемою в містах з високою щільністю забудови.

Основна частина. Технологія пневматичної опалубки є інноваційним методом будівництва, що значно спрощує та прискорює процес зведення підземних споруд. Вона включає кілька ключових етапів, які забезпечують високий рівень ефективності, зниження витрат часу та матеріалів, а також покращену якість споруди. Найважливішим у даному будівництві є якість бетонної суміші та вірно розрахований час постачання на будівельний майданчик цієї суміші. Також важливим моментом є контроль тиску в опалубній системі, адже тиск має постійно утримуватися на конкретній позначці, яка була попередньо розрахована та задана технологом [6]. Розглянемо поетапно, як саме виконується цей процес:

- *Підготовка будівельного майданчика.* Першим етапом у застосуванні пневматичної опалубки є підготовка будівельного майданчика. На цьому етапі проводиться розчищення ділянки, на якій буде зводитися підземна споруда. Необхідно ретельно підготувати поверхню для монтажу системи пневматичної опалубки, враховуючи всі геологічні особливості, такі як тип ґрунтів та наявність підземних вод. Це дозволяє запобігти можливим проблемам із стабільністю під час будівництва.

- *Монтаж опалубки.* Після підготовки ділянки розпочинається монтаж пневматичної опалубки. Основною складовою цієї технології є оболонка з

міцного та еластичного матеріалу, зазвичай спеціальної мембрани, яка має форму купола чи півсфери. Мембрана виготовляється з високоміцних матеріалів, які здатні витримувати значні тиски повітря.

Оболонка встановлюється на попередньо підготовлену основу, а для забезпечення її стійкості та підтримки потрібної форми під час заливки бетону, до мембрани підключаються компресори. Вони накачують повітря всередину оболонки, підтримуючи її форму та необхідний рівень тиску.

- *Заповнення оболонки повітрям.* На третьому етапі відбувається накачування повітря в мембрану. Це відбувається за допомогою компресорів, які надають оболонці потрібної форми і стійкості. Коли мембрана наповнена повітрям, вона готова до того, щоб стати опалубкою для заливки бетону. Тиск, який утримується всередині оболонки, є критичним для забезпечення її правильної форми, тому на цьому етапі важливо точно контролювати рівень тиску повітря.

- *Заливка бетонної суміші.* Після того, як пневматична оболонка стабільно підтримує потрібну форму, розпочинається процес заливки бетонної суміші. Бетон подається через спеціальні труби, які підключені до бетононасосів. Оскільки оболонка пневматичної опалубки вже має потрібну форму, бетон розподіляється рівномірно по всій її внутрішній поверхні, формуючи монолітну конструкцію. На цьому етапі важливо забезпечити рівномірне розподілення бетону та його правильне ущільнення [14].

- *Витримка та набір міцності.* Після заливки бетону оболонка продовжує підтримувати форму конструкції до того часу, поки бетон не досягне достатньої міцності для того, щоб зберігати форму без зовнішнього підтримування. Зазвичай, цей процес триває кілька годин або днів, в залежності від типу використовуваної бетонної суміші та умов навколишнього середовища [13].

- *Демонтаж пневматичної оболонки.* Після того, як бетон набув необхідної міцності, пневматичну оболонку можна демонтувати. Оскільки мембрана не є частиною монолітної конструкції, вона легко знімається без ушкоджень. Вона може бути використана повторно для інших етапів будівництва, що значно знижує витрати на матеріали. У разі необхідності можна провести додаткову обробку поверхні бетону для досягнення бажаних характеристик.

- *Фінішна обробка та підготовка до подальших робіт.* Останній етап включає завершення всіх будівельних робіт, таких як монтаж систем вентиляції, водопостачання, а також внутрішнє оздоблення або армування конструкції, якщо це потрібно для конкретного типу підземної споруди. На цьому етапі також можуть проводитися роботи з герметизації та зміцнення бетонних конструкцій, особливо якщо це стосується таких об'єктів, як тунелі або укриття.

Практичне використання пневматичної опалубки у будівництві.

Пневматична опалубка є інноваційною технологією, яка може бути застосована для зведення широкого спектру підземних споруд. Ось деякі приклади підземних споруд, де можна ефективно застосовувати пневматичну опалубку:

Тунелі метро. Тунелі метрополітену є одним із найбільш складних і відповідальних об'єктів підземного будівництва. 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 [6].

Автотунелі. Пневматична опалубка також може бути використана для будівництва автотунелів, що є важливою частиною сучасної транспортної інфраструктури. Такі споруди потребують високої міцності та зносостійкості. Пневматична опалубка забезпечує швидкий процес монтажу та дозволяє досягати необхідної міцності і довговічності тунелів, зокрема для зведення тунелів під дорогами або для створення багаторівневих автострад у міських умовах.

Сховища та підземні склади. Пневматична опалубка є ідеальним рішенням для будівництва підземних сховищ, складів та інших інфраструктурних об'єктів, що вимагають високого рівня захисту та безпеки. Можна адаптувати технологію архітектора Данте Біні для наземного будівництва яка була ліцензована по всьому світу для зведення житлових будинків, спортивних споруд і промислових будівель, таких як сільськогосподарські склади [7, 8]. Також гарним прикладом є Нефф, який мав особисту пристрасть до своїх куполоподібних будинків-бульбашок, виготовлених з арматурного бетону, який лився безпосередньо на надувну повітряну кулю [9]. Підземні сховища для зберігання важливих ресурсів або харчових продуктів, а також сховища для питної води, можуть бути збудовані з використанням цієї технології [10]. Її гнучкість дозволяє створювати різні форми конструкцій, що ідеально підходять для специфічних потреб таких об'єктів.

Захисні споруди. У зв'язку з необхідністю захисту цивільних та військових об'єктів від потенційних загроз, використання пневматичної опалубки для будівництва підземних укриттів, бомбосховищ та інших захисних споруд є надзвичайно актуальним. Пневматична опалубка дозволяє будувати зміцнені конструкції, що здатні витримати великі навантаження, при цьому значно зменшуючи час на зведення. Це важливо для забезпечення швидкої реакції на зростаючі вимоги безпеки.

Військові об'єкти та укриття. Пневматична опалубка може бути використана для створення різних військових підземних об'єктів, таких як командні пункти, бункери, склади боєприпасів або укриття для техніки, ангари для літаків. Здатність опалубки до швидкої установки та висока міцність отриманої конструкції робить її ідеальним рішенням для таких споруд, де важливими є не тільки зручність будівництва, але й забезпечення надійності та захисту від зовнішніх загроз. А розміщення таких конструкцій під землею, надасть їм додаткової та надійності від.

Інші підземні об'єкти інфраструктури. Крім того, пневматична опалубка може бути застосована для зведення різноманітних підземних об'єктів, таких як підземні паркінги, водопровідні та каналізаційні тунелі, підземні електростанції та інші елементи критичної інфраструктури, що потребують додаткового захисту. Для виробництва водовідвідних труб та бетонних труб використовуються трубоподібні надувні конструкції [11, 12]. Висока технологічність такого методу дозволяє швидко реагувати на зростаючі вимоги до створення нових об'єктів інфраструктури, як у межах міської території, так і сільській місцевості, зберігаючи при цьому високу ефективність, економічну вигоду і безпеку.

Висновки. Технологія пневматичної опалубки є інноваційним та ефективним методом для будівництва підземних споруд, що має великий потенціал для використання в різноманітних об'єктах, таких як тунелі метро, автотунелі, сховища, захисні споруди та військові об'єкти. Вона дозволяє значно скоротити час зведення підземних конструкцій, знизити витрати на матеріали та робочу силу, а також підвищити енергоефективність будівництва завдяки використанню мінімальної кількості монтажних елементів та механізмів. В порівнянні з традиційними методами будівництва, пневматична опалубка має ряд переваг, таких як швидкість реалізації проєктів, економія коштів на матеріали, а також високу гнучкість у формуванні конструкцій, що особливо важливо при роботі в складних геологічних умовах або в умовах обмеженого простору міста. Заливка бетону в такій опалубці забезпечує рівномірний розподіл матеріалу, що покращує якість бетонної конструкції. При цьому технологія пневматичної опалубки не позбавлена і деяких обмежень. Вона вимагає ретельного контролю за тиском повітря та врахування геологічних умов, оскільки нестабільні ґрунти або наявність підземних вод можуть ускладнити її застосування в деяких регіонах. Проте в умовах, де ця технологія може бути застосована, вона дозволяє досягти значних результатів щодо зниження витрат та прискорення будівельних процесів.

У загальному підсумку, пневматична опалубка є перспективним інструментом для майбутнього розвитку підземного будівництва. Її використання дозволяє значно підвищити ефективність зведення підземних споруд, скоротити час і витрати, а також забезпечити високу якість кінцевих конструкцій. З огляду на переваги пневматичної опалубки,

її впровадження в практику підземного будівництва може значно змінити підхід до проектування та реалізації великих інфраструктурних об'єктів, зокрема в умовах обмеженого простору та високих вимог до швидкості виконання робіт. Технологія має великий потенціал для розвитку і може стати важливим кроком у розвитку сучасного будівництва, зокрема в умовах міського середовища та складних геологічних умов.

Список використаної літератури

1. B. Kromoser and J. Kollegger. Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century, *Structural Concrete*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 161-171.
2. G. Quinn and K. Hengnagel. 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, Adaptive, and Rapidly Assembled Structures* (MARAS '14), June 2014, pp. 129-144.
3. B. Kromoser and J. Kollegger. Herstellung von schalentragerwerken aus Beton mit der «Pneumatic Wedge Method». *Beton-und Stahlbetonbau*. 2014, vol. 109, no. 8, pp. 557-565.
4. Petra K. van Hennik and Roger Houtman. Textile Composites and Inflatable Structures II. *Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells*. 2010, pp. 99-116.
- 5 T. Herzog, H. Minke, and H. Eggers (1976). *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Stuttgart: Gerd Hatje.
6. W. Sobek and U. Sobek. *Auf Pneumatisch Gestützten Schalungen Hergestellte Betonschalen*. Stuttgart, Germany, 1987.
7. Шпакова Г.В., Прокопенко Д.В. Технологія влаштування тунелів неглибокого закладання з використанням пневматичної опалубки. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, КНУБА, 2024. №53. С. 103-110. <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/307941>.
8. B. Kromoser and J. Kollegger. Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century. *Structural Concrete*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 161-171.
9. Isler H. New materials for shell and spatial structures. *Proceedings of the IASS World Conference*, 1979. Madrid, Spain.
10. D. Bini. Concrete domes. *Official Journal of the Master Builders' Association of New South Wales*, 1974, vol. 3, no. 7.
11. D. Bini. *Method for erecting structures*. U.S. Patent 3,462,521, 1969.
12. J. Head. No Nails, No Lumber. *The Bubble Houses of Wallace Neff*. Princeton Architectural Press. New York, NY, USA, 2011.
13. Dome Technology LLC. <https://www.dometechnology.com>.
14. Benjamin Kromoser and Patrick Huber (2016). *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering*.

15. Каталог компанії SO.CA.P що орієнтується на виготовлені мембранних опалубок у Італії. <http://www.socapsrl.com/>.

References:

1. B. Kromoser and J. Kollegger. *Pneumatic forming of hardened concrete — building shells in the 21st century*. Structural Concrete. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 161-171.
2. G. Quinn and K. Hengnagel. *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, Adaptive, and Rapidly Assembled Structures (MARAS '14), June 2014, pp. 129-144.
3. B. Kromoser and J. Kollegger. Herstellung von schalentragwerken aus Beton mit der «Pneumatic Wedge Method». *Beton-und Stahlbetonbau*. 2014, vol. 109, no. 8, pp. 557-565.
4. Petra K. van Hennik and Roger Houtman. Textile Composites and Inflatable Structures II. *Pneumatic Formwork for Irregular Curved Thin Shells*. 2010, pp. 99-116.
5. T. Herzog, H. Minke, and H. Eggers (1976). *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft*. Stuttgart: Gerd Hatje.
6. W. Sobek and U. Sobek (1987). *Auf Pneumatisch Gestützten Schalungen Hergestellte Betonschalen*. Stuttgart, Germany.
7. Shpakova G.V., Prokopenko D.V. Technology of constructing shallow tunnels using pneumatic formwork. *Ways to Improve Construction Efficiency*, KNUCA, 2024. No. 53, pp. 103-110. <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/307941>.
8. B. Kromoser and J. Kollegger. Pneumatic forming of hardened concrete — building shells in the 21st century. *Structural Concrete*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 161-171.
9. Isler H. New materials for shell and spatial structures. *Proceedings of the IASS World Conference*, 1979, Madrid, Spain.
10. D. Bini. Concrete domes. *Official Journal of the Master Builders' Association of New South Wales*, 1974, vol. 3, no. 7.
11. D. Bini. *Method for erecting structures*. U.S. Patent 3.462.521, 1969.
12. J. Head. No Nails, No Lumber. *The Bubble Houses of Wallace Neff*. Princeton Architectural Press. New York, NY, USA, 2011.
13. Dome Technology LLC. <https://www.dometechnology.com>.
14. Benjamin Kromoser and Patrick Huber (2016). *Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering*.
15. SO.CA.P company catalog specializing in the production of membrane formworks in Italy. <http://www.socapsrl.com/>.

H. Shpakova, D. Prokopenko
Pneumatic Formwork as an Effective Method for Constructing Underground Structures

In modern underground construction, one of the key directions is the implementation of innovative technologies that significantly enhance the efficiency of building projects, reduce time costs, and ensure high-quality structures. One such technology is pneumatic formwork, which opens up new possibilities for the construction of various underground facilities. This technology, which involves using a durable membrane shell filled with air under high pressure, can be adapted for constructing different types of underground structures. Pneumatic formwork can be particularly effective in the construction of subway tunnels, one of the most complex and labor-intensive underground projects. It enables a significant reduction in the time required for formwork installation and improves the technical and economic efficiency of building shallow-depth tunnels. Additionally, pneumatic formwork has great potential for use in the construction of other underground structures, such as bomb shelters, protective shelters, storage rooms, underground power stations, and drinking water reservoirs.

The application of pneumatic formwork is particularly promising in the construction of shallow-depth metro tunnels, where the specific structural requirements and constraints of the construction process demand the use of compact and rapid manufacturing and installation technologies. One of the main advantages of this technology is its ability to quickly adapt to various project requirements, including the shape and size of the structure. Pneumatic formworks can be produced in various shapes and sizes, depending on the specific needs of the underground facility. This flexibility allows for the construction of not only tunnels but also other essential infrastructure projects, from civil shelters to critical infrastructure facilities.

The purpose of this article is to explore the potential use of pneumatic formwork in the construction of various underground facilities, such as metro tunnels, bomb shelters, protective shelters, and other infrastructure projects, as well as to assess its technical advantages and potential in the context of modern challenges.

Key words: underground construction, pneumatic formwork, tunnels, membrane, construction of underground facilities, shelters.

Посилання на статтю:

АРА: Shpakova, H., & Prokopenko, D. (2024). Pnevmatychna opalubka yak efektyvnyi metod budivnytstva pidzemnykh ob'ektiv. [Pneumatic Formwork as an Effective Method for Constructing Underground Structures]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva*, 53(3), 308-317.

ДСТУ: Шпакова Г.В., Прокопенко Д.В. (2024). Пневматична опалубка як ефективний метод будівництва підземних об'єктів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. № 53(3). С. 308-317.