

УДК 622.2; 624.1

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-39>

ҐРУНТОБЕТОННЕ КРІПЛЕННЯ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Гайко Геннадій Іванович,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри геоінженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0002-4263-5958

Ган Анатолій Леонідович

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри геоінженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID ID: 0000-0003-0832-1338

Матвійчук Іван Олександрович

доктор філософії, науковий співробітник
ДП «Науково-дослідний інститут будівельного виробництва імені
В. С. Балицького»
ORCID ID: 0000-0002-3262-8762

Розглянуто проблеми традиційних способів підземного будівництва в ґрунтових масивах, відзначено економічні, технічні й безпекові ризики зведення підземних об'єктів. Проаналізовано досвід використання струменевої цементації ґрунтів у цивільному, промисловому й підземному будівництві. Акцентовано увагу на носійній здатності й потенціалі використання ґрунтобетону як матеріалу кріплення (оправи) підземних споруд. Розроблено конструкцію ґрунтобетонного кріплення та новий спосіб її зведення шляхом свердловинного замоноличування ґрунтів по контуру споруди з використанням струменевої цементації, що забезпечує скорочення витрат матеріалів і загальної вартості підземної споруди шляхом поєднання функцій тимчасових (огороджувальних) і постійних (тримальних) конструкцій. Запропоновано конструкцію комбінованого кріплення: ґрунтобетон – анкери – набризкбетон. Проведено аналіз конструктивних і технологічних переваг розробленого кріплення в порівнянні з розповсюдженими конструкціями. Зокрема, відзначено можливість повного оконтурення підземної споруди шаром ґрунтобетону з денної поверхні (відпадає потреба в утворенні та облаштуванні котловану), скорочення витрат матеріалів у порівнянні з поширеним способом «стіна в ґрунті» (оскільки висота вертикальних стінових конструкцій дорівнює в нашому випадку висоті споруди, стіни не піднімаються до земної поверхні), можливість ефективного формування товщини ґрунтоцементної оправи із забезпеченням необхідної носійної здатності та водонепроникності споруди. Обґрунтовано нову технічну ідею свердловинного способу спорудження підземних об'єктів з формуванням ґрунтобетонного кріплення, яка для певних інженерно-геологічних умов може виступати альтернативою традиційним відкритому та гірничому способам підземного будівництва, збільшуючи масштаби його використання.

Ключові слова: підземна споруда, струменева цементація, ґрунтобетон, комбіноване кріплення, свердловинний метод у будівництві.

Haiko Hennadii, Han Anatolii, Matviichuk Ivan. Soil-concrete fastening of underground structures

The experience of using jet cementing of soils in civil, industrial and underground construction is analysed. Attention is focused on the bearing capacity and potential of using soil concrete as a fastening material (frame) of underground structures. Soil concrete fastening and a new method of its construction by jet cementing of soils along the contour of the structure are developed. This ensures a reduction in material consumption and total cost by combining the functions of temporary (enclosing) and permanent (retaining) structures. The proposed design of combined fastening: soil concrete – anchors – shotcrete. An analysis of the constructive and technological advantages of the developed fastening in comparison with common structures is conducted. In particular, the possibility of completely contouring an underground structure with a layer of soil concrete from the surface (there is no need to form and equip a pit), reducing material consumption compared to the common “wall in the soil” method (since the height of vertical wall structures is equal to the height of the structure in our case, the walls do not rise to the ground surface), and the possibility of effectively forming the thickness of the soil-cement frame while ensuring the necessary bearing capacity and water resistance were noted. A new technical idea of a borehole

method of constructing underground facilities with the formation of soil concrete fastening is substantiated, which for certain engineering and geological conditions can serve as an alternative to traditional open (excavation) and mining methods of underground construction, increasing the scale of its use.

Keywords: *underground structure, jet cementing, soil concrete, combined fastening, borehole method in construction.*

Вступ. Розвиток підземного будівництва в ґрунтових масивах потребує вдосконалення зведення підземних споруд і забезпечення надійності та економічності конструкцій кріплення (оправ) в умовах недостатньої прогнозованості проявів гірського тиску, динамічних і гідрологічних впливів. Основні типи кріплення підземних об'єктів мілкового закладання виконують із монолітного чи збірного залізобетону. Вони відрізняються високою вартістю й складністю монтажу, що пов'язано, зокрема, з необхідністю застосування на одному об'єкті різних будівельних технологій (земляні роботи, буріння свердловин, зведення опалубки й бетонування або монтаж збірного залізобетону тощо), причому різноманітні конструктивні елементи й матеріали кріплення необхідно в значних кількостях транспортувати до місця зведення (у вибій виробки або в котлован). У деяких випадках (наприклад, у зоні значних водопритоків) бетонні оправи не забезпечують надійність споруди й потребують додаткового замоноличування навколишніх ґрунтів з утворенням ґрунтобетонних конструкцій [3].

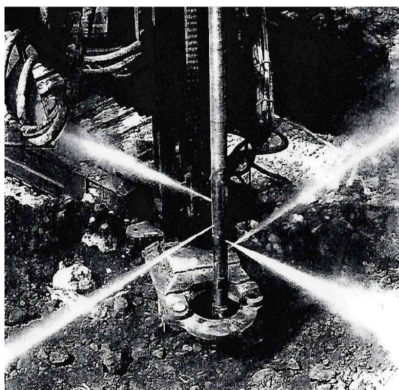
Ґрунтобетон, що поєднує ґрунт і в'язучі речовини, використовувався людиною, починаючи з часів античності (будівництво доріг, основ і фундаментів) [2; 3], проте технологія струменевої цементації ґрунтів, винайдена японськими інженерами на початку 1970-х років [11] і майже одночасно впроваджена в Японії, США та Італії (де й почали формуватися перші наукові й технологічні школи нового методу) [8], відкрила принципово нові можливості замоноличування ґрунтів (гірських порід).

Сучасна струменева цементація – це універсальна технологія зміцнення (закріплення) ґрунтів, яка на високому технологічному рівні дозволяє розв'язувати різноманітні геотехнічні задачі в області цивільного, промислового й підземного будівництва (рис. 1).

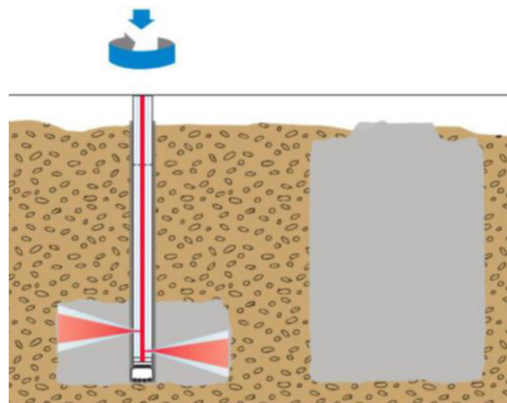
Загальна технологічна схема передбачає, що руйнування ґрунту та його одночасне перемішування із цементним розчином навколо свердловини здійснюється струменем цементного розчину та повітря (або повітря й води, залежно від типу системи), що подаються під високим тиском у радіальному напрямку в попередньо пробуреній свердловині. Після тужавіння розчину утворюється новий матеріал – ґрунтобетон, який має високі міцнісні та водозахисні властивості [7; 8].

Завдяки перевагам струменевої цементації, а саме: високій технологічності формування ґрунтобетонних конструкцій на місці їх безпосереднього використання, можливості ефективного закріплення будь-яких ґрунтів (від гравійних відкладень до дрібнодисперсних глин та мулів); можливості виконувати роботи у стиснених умовах, досить високих міцнісних і гідроізоляційних властивостях утвореного ґрунтобетону – технологія знайшла широке застосування в будівництві (закріплення основ, зокрема під наявними будівлями, створення фундаментних паль, формування конструкції «стіна в ґрунті», створення захисних екранів тощо).

З області цивільного й промислового будівництва струменева цементація поширилася на підземне будівництво: утворення ґрунтобетонного



а



б

Рис. 1. Демонстрація техніки струменевої цементації ґрунту (а) та схема створення ґрунтобетонної колони (б) [7]

екрану навколо вертикального стовбуру (захист від водопритоків) (рис. 2) [5], формування ґрунтобетонної основи під тунелем в умовах значних водопритоків (рис. 3), спирання тунелю на ґрунтобетонні палі в слабких породах (рис. 4) [10], формування випереджувального тимчасового кріплення вибою тунелю (рис. 5) [9].

Як показали дослідження випереджувального тимчасового кріплення тунелю, спорудженого з вибою виробки струменевою цементациєю ґрунтів, що оточують споруду, в горизонтальних (повздовжніх) свердловинах (див. рис. 5), утворена арка з ґрунтобетону забезпечує стійкість тунелю до зведення базового бетонного кріплення і запобігає просіданню земної поверхні поза допустимі межі [9]. Це свідчить про значний потенціал використання ґрунтобетону як матеріалу кріплення підземних споруд, хоча в розглянутому випадку товщина утвореної арочної конструкції (близько 0,5 м) не могла самостійно забезпечити функції опори тунелю. Крім того, практика горизонтального (вздовж тунелю) буріння свердловин та проведення

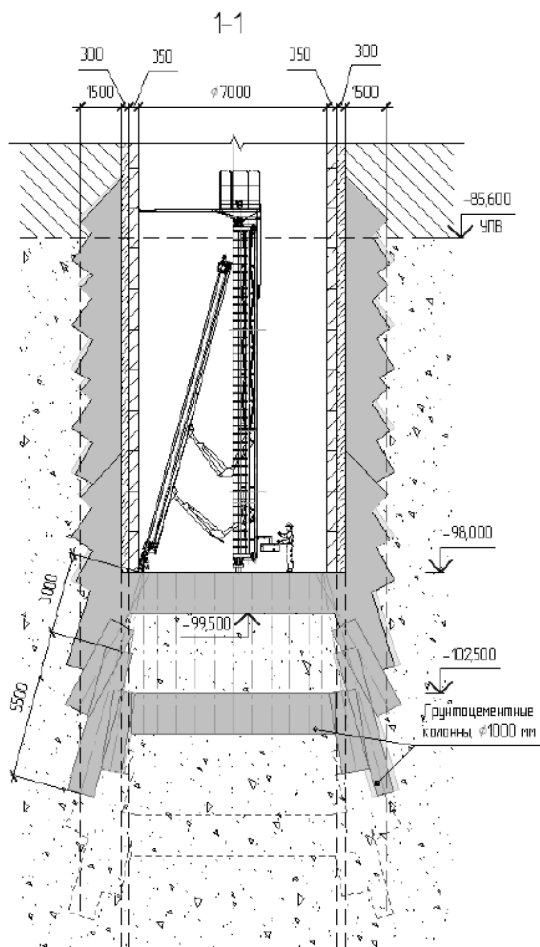


Рис. 2. Створення ґрунтобетонної водоізоляційної оболонки навколо вертикального стовбуру [6]

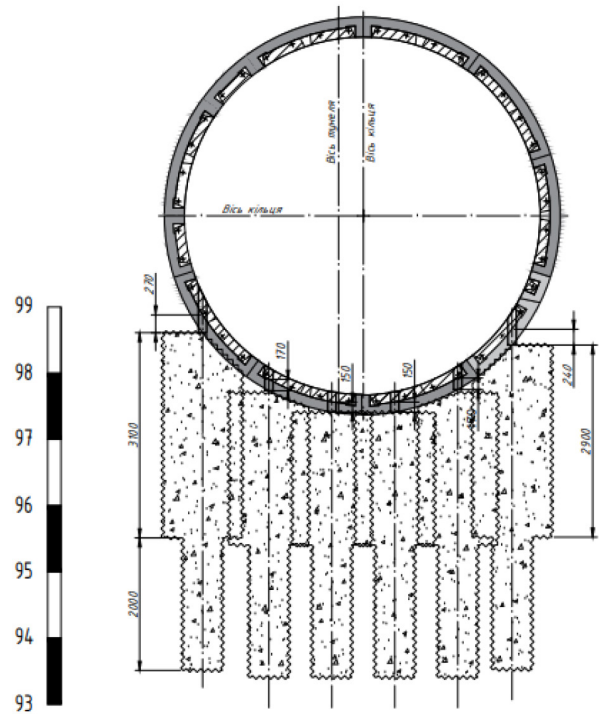


Рис. 3. Створення основи з ґрунтобетонних колон перегінного тунелю між станціями «Либідська» та «Деміївська» Київського метрополітену

струменевої цементациї показала недостатню керованість і точність ведення операцій буріння та струменевої ін'єкції, що ускладнює забезпечення заданих параметрів споруди за горизонтального напрямку формування ґрунтобетонних циліндрів [6].

Метою роботи є розроблення ґрунтобетонного кріплення підземних споруд і нового способу їх зведення шляхом свердловинного замонолічування ґрунтів по контуру споруди з використанням струменевої цементациї, що забезпечить скорочення витрат матеріалів і загальної вартості підземної споруди через поєднання функцій тимчасових (огорожувальних) і постійних (тримальних) конструкцій ґрунтобетонного кріплення.

Методи та методики дослідження: систематизовані підходи та прийоми, які використовуються для розв'язання винахідницьких задач та розроблення інноваційних рішень.

Результати. Розвинені натеper відкритий та підземний (гірничий) способи спорудження підземних об'єктів і далі несуть значні економічні, технічні та безпекові ризики, що стримує масштабний розвиток підземного будівництва, потреби якого (особливо в містах) постійно зростають. Для певної області інженерно-геологічних умов може бути застосований альтернативний підхід, назву якого (згідно з основним

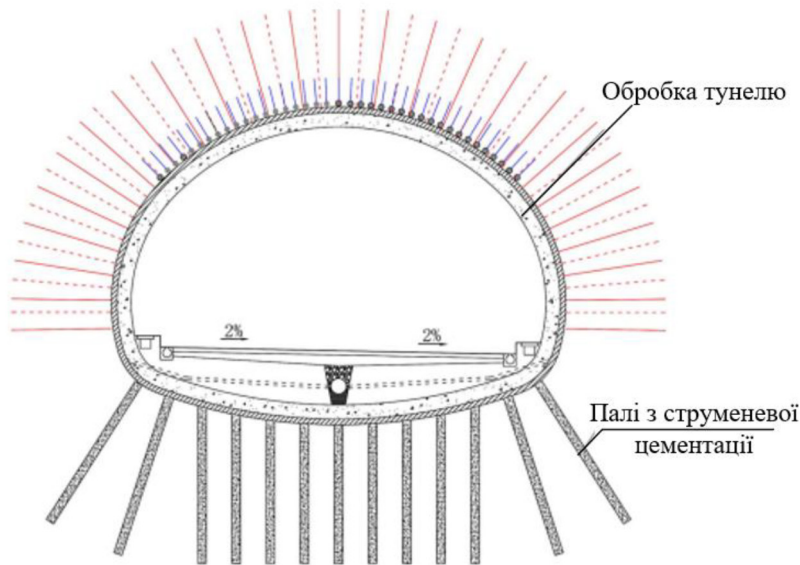


Рис. 4. Схема зміцнення лесоподібних ґрунтів основи тунелю (м. Ланьчжоу, провінція Ганьсу, Китай) ґрунтобетонними палями [10]

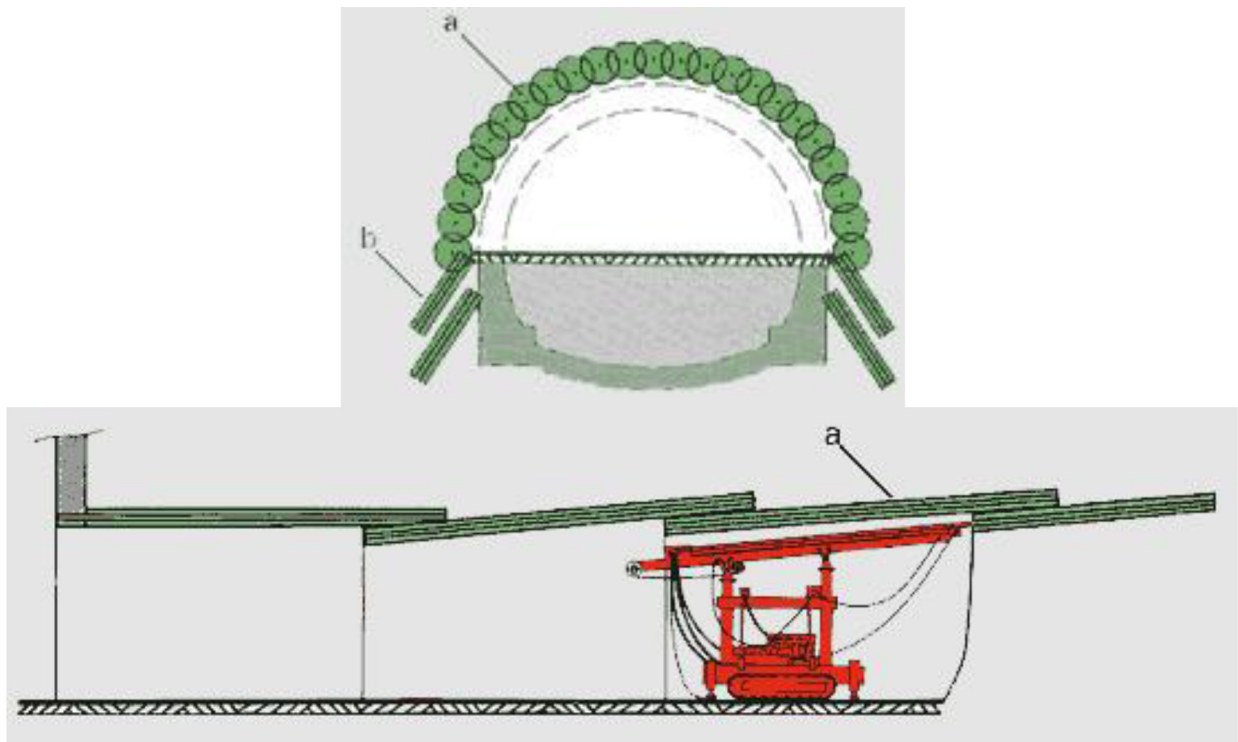


Рис. 5. Будівництво тунелю із захисним навісом над вибоєм із повздовжніх (а) і підпірних (b) циліндрів, утворених струменевою цементациєю ґрунту [9]

технологічним спрямуванням) автори визначають як «свердловинний спосіб спорудження підземних об'єктів», основу якого становлять можливості формування ґрунтобетонного кріплення струменевою цементациєю ґрунтів.

Технічна ідея нового кріплення полягає у включенні ґрунтів, що оточують контур підземної споруди, до складу матеріалу постійного кріплення та використання носійної здатності утвореного ґрунтобетону як основи комбінованого

кріплення (оправи) підземної споруди, причому зведення кріплення здійснюють із земної поверхні свердловинами шляхом струменевої цементациї, утворюючи замкнений шар необхідної (визначеної) потужності замонолічених ґрунтів на контурі проектної споруди (рис. 6) [4].

Кріплення споруджують таким чином. На проектну глибину закладання підземної споруди із земної поверхні 1 в ґрунт 2 за допомогою бурильної установки 3 та бурової колони 4

бурять свердловини 5. Буровою колоною 4 в донну частину свердловини 5 подають струменевий монітор 6 і нагнітають насосом під високим тиском (до 50 МПа) цементний розчин, що під час обертання й повільного підймання бурової колони 4 разом із монітором 6 призводить до руйнації ґрунту 2 високою кінетичною енергією струменя, перемішування ґрунту із цементним розчином і утворення ґрунтоцементної колони 7. Такі сполучені одна з одною ґрунтоцементні колони споруджують по контуру 8 підземної споруди, починаючи з конструкцій стін 9. Далі ґрунтоцементні колони

споруджують на ділянках подушки (підосви) 10 і перекриття (покрівлі) 11 на кожній свердловині, залишаючи між подушкою та перекриттям шар ґрунту 2, висота якого дорівнює проєктній внутрішній висоті підземної споруди. Напрямок формування ґрунтоцементних колон 7 – знизу вгору, відстань між осями свердловин 5 роблять меншою, ніж діаметр ґрунтоцементних колон 7, що призводить до сполучення (пересікання) сусідніх ґрунтоцементних колон і утворення суцільного замонолічення ґрунту. Висоту ґрунтоцементних колон 7 у подушці 10 і перекритті 11 доводять до необхідної товщини

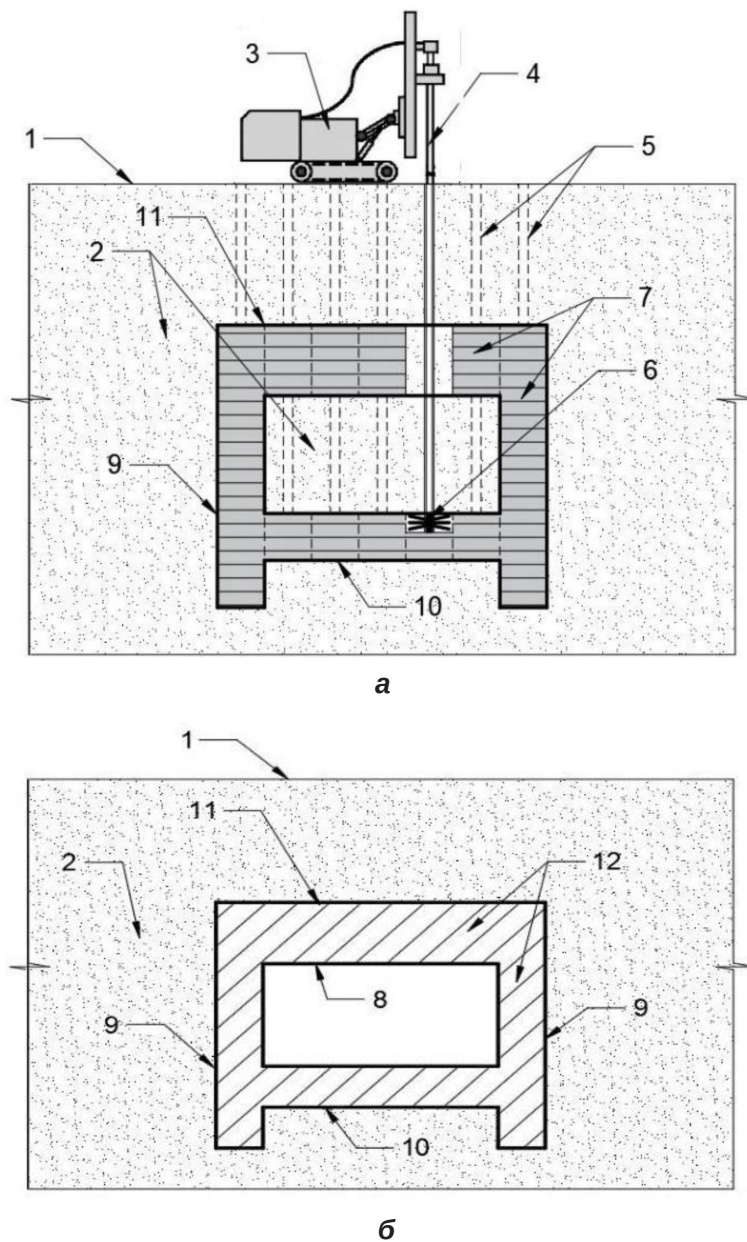


Рис. 6. Схема зведення підземних споруд із ґрунтобетону:
а) стадія струминного замонолічування ґрунтів на контурі
підземної споруди (поперечний розріз); б) зведена підземна споруда
після вилучення ґрунту всередині (поперечний розріз)

постійних конструкцій підземної споруди (згідно з проектом). Після утворення першого ряду ґрунтоцементних колон 7 у поперечному перерізі споруди подібним чином послідовно формують сполучені другий і наступні ряди колон (з перев'язкою), проводячи суцільне замонолічування ґрунтів у поздовжньому напрямку до забезпечення проектної довжини споруди. Після тужавіння ґрунтоцементу 12 під захистом стін 9, подушки 10 і перекриття 11 вилучають ґрунт 2 у середині споруди.

Під час вилучення ґрунту здійснюють армування ґрунтобетону в конструкції перекриття 11 (рис. 7), скріплюючи сусідні колони 7

у поздовжньому напрямку анкерами 14, які закріплюють по всій довжині цементними або полімерними сумішами в похилих шпурах. Це додатково підсилює (зв'язує) сполучення колон 7 на ділянках їх пересікання 13, збільшує жорсткість і носійну здатність конструкції перекриття 11 із замонолічених ґрунтів.

Надалі контур утвореної ґрунтобетонної оправи підземної споруди зсередини покривається кількома шарами набризкбетону, що завершує зведення комбінованого кріплення.

Завдяки тому, що носійні конструкції утворюють суцільним замонолічуванням ґрунтів на замкненому контурі, забезпечується

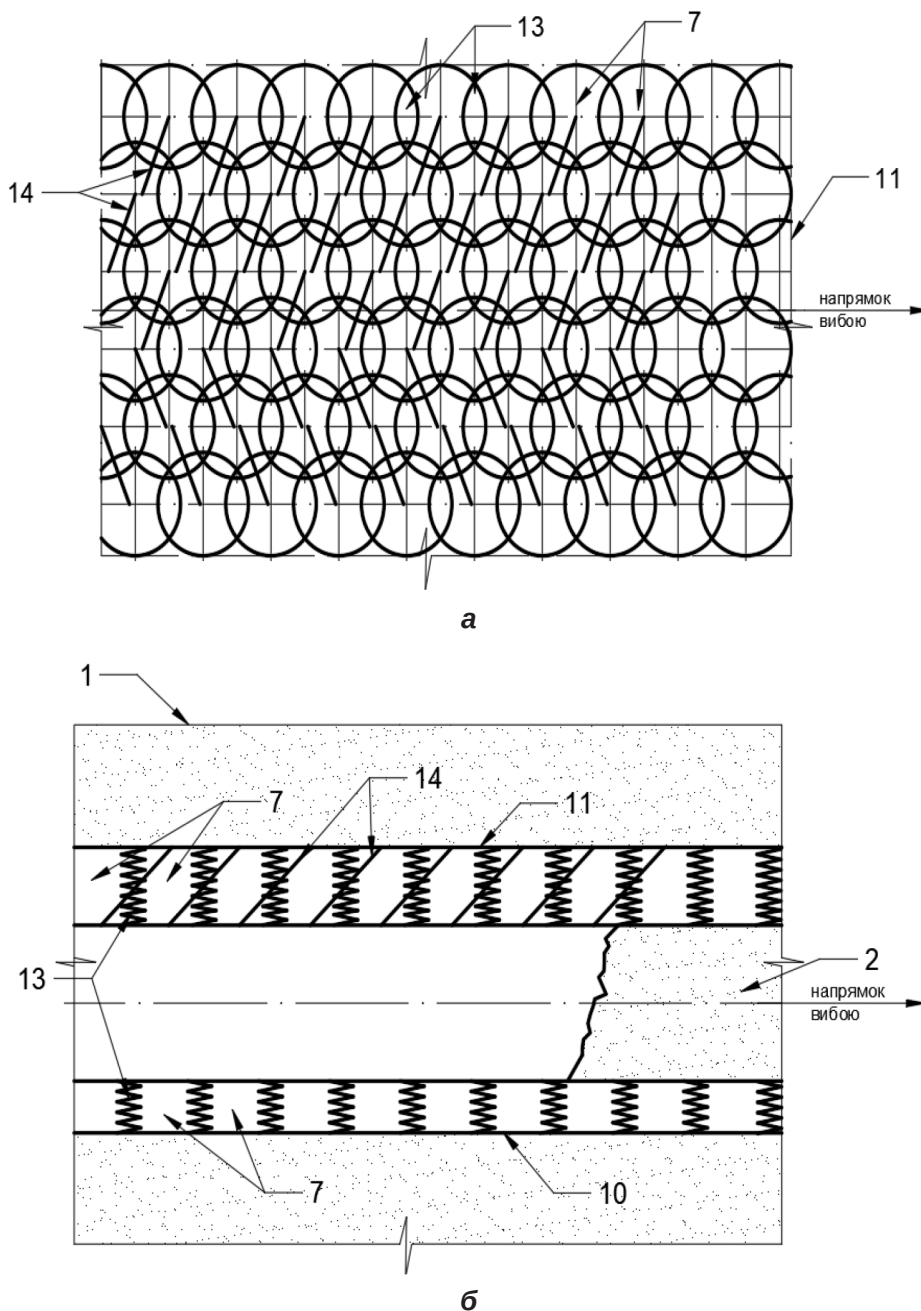


Рис. 7. Схема анкерування (армування) ґрунтобетонного перекриття:
а) план; б) поздовжній розріз споруди

можливість повного оконтурення підземної споруди шаром ґрунтобетону з денної поверхні та відпадає потреба в утворенні та облаштуванні котловану, екскавації великого об'єму ґрунтів, необхідного для будівництва підземного об'єкту відкритим способом. При цьому висота вертикальних стінових конструкцій не перевищує висоти споруди, що значно (в рази) скорочує витрати матеріалів у порівнянні з поширеним способом «стіна в ґрунті».

Те, що замоноличування ґрунтів здійснюють струменевою цементациєю із формуванням сполучених між собою ґрунтоцементних колон, дозволяє звести підземні конструкції за допомогою лише одного високотехнологічного способу будівництва. Струменева цементация забезпечує суцільне замоноличування ґрунтів на контурі споруди, при цьому навколишні ґрунти використовують як матеріал-наповнювач ґрунтобетону, що скорочує час і вартість будівництва.

Те, що затужавілі ґрунтобетонні колони додатково скріплюються між собою арматурними стрижнями (анкерами), а товщину огорожувальних конструкцій доводять до необхідної товщини постійних конструкцій підземної споруди, дозволяє сформувати ґрунтоцементну оправу підземної споруди необхідної носійної здатності та водонепроникності й сумістити функції огорожувальних і постійних конструкцій споруди. Підсилення ґрунтобетонної оправы зсередини шарами набризкбетону гарантує надійність споруди й забезпечує високотехнологічні способи зведення комбінованого кріплення та його економічність.

Розроблена конструкція і спосіб спорудження ґрунтобетонного кріплення підземних споруд мають широку область застосування для будівництва об'єктів мілкового закладання (від міського підземного будівництва до інженерних споруд поверхневого комплексу гірничих підприємств), але найбільшу перспективу

в актуальних умовах воєнних загроз можуть отримати для зведення нових або підсилення наявних підземних споруд подвійного призначення та цивільного захисту [1].

Висновки. Розповсюджена в цивільному й промисловому будівництві технологія струменевої цементациї ґрунтів має широкі перспективи застосування в спорудженні підземних об'єктів. Досвід використання ґрунтобетонних оболонок (арок) навколо підземних споруд для їх гідроізоляції чи забезпечення тимчасового випереджувального кріплення прохідницького вибою свідчить про значний потенціал носійної спроможності цих конструкцій, який можна використовувати для забезпечення стійкості й надійності підземних об'єктів. Авторами запропоновано технічну ідею ґрунтобетонного кріплення підземних споруд, яка полягає у включенні ґрунтів, що оточують підземну споруду, до складу матеріалу постійного кріплення та використання носійної здатності утвореного шару ґрунтобетону як основи комбінованого кріплення (оправи) підземної споруди. Додаткове скріплення анкерами сусідніх ґрунтобетонних колон та нанесення зсередини споруди шарів набризкбетону на її контур формують комбіноване кріплення, яке за основними механічними характеристиками та економічними показниками здатне скласти успішну конкуренцію типовим бетонним (залізобетонним) конструкціям підземних споруд мілкового закладання.

Можливість швидкого високотехнологічного спорудження підземних об'єктів свердловинним способом струменевої цементациї та формування споруди з використанням навколишнього ґрунту (як складової частини постійного ґрунтобетонного кріплення) можуть вплинути на збільшення масштабів підземного будівництва, зумовлюючи його нову парадигму, альтернативну традиційним способам (відкритому й гірничому).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гайко Г. І., Ган А. Л., Вапнічна В. В., Матвійчук І. О. Аналіз прогресивних конструктивних рішень підземних споруд цивільного захисту. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 31–40.
2. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом. Харків : «Друк. Мадрид», 2016. 94 с.
3. Кравець В. Г., Гайко Г. І., Ган А. Л., Ган О. В., Шайдецька Л. В. Геоінженерія мегаполіса: підземна урбаністика. Київ : Вид-во «Політехніка», 2024. 660 с.
4. Спосіб зведення підземних споруд із замоноличених ґрунтів : пат. 158733 Україна : E02D 29/05 (2006.01). Опубл. 12.03.2025, Бюл. № 11.
5. Тютюкін О. Л., Мірошник В. А. Порівняльний аналіз спеціальних способів під час проходки вертикальних виробок. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2020. № 17. С. 81–88.
6. Croce P., Modoni G. Design of jet-grouting cut-offs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*. 2007. Vol. 11, no. 1. P. 11–19. URL: <https://doi.org/10.1680/grim.2007.11.1.11>

7. Guler E., Gumus Secilen G. Jet grouting technique and strength properties of jet grout columns. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1928, no. 1. P. 012006. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012006>
8. Modoni G., Flora A., Croce P. *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. Taylor & Francis Group, 2014. 302 p.
9. Ochmański M., Modoni G., Bzówka J. Numerical analysis of tunnelling with jet-grouted canopy. *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55, no. 5. P. 929–942. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.08.002> (date of access: 24.06.2025).
10. Fan H. et al. Stability of the loess tunnel foundation reinforced by jet grouting piles and the influence of accreinforcement parameters. *Transportation Geotechnics*. 2023. P. 100965. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100965>
11. Yahiro T., Yoshida H. Induction grouting method utilizing high speed water jet. *Proceedings of the Eighth. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1973. P. 359–362.

REFERENCES:

1. Haiko, H. I., Han, A. L., Vapnichna, V. V., & Matviichuk, I. O. (2024). Analiz prohresyvnnykh konstruktyvnykh rishen pidzemnykh sporud tsyvilnoho zakhystu [Analysis of progressive design solutions for underground civil defense structures]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, (26), 31–40. [in Ukrainian].
2. Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., & Zotsenko, V. M. (2016). Burovi gruntotsementni pali, yaki vyhotovliaiutsia za burozmishuvalnym metodom [Bored soil-cement piles, which are manufactured using the drilling-mixing method]. "Drukarnia Madryd". [in Ukrainian].
3. Kravets, V. H., Haiko, H. I., Han, A. L., Han, O. V., & Shaidetska, L. V. (2024). Heoinzheneriia mehapolisa: pidzemna urbanistyka [Geoengineering of the metropolis: underground urbanism]. Vyd-vo "Politekhnik". [in Ukrainian].
4. Haiko, H. I., Han, A. L., Matviichuk, I. O., & Vapnichna, V. V. (2025). Sposib zvedennia pidzemnykh sporud iz zamonolichenykh gruntiv [Method of constructing underground structures from monolithic soils] (Patent Ukrainy № 158733) [in Ukrainian].
5. Tiutkin, O. L., & Miroshnyk, V. A. (2020). Porivnialnyi analiz spetsialnykh sposobiv pid chas prokhodky vertykalnykh vyrobok [Comparative analysis of special methods during the penetration of vertical shafts]. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, (17), 81–88. [in Ukrainian].
6. Croce, P., & Modoni, G. (2007). Design of jet-grouting cut-offs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 11(1), 11–19. <https://doi.org/10.1680/grim.2007.11.1.11>
7. Guler, E., & Gumus Secilen, G. (2021). Jet grouting technique and strength properties of jet grout columns. *Journal of Physics: Conference Series*, 1928(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012006>
8. Modoni, G., Flora, A. & Croce, P. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. Taylor & Francis Group. [in English].
9. Ochmański, M., Modoni, G., & Bzówka, J. (2015). Numerical analysis of tunnelling with jet-grouted canopy. *Soils and Foundations*, 55(5), 929–942. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.08.002>
10. Fan, H., Xu, Q., Lai, J., Liu, T., Zhu, Z., Zhu, Y., & Gao, X. (2023). Stability of the loess tunnel foundation reinforced by jet grouting piles and the influence of accreinforcement parameters. *Transportation Geotechnics*, 100965. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100965>
11. Yahiro, T., & Yoshida, H. (1973). Induction grouting method utilizing high speed water jet. *Proceedings of the Eighth. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. 359–362).