

DOI: 10.20535/2707-2096.7.2022.267606

УДК 624.195:624.131.526](045)

М.Ю. Мусихін*, аспірант

ORCID: 0000-0003-3857-6104

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

* Відповідальний автор: mariana.musykhin@gmail.com

Стаття подана 03.10.2022; Стаття прийнята 19.10.2022

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСАДЖЕНЬ МЕТРОТУНЕЛЮ В УМОВАХ ВОДОНАСИЧЕНОГО НАМИВНОГО МАСИВУ

Мета та завдання: аналіз та вибір доцільного способу покращення міцнісних характеристик ґрунтів шляхом укріплення в зонах послаблення та зменшення деформацій конструкцій перегінних тунелів, обґрунтування способів зміцнення основи конструкції тунелю метрополітену та ґрунтового масиву при осадженнях в умовах підземного простору. На основі аналізу запропонувати доцільний метод та схематичне закріплення водонасиченого намивного ґрунтового масиву з стабілізацією осаджень та запропонувати спосіб для зменшення деформацій при вібропросіданні.

Методи дослідження: шляхом використання огляду та аналізу методів зміцнення ґрунтового масиву, геофізичних методів посилення основ піщаного водонасиченого масиву, рекомендовано комплексний підхід для реалізації підвищення рівня міцності тунелю метрополітену.

Наукова новизна: на основі виконаних аналітичних досліджень визначено параметри для зміцнення ґрунтів водонасиченого намивного масиву та запропонований комбінований метод зміцнення ґрунтового масиву та метод зменшення вібропросідання, що зумовлені швидкістю руху потягів у співвідношенні з силою тяжіння при коливанні конструкції основи перегінного тунелю метрополітену у водонасиченому намивному масиві з оптимізацією робіт, зменшенням термінів робіт та можливість застосування комбінованої схеми заповнення свердловин розчином та використання в умовах щільної міської забудови.

Висновки та практичне значення: комбінована схема зміцнення ґрунтового масиву за допомогою газової силікатизації та влаштування ґрунто-полімерних паль дозволить рівномірно зменшити осадження ґрунтів та конструкції без шкоди навколишньому підземному простору та щільній міській забудові, зокрема збільшить міцнісні характеристики та термін експлуатації перегінного тунелю.

Ключові слова: фізико-механічні властивості; водонасичений намивний масив; тунелі метрополітену; мілке закладення; геофізичні методи; осадження тунелю; закріплення тунелю, газова силікатизація; низьков'язкий поліуретан.

ВСТУП

Актуальність теми. Основним напрямком інженерних розробок для зменшення осідання в ґрунтах є посилення основи. Навантаження сприймається через конструктивні елементи, тому першим кроком для запобігання подальшої деформації є зміцнення ґрунтів основи тунелю. Аналіз досліджень влаштування різних варіантів закріплення ґрунтів в залежності від складу ґрунтового масиву та глибини влаштування закріплюючих елементів дозволить підібрати найбільш раціональний спосіб виконання робіт.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Поліпшення будівельних властивостей ґрунтів основи можна здійснювати зміцненням ґрунтів шляхом введення вертикальних,

похилих або горизонтальних армуючих елементів [1]. Результати інженерних вишукувань і обстежень конструкцій повинні містити дані, необхідні для раціонального вибору методів і способів прийняття достовірних технічних рішень щодо зменшення деформацій та посилення конструкцій [2]. На основі аналізу результатів лабораторних досліджень і комп'ютерного моделювання можна визначити вплив зміни рівня ґрунтових вод на стійкість обробки тунелю внаслідок розвитку деформацій оточуючого намівного масиву [3].

Постановка завдання. Аналіз та обґрунтування методів боротьби з осадженням конструкцій в водонасиченому піщаному масиві. Застосування методів глибокої стабілізації слабких і водонасичених ґрунтів дозволяє вирішити проблему деформації конструкції та збільшити стійкість ґрунтів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Дисперсні ділянки можна виявити шляхом визначення їх розподілу за допомогою геофізичних методів [5], ефективність яких підтверджена практичним впровадженням. Ці методи повинні мати високу точність і ефективність у складних інженерно-геологічних умовах.

Вибір способу закріплення залежить від типу існуючого фундаменту, глибини закладання, ступеня фізичного зносу, особливостей інженерно-геологічного нашарування, рівня ґрунтових вод, конструктивної схеми будівлі, величини і характеру експлуатаційних навантажень.

Способи посилення стійкості основ полягають у покращенні структурної міцності ґрунтів та зменшення деформацій внаслідок навантажень.

Для посилення основ ґрунтового масиву рекомендовано використовувати методи в залежності від глибини закладання, складу ґрунтів та можливості проведення робіт відкритим чи закритим способом. При закріпленні ґрунтового масиву застосовують такі методи:

- силікатизація [5; 8], для пісків і макропористих просідаючих ґрунтів;
- цементация [4], для тріщинуватих скельних, гравію і піщаних ґрунтів;
- закріплення синтетичними смолами [9], для пісків і макропористих просідаючих ґрунтів;
- закріплення вапняними і ґрунто-цементними палями, для сильностискуваних водонасичених пілуватоглинистих і хаторфованих ґрунтів;
- електрохімічне закріплення, для слабких пілувано-глинистих ґрунтів, при коефіцієнті фільтрації 0,01 м/добу;
- електороосмос, для макропористих просідаючих ґрунтів [8].

З метою дослідження інженерно-геологічних умов та технологічно-конструкторських рішень обрано ділянку перегінного тунелю Київського метрополітену від ст. «Оболонь» до ст. «Мінська» виходячи з наявності деформаційних процесів та доступності для проведення натурних зйомок.

За результатами камеральної обробки інженерно-геологічних та лабораторних досліджень визначено, що водовміщуючими породами є піски четвертинного покладу:

- пісок сірий, дрібний, середньої щільності, маловологий та вологий з потужністю до 5,5 м;
- пісок сірий, дрібний, середньої щільності, водонасичений, потужністю до 6,5 м;
- пісок, середньої крупності, середньої щільності, водонасичений, потужністю до 6,0 м;
- гравелистий пісок, щільний, водонасичений, потужністю до 22 м;

В результаті аналізу інженерно-геологічних умов, фізико-механічних характеристик для підвищення міцності водонасиченого піщаного масиву необхідно застосовувати способи

нагнітання [7] різних закріплюючих речовин, оскільки піски мають можливість фільтрувати газові суміші або рідкі розчини, ефект закріплення буде високим, завдяки утворенні нових зв'язків в результаті введення реагентів.

Для заданих умов розглянуто такі методи: силікатизація, смолизація, цементація за допомогою ґрунто-полімерних паль.

Завдяки обробці дисперсного ґрунту розчином рідкого скла можна одержати: покращення міцнісних характеристик ґрунту, зменшення фільтрації води навколо конструкції, збільшити захист від агресивного середовища, зменшити просадку ґрунтового масиву та деформації конструкції. Силікат натрію легко проникає в пори піщаного масиву, що має коефіцієнт фільтрації 0,5 – 80 м/добу та в результаті дає довгострокове закріплення. Метод силікатизації [7] (Рис. 1) підвищує міцність закріплення та знижує осадження.

Для зміцнення піщаних ґрунтів також може застосовуватись газова силікатизація. В цьому випадку замість рідкого скла застосовують вуглекислий газ. В цілях активації ґрунту в свердловини через ін'єктори подають вуглекислий газ (діоксид вуглецю), а потім рідке скло (силікат натрію). В наслідку чого радіус закріплення збільшується на 50-60 %, пори на 95% заповнюються рідким склом, при цьому витрата силікат натрію зменшуються на 60%. Міцнісні характеристики ґрунту знаходяться в межах 0,3 – 1,5 МПа [7].

Метод смолизації використовують для закріплення водонасичених піщаних ґрунтів з коефіцієнтом фільтрації 0,5 – 2,5 м/добу. В ґрунтовий масив вводять розчини синтетичних смол з додаванням отверджувачів. Після процесу твердіння ґрунт набуває високої міцності та слабку водонепроникність. Залежно від коефіцієнта фільтрації радіус закріпленої основи становить 0,3 – 1,0 м. Недоліком цього методу є досить висока вартість [8].

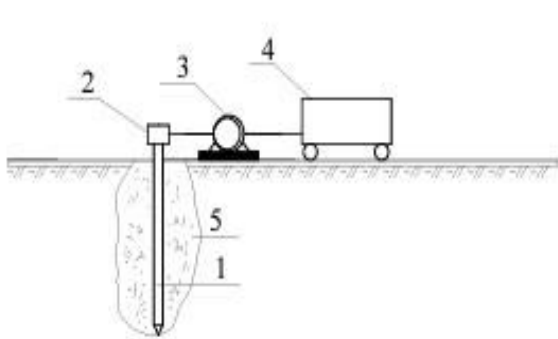


Рисунок 1 – Схема силікатизації ґрунтів:
1 – ін'єктор, 2 – наголовник, 3 – насос, 4 – ємність для розчину, 5 – закріплений ґрунт

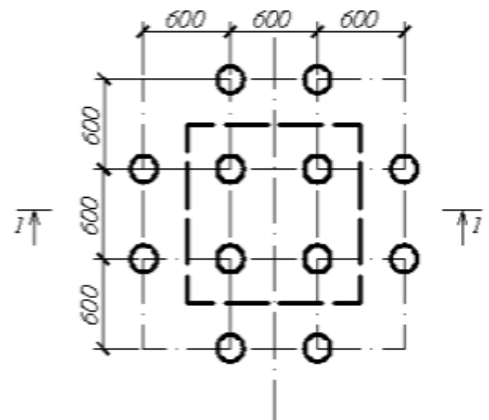


Рисунок 2 – Схема можливого пробурювання свердловин для заповнення розчином за комбінованим способом

Зміцнення водонасиченого масиву та підвищення несучої здатності виконують також методом цементації за допомогою низьков'язкого поліуретану, в процесі якого формують ґрунто-полімерні паль. Нагнітання розчину може відбуватись сухим способом без осушення масиву, таким чином при контакті з водою речовини, вологість ґрунту буде знижуватись, а ґрунтовий масив зміцнюватись. В другому випадку розчин поступово нагнітають мокрим способом під низьким тиском в пробурені, попередньо осушені свердловини, це дозволить запобігти розриву ґрунтового масиву. Оскільки піски слугують в якості піщаної подушки, яка відіграє роль привантажуваного шару – величина осадки зменшується, завдяки встановленні

фільтрувальних прорізів при використанні мокрого способу. Даний метод збільшує міцність ґрунту до 30 МПа та є економічно доцільним, не утворює суцільної протифільтраційної завіси, що є важливим в умовах щільної міської забудови [9].

Якщо скомбінувати метод (Рис. 2) силікатизації газами і метод цементації за допомогою низьков'язкого поліуретану можна зменшити кількість свердловин, довжину пробурювання свердловин, знизити вартість робіт завдяки перевагам цих методів.

ВИСНОВКИ

Відповідно до проведеного аналізу з урахуванням інженерно-геологічних умов, встановлено, що високоефективним способом зміцнення водонасиченого ґрунтового масиву є комбінація методів газової силікатизації та цементації за допомогою низьков'язкого поліуретану з сухим або мокрим нагнітанням в залежності від ділянки перегінного тунелю. Комбінація цих способів забезпечить зменшення термінів виконання робіт, знизить вартість робіт, є більш доступною та актуальною в умовах щільної міської забудови та збільшить міцність ґрунтового масиву без завдання шкоди оточуючому підземному простору.

Враховуючи, що розвиток осідань відбувається нерівномірно та має залежність також від коливань ґрунтів, які обумовлені рухом потягів та рівнем швидкості руху потягів відповідно до несучої здатності ґрунтів та розташування шарів. Додатково для поглинання деформації можна використати влаштування антисейсмічних деформаційних швів та віброшумопоглинаючої мастики на стиках, які знаходяться на місцях змін типу конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДБН В.2.1-10:2019 Основи і фундаменти будівель та споруд, Мінрегіонбуд України, Київ, Україна, 2019.
- [2] ДСТУ Б В.3.1-2:2016 Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель і споруд, ДП «Державний науково-дослідницький інститут будівельних конструкцій», Київ, Україна, 2016.
- [3] С. М. Стовпник, А. Л. Ган, Є. А. Загоруйко, Л. В. Шайдецька, "Дослідження гідравлічного впливу на технологічну стійкість метротунелю мілкового закладання в намівних масивах", *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, № 5, с. 141-148, 2017. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114357>
- [4] В. І. Крисан, "Дослідження напружено_деформованого стану ґрунтового масиву, армованого ґрунтоцементними елементами, що виготовляються по струминно змішувальній методиці", автореф. дис. канд. техн. Наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондаратюка, Полтава, Україна, 2013. Дата звернення: 15 лютого 2022. [Онлайн]. Доступно: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=ARD&P21DBN=ARD&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%20%D0%92.%D0%86.\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=ARD&P21DBN=ARD&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%20%D0%92.%D0%86.$)
- [5] В. Д. Петренко, Д. О. Банніков, М. І. Нетеса, "Геофізичні дослідження та укріплення шаруватого та водонасиченого ґрунтового масиву в умовах Київського метрополітену", *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, № 17, с. 62-72, 2020. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205013>

- [6] ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах, Міністерство раціонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, Київ, Україна, 2017.
- [7] Л.М. Шутенко, О. Г. Рудь, О. В. Кічаєва, О. В. Самородов, О. В. Гаврилюк, *Механіка ґрунтів.ю основи та фундаменти*, Харків, Україна: Освіта, 2017
- [8] І. В. Маєвська, Н. В. Блащук, М. С. Гончарук, "Використання золи винесення у складі ґрунтоцементу", *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Міжнародний науково-технічний журнал*, том 29 №2, с. 51-64, 2020. [Онлайн]. Доступно: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65>
- [9] Властивості низьков'язкого поліуретану в умовах водонасичених слабких ґрунтів. Онлайн. Доступно: <http://factor-news.info/vlastyvosti-nyzkovyazkogo-poliuretanu-dozvolayut-sformuvaty-grunto-polimerni-pali-v-umovah-vodonasychenyh-slabkyh-gruntiv/?fbclid=IwAR3dgUqWkZEv5m6BDdVDYyRUyOvpvNkwasRdSaQKSUk4gVRyQIuFcX6wD9Y>

M. Musykhin*, postgraduate

ORCID: 0000-0003-3857-6104

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: mariana.musykhin@gmail.com

Received 03.10.2022; Accepted 19.10.2022

RESEARCH OF METRO TUNNEL SEDIMENTS UNDER THE CONDITIONS OF A WATER-SATURATED FLOOD MASSIVE

Purpose: analysis and selection of an appropriate way to improve the strength characteristics of soils by strengthening in the zones of weakening and reducing deformations of the tunnel structures, substantiating the methods of strengthening the base of the subway tunnel structure and the soil massif during deposition in the conditions of the underground space. On the basis of the analysis, propose an expedient method and schematic fixing of a water-saturated non-washable soil massif with stabilization of sediments and propose a method for reducing deformations during vibration subsidence.

Methodology: by using the survey and analysis of methods of strengthening the soil massif, geophysical methods of strengthening the foundations of the sandy water-saturated massif, a comprehensive approach is recommended for the implementation of increasing the level of strength of the subway tunnel.

Originality: on the basis of the performed analytical studies, the parameters for strengthening the soil of the water-saturated alluvial massif were determined and the combined method of strengthening the soil massif and the method of reducing the vibration subsidence caused by the speed of the trains in relation to the force of gravity during the oscillation of the structure of the base of the subway tunnel in the water-saturated alluvial massif were proposed. optimization of works, reduction of work terms and the possibility of applying a combined scheme of filling wells with solution and using them in conditions of dense urban development.

Findings and practical implications: the combined scheme of strengthening the soil massif with the help of gas silicification and the installation of soil-polymer piles will allow to evenly reduce the sedimentation of the soil and the structure without harming the surrounding underground space and dense urban development, in particular, it will increase the strength

characteristics and the service life of the distillation tunnel.

Keywords: *physical and mechanical properties; water-saturated alluvial massif; subway tunnels; shallow laying; geophysical methods; tunnel deposition; tunnel fastening, gas silicification; low viscosity polyurethane..*

REFERENCES

- [1] DBN V.2.1-10:2019 Basics and foundations of buildings and structures, Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2019.
- [2] DSTU B V.3.1-2:2016 Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures, SE "State Research Institute of Building Structures", Kyiv, Ukraine, 2016.
- [3] S. M. Stovpnyk, A. L. Gan, E. A. Zagoruyko, L. V. Shaidetska, "Investigation of hydraulic influence on the technological stability of a shallow underground tunnel in alluvial massifs", Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, no. 5, p. 141-148, 2017. <https://doi.org/10.15802/stp2017/114357>
- [4] V. I. Krysan, "Investigation of the stressed-deformed state of the soil massif reinforced with soil-cement elements produced by the jet mixing method", author's ref. thesis Ph.D. technical Science, Poltava National Technical University named after Yury Kondaratiuk, Poltava, Ukraine, 2013. Available:[http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=ARD&P21DBN=ARD&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%20%D0%92.%D0%86.\\$](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?Z21ID=&I21DBN=ARD&P21DBN=ARD&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=A=&S21COLORTERMS=1&S21STR=%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%20%D0%92.%D0%86.$)
- [5] V. D. Petrenko, D. O. Bannikov, M. I. Netesa, "Geophysical studies and strengthening of a layered and water-saturated soil massif under the conditions of the Kyiv metro", Bridges and tunnels: theory, research, *practice*, no. 17, pp. 62-72, 2020. <https://doi.org/10.15802/bttrp2020/205013>
- [6] DBN V.1.1-45:2017 Buildings and structures in difficult engineering and geological conditions, Ministry of Rational Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, Kyiv, Ukraine, 2017.
- [7] L. M. Shutenko, O. G. Rud, O. V. Kichaeva, O. V. Samorodov, O. V. Havrylyuk, Mechanics of soils, foundations and foundations, Kharkiv, Ukraine: Education, 2017.
- [8] I. V. Majevska, N. V. Blaschuk, M. S. Honcharuk, "Using fly ash as part of soil cement", Modern technologies, *materials and constructions in construction. International Scientific and Technical Journal*, v. 29, no. 2, pp. 51-64, 2020. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-51-65>
- [9] Properties of low-viscosity polyurethane in conditions of water-saturated weak soils. Available: <http://factor-news.info/vlastyvosti-nyzkovyazkogo-poliuretanu-dozvolyayut-sformuvaty-grunto-polimerni-pali-v-umovah-vodonasychenyh-slabkyh-gruntiv/?fbclid=IwAR3dgUqWkZEv5m6BDdVDYyRUyOvpvNkwasRdSaQKSUk4gVRyQIuFcX6wD9Y>