

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 625.42(477-25):624.131-026.27/.366

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. БАННІКОВ^{2*}, М. І. НЕТЕСА³

¹ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, ел. пошта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Кафедра «Будівельне виробництво та геодезія», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, ел. пошта andreynetes@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

ГЕОФІЗИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА УКРІПЛЕННЯ ШАРУВАТОГО ТА ВОДОНАСИЧЕНОГО ҐРУНТОВОГО МАСИВУ В УМОВАХ КИЇВСЬКОГО МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. Актуальним питанням для тунелів метрополітену мілкого закладення в складних інженерно-геологічних умовах є визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів не тільки під час інженерних вишукувань, але й під час їх вивчення з використанням геофізичних методів дослідження ґрунтових умов. Крім того, важливо обрати способи покращення властивостей ґрунтів шляхом укріплення, особливо в зонах зниження їх міцносних параметрів. Це забезпечує ефективну експлуатацію тунелів з виключенням небезпечних явищ типу віброповзучості ґрунтів і деформацій колій та оправ. **Методика.** Використовуючи існуючі положення про геофізичні дослідження, з метою визначення слабких місць шаруватого та водонасиченого масиву та обґрунтування способів його укріплення, розроблено основи комплексного дослідження та виробничої реалізації для підвищення рівня безпечної роботи тунелів метрополітену. **Результати.** Виконано геофізичні дослідження по виявленню слабких місць в ґрунтовій товщі по трасі перегінних тунелів Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (лівий берег Дніпра) та встановлено, що в сучасних умовах для підсилення слабких водонасичених та шаруватих ґрунтів необхідно використовувати способи перемішування ґрунтів з в'язкими речовинами, які ін'єктуються під тиском. **Наукова новизна.** На основі виконаних аналітичних досліджень отримана залежність пористості слабких водонасичених ґрунтів від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння при визначених частотах коливань колії, обумовлених рухом поїздів метрополітену, а також визначені параметри укріплення ґрунтів з боків та під лотком оправи перегінних тунелів. **Практична значимість.** Застосування геофізичних методів визначення слабких місць в ґрунтовому масиві дозволило виконати їх укріплення в діючих тунелях метрополітену мілкого закладення та знизити ризик їх небезпечної експлуатації.

Ключові слова: фізико-механічні властивості; шаруватий та водонасичений масив; тунелі метрополітену; мілке закладення; геофізичні методи; хімічне закріплення

Вступ

В останні десятиріччя при спорудженні будівельних об'єктів мілкого закладення, в тому числі і тунелів метрополітену, існує проблема їх зведення та експлуатації, особливо в складних інженерно-геологічних умовах, що позначені високим рівнем водонасиченості слабких шаруватих незв'язних ґрунтів (Петренко, В. Д., Петренко, В. І., & Савинков, 2011; Петренко, В. І., & Петренко, В. Д., 2014).

Визначення їх властивостей в реальних ґрунтових умовах на різних глибинах може бути

реалізовано на основі відомих геофізичних методів (створення короткоімпульсного поля, вертикального електрорезонансного або георадарного видів зондування).

Розробка та впровадження цих методів успішно виконані в Україні, в тому числі науково-виробничим підприємством «ГЕОПРОМ» в умовах будівництва та експлуатації тунелів Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену (Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017).

Як відомо, для укріплення слабких водонасичених ґрунтів широко реалізована буро-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

змішувальна технологія при достатньо низькому тиску в декілька атмосфер (Shibazaki, 2003; Гришко, Шуплик, & Куликова, 2011; Зоценко, Винников, Ларцева, Шокарев, & Крисан, 2011; Черняков, 2011; Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014). Цим вона відрізняється від технології «jet-grouting», в якій тиск компонентів, особливо рідинного, досягає порядку сотень атмосфер (Qiu, Dennis, & Elliott, 2000; Малинин, 2009). Застосовуючи низький тиск, бурозмішувальна технологія, що широко розповсюджена на різних будівельних об'єктах, була запропонована для використання при укріпленні слабких водонасичених ґрунтів при будівництві тунелів метрополітену на лівому березі Дніпра в місті Києві (Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014; Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. И., 2017).

Особливість вказаного способу полягає в перемішуванні слабого водонасиченого ґрунту з в'язкими речовинами, в якості яких застосовується суміш рідкого скла та цементу або вапна та цементу. При цьому створюється конструктивні елементи у вигляді несучих та огорожувальних колон.

Таке виготовлення достатньо міцних ґрунтоцементних або ґрунтосилікатноцементних елементів, що сприймають боковий тиск від ґрунтового масиву та виконують роль протифільтраційного огородження, є актуальною технологією укріплення ґрунтової товщі навколо тунельного об'єкта.

Мета

Складні інженерно-геологічні умови будівництва тунелів та метрополітенів, особливо характерні наявністю шаруватих та водонасичених ґрунтів, суттєво зменшують можливість надійної і довготривалої експлуатації підземних об'єктів. При цьому виникають проблемні питання вибору та обґрунтування ефективних методів визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів та рівня їх водонасиченості.

При сучасному розвитку наукових досліджень в області застосування геофізичних методів можна з високою точністю отримати основні параметри ослаблення ґрунтового масиву і обрати способи його укріплення. Тому в цій

роботі за мету поставлено проведення геофізичних досліджень по визначенню слабких місць у верхніх шарах ґрунтів при будівництві та експлуатації Київського метрополітену, а також обґрунтування способів їх укріплення. Використання методів глибинної стабілізації слабких та водонасичених ґрунтів дозволяє вирішувати задачі з підсилення слабких ґрунтів.

Методика

Виявлення зон слабких ґрунтів може бути виконано шляхом визначення їх розповсюдження із застосуванням геофізичних методів, ефективність яких підтверджується практичним впровадженням. Ці методи повинні мати високу точність та оперативність в складних інженерно-геологічних умовах.

При будівництві Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену на лівому березі Дніпра була реалізована технологія будівництва станцій і перегінних тунелів мілкового закладення на дільниці від станції «Осокорки» до станції «Позняки». Надана дільниця характеризується достатньо складними інженерно-геологічними умовами. Крім того, на поверхні над вказаною діючою лінією метрополітену було розпочато будівництво паркінгу підземно-наземного типу від станції «Осокорки» до вул. Бориса Гмирі.

Геологічний розріз наданої дільниці представлений алювіальними чвертковими пісками, поверхня яких залягає на 7...8 м нижче денної поверхні. Ґрунти алювію складаються з пісків середньої та мілкої крупності з прошарками (лінзами) суглинків і супісків. Алювіальні осади перекриті піщаним ґрунтом намивного і насипного походження. Потужність техногенних ґрунтів змінюється в межах від 3 до 8 м. Вони представлені пісками з прошарками супісків та локально збагачені гумусовим матеріалом. Насипний ґрунт складається з пісків та залишків будівельного сміття.

В алювіальних пісках на глибині 6,5...7,5 м знаходиться водоносний горизонт, що живиться атмосферними опадами та втратами води в підземній водоносній системі. Амплітуда коливання рівня ґрунтових вод складає 1,5...2,0 м від зафіксованого. Ґрунтові води не відносяться до категорії агресивних.

Для літологічної характеристики ґрунтів використовується номенклатура інженерно-геологічних елементів (ІГЕ). Всього в літологічному розрізі виділяють 8 ІГЕ, що відрізняються фізико-механічними властивостями. ІГЕ-1 відноситься до насипного ґрунту, ІГЕ-2...ІГЕ-4 представляють собою намівний ґрунт, алювіальні піски відносяться до ІГЕ-5...ІГЕ-8.

Вказані ІГЕ мають наступні літологічні характеристики.

ІГЕ-1. Пісок низької щільності ($\gamma = 16 \text{ кН/м}^3$), супісок, будівельне сміття. Потужність від 1,8 до 4,0 м.

ІГЕ-2. Пісок середньозернистий, маловологий та водонасичений. Щільність середня ($\gamma = 17,0 \text{ кН/м}^3$). Потужність від 2,0 до 6,0 м. Включає лінзи ІГЕ-2а (пісок середньозернистий, щільний ($\gamma = 17,7 \text{ кН/м}^3$), маловологий) потужністю до 1,5 м.

ІГЕ-2б. Пісок середньої щільності ($\gamma = 16,1 \text{ кН/м}^3$), маловологий з включенням гумусу до 1 %.

ІГЕ-3. Маловологий пісок середньої щільності та крупності з включенням гумусу до 1 %.

ІГЕ-3а. Пісок щільний ($\gamma = 20,0 \text{ кН/м}^3$), насичений водою. В ньому знаходиться рівень ґрунтових вод. Ці піски створюють малопотужну лінзу з розміром по вертикалі 0,5...0,7 м.

ІГЕ-4. Твердий піщаний супісок ($\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$), який утримує до 7,6 % гумусового матеріалу. Створює тонку лінзу (потужність біля 0,7 м) між ІГЕ-2б та ІГЕ-3а.

ІГЕ-5. Лінза пластичного суглинку. Щільність підвищена ($\gamma = 18,8 \text{ кН/м}^3$), потужність до 4,0 м.

ІГЕ-6. Лінза алювіального піску в основному середньої крупності протяжністю 125 м і максимальною потужністю 2,5 м. Щільність підвищена ($\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$).

ІГЕ-7. Тонка лінза пластичного супіску протяжністю 85 м. Щільність підвищена ($\gamma = 19,2 \text{ кН/м}^3$).

ІГЕ-8. Алювіальний чвертковий мілкий та середньої крупності пісок.

Коефіцієнт фільтрації (K_{ϕ}) зменшується з глибиною від ІГЕ-1 до ІГЕ-3а від 10 до 5 м/добу. Різке зменшення K_{ϕ} відбувається на інтервалі ІГЕ-5...ІГЕ-7, в якому залягають

щільні піски із суглинками та вмістом органіки (ІГЕ-5). Значення K_{ϕ} алювіального чистого та щільного піску (ІГЕ-8) дорівнює 7 м/добу. Мінімальні значення $K_{\phi} = 0,03 \dots 0,04$ м/добу притаманні ґрунтам з глинистим матеріалом (ІГЕ-5 та ІГЕ-6). Починаючи з ІГЕ-3а, ґрунти характеризуються як водонасичені.

Ускладнюючими факторами геологічної побудови об'єкту є наступні: 1) неоднорідний літологічний склад ґрунтової товщі (макروشаруватість); 2) наявність ІГЕ з низьким K_{ϕ} (ІГЕ-5, ІГЕ-6); 3) зниження фізико-механічних властивостей ґрунту і K_{ϕ} , що зумовлено наявністю органічного матеріалу (гумусу) в пісках і супісках ІГЕ-4. Необхідно також враховувати, що сухий ґрунт знаходиться до глибини приблизно 7 м, а нижче цієї відмітки піски насичені водою.

При проведенні геофізичних робіт науково-виробничим підприємством «ГЕОПРОМ» були використані наступні методи дослідження: 1) метод створення короткоімпульсного поля; 2) метод вертикального електрорезонансного зондування; 3) метод георадарного зондування.

Роботи виконувалися як всередині тунелю, так і на поверхні. При цьому досліджувалися зони за тунельним простором з бокових сторін і під бетонною основою (лотком) тунелю.

Метод створення короткоімпульсного поля використовувався для визначення зон підвищеної фільтрації та підвищення рівня водонасиченості ґрунтів. Метод створення короткоімпульсного поля базується на вивченні процесу генерації і загасання електромагнітного сигналу в приймальних антенах після проходження електромагнітного імпульсу в антені генератору.

Методи електрорезонансного та георадарного зондування застосовувалися для уточнення вертикальних стратиграфічних розрізів, шаруватості, визначення суфозійно-міграційних каналів і порожнин, в тому числі заповнених водою.

Для проведення зйомок над об'єктами досліджень використовувалася малогабаритна вимірювальна установка, яка базується на створенні імпульсів збудження короткої довжини та реєстрації процесу становлення електромагнітного поля та феритові антени типу «вертикальний диполь».

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

В модифікації наданого методу для збудження сигналу використовується короткий електромагнітний імпульс тривалістю 10 мкс при струмі збудження 10 А.

Процес створення електромагнітного поля реєструється на приймальній малогабаритній феритовій антені з наступним співвідношенням параметрів активного опору (R), індуктивності (L) та ємності (c):

$$R \ll 2\sqrt{L/c}. \quad (1)$$

Для приймальних антен з подібним співвідношенням параметрів процес становлення поля має коливальний характер, реєстрація якого здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача сигналу АЦП. Дані процесу записуються та зберігаються у цифровому вигляді. Одночасно із реєстрацією здійснюється обробка даних спостережень та видача їх на монітор польового комп'ютера.

Для побудови контурів зон підвищеної вологості ґрунтів здійснюється підсумовування відбитого сигналу на визначеному часовому інтервалі. Для визначення глибини закладення аномальних геоелектричних об'єктів використовується методи вертикального електрорезонансного та георадарного зондування.

Методика вертикального електрорезонансного зондування базується на вивченні спектральних характеристик природного електромагнітного поля над об'єктами досліджень і використовує принципи поляризації геоелектричних неоднорідностей стратиграфічного розрізу в природному квазістаціонарному електричному полі Землі. Його напруженість для рівнинних ділянок знаходиться в межах $E(z)=50\dots 100$ В/м. Геоелектричні неоднорідності розрізу в даному полі утворюють з поверхнею землі і повітря систему поляризаційних диполів.

Під час природної або штучно викликаной зміни величини $E(z)$ системою природно поляризованих диполів генерується пакет електромагнітних хвиль з довжиною L_i , що дорівнює:

$$L_i = 2H_i, \quad (2)$$

де H_i – глибина до поверхні конкретного поляризованого об'єкту.

При цьому на денній поверхні генерується сумарне електромагнітне поле, що зумовлене зміною природного електричного потенціалу. Реєстрація та визначення хвильових характеристик окремих хвиль даного поля може здійснюватися підбором резонансної частоти генератора або спеціальних антен.

Георадарний метод зондування суцільних середовищ або приповерхове радіолокаційне зондування (GPR – Ground Penetrating Radar) є технологічним методом вивчення приповерхової (в інтервалі перших десятків метрів) структури геологічних розрізів та окремих об'єктів (Petrenko, & Kovalevych, 2014). Принцип дії георадарних систем заснований на випромінюванні надширококутних (наносекундних) імпульсів електромагнітних хвиль метрового та дециметрового діапазону та прийманні сигналів, відбитих від меж поділів шарів середовища, що зондується. Такими межами є контакти між сухими та водонасиченими ґрунтами, розділ порід різного літологічного складу, контакти між породами та об'єктами штучного походження.

В Україні були розгорнуті роботи з вирішення різних задач, в тому числі оцінки якості ущільнення та вологості ґрунтів земляного полотна залізниць (Petrenko, & Kovalevych, 2014), визначення рівня ґрунтових вод та розмірів перезволожених зон ґрунту, а також виявлення потужності слабких ґрунтів, що підстилають земляне полотно, із пошуком в ньому дефектів (порожнини, зони розущільнення ґрунтів, інфільтрації води тощо).

Георадарні дослідження проводяться таким чином. Передаюча антена георадара із визначеним періодом випромінює надширококутні полуторноперіодні електромагнітні імпульси. Кожен з імпульсів розповсюджується в середовищі, що зондується, та відбивається від неоднорідностей. Відбиті хвилі реєструються приймальною антеною, проводиться їх запис та відбувається побудова на моніторі хвильової картини (радарограма). На горизонтальній осі радарограми відображається відстань у метрах, на вертикальній – час в наносекундах або глибина в метрах.

Результати

При аналізі ситуації, що склалася в розглянутих інженерно-геологічних умовах, слід враховувати, що коливання, зумовлені рухом метропоїздів, можуть за рахунок динамічного впливу призвести до втрати стійкості структури водонасичених незв'язних ґрунтів та їх перехід в розріджений стан. Така ситуація завжди має катастрофічні наслідки для об'єктів, що знаходяться всередині ґрунтового масиву або на поверхні.

Як відомо, коливання ґрунту, що зумовлені рухом транспорту, достатньо слабкі. Разом з тим, внаслідок тривалості дії вони можуть бути причиною віброповзучості або відрокомпресії дисперсних ґрунтів, оскільки під час тривалої дії коливань та зростання їх прискорення опір зсуву суттєво зменшується, а значення коефіцієнту пористості збільшується, що обумовлює віброущільнення ґрунтів.

При визначеній частоті коливань опір ґрунту, особливо незв'язного, може настільки зменшитися, що ґрунт отримує властивості в'язкої рідини з внутрішнім тертям, близьким до нуля, і зниженою несучою здатністю.

Вібров'язкість ґрунтів може характеризуватися коефіцієнтом вібров'язкості v (Па·с), який залежить від властивостей ґрунту та відносного прискорення коливань, що записується згідно з (Цытович, 1983):

$$vn^k = b, \quad (3)$$

де n – відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння; k , b – емпіричні коефіцієнти.

З експериментальних досліджень відомо (Цытович, 1983), що коефіцієнт вібров'язкості залежить від фізичного стану ґрунту і особливо від його вологості, тобто його найменше значення спостерігається у повністю водонасичених пісках.

Під дією вібрації пухкі відкладення ґрунтів, особливо тих, що не мають зчеплення, можуть надавати значні осідання, зумовлені зміною пористості ґрунтів в процесі їх вібрування.

Як показали відповідні дослідження, між коефіцієнтом пористості ґрунтів та прискоренням коливань існує залежність, подібна до компресійної, що називається відрокомпресійною кривою ґрунтів.

Обробка статистичних даних, що наведені в літературі (Цытович, 1983), дозволила отримати залежність пористості пісків ε від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння n :

$$\varepsilon = Ae^{-kn}, \quad (4)$$

де A та k – коефіцієнти, отримані на основі статистичної обробки вибіркової сукупності з урахуванням середньоарифметичної ознаки, середньоквадратичного відхилення та коефіцієнту парної кореляції для нелінійної залежності (Битюков, Зорина, Майминас, и др., 1971), що відповідно дорівнюють $A=0,854$ та $k=0,107$;

$n = \frac{\ddot{z}}{g}$ – відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння. Отриманий розрахунковим шляхом коефіцієнт парної кореляції r_{en} дорівнює 0,9332, що свідчить про високий рівень адекватності теоретичної та емпіричної залежностей (Битюков, Зорина, Майминас, и др., 1971).

Наведена залежність показує, що зі збільшенням відносного прискорення n коефіцієнт пористості піщаного ґрунту ε зменшується згідно експоненціальної залежності. Причому експериментальні точки, які отримані при різних значеннях частоти коливань (від 20 до 42 Гц) достатньо точно описуються однією кривою.

Як відомо з робіт (Веріго, & Коган, 1986; Вознесенский, 1997; Кудрявцев, 1999), частоти коливань, що виникають під час руху залізничного транспорту, в тому числі і метропоїзду, знаходяться в межах 25...50 Гц, що обумовлено власними коливаннями колій, період яких в невідресорених масах на пружній колії не перевищує вказаних величин. Крім того, перевантаження колії за рахунок сил інерції невідресорених мас повинно складати 0,1...0,2 МПа, що суттєво менше діючих на теперішній час в правилах розрахунку колії на міцність максимальних динамічних величин, які складають 0,5 та 0,325 МПа для локомотивів та вагонів відповідно.

Досягнення на практиці таких незначних величин динамічних напружень при вібрації в тунелях Київського метрополітену неможливе у зв'язку з підвищеними деформаціями слабких водонасичених ґрунтів і, відповідно, колії та

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

тунельної оправи (Петренко, В. Д., Тютюкін, Кулаженко, & Петренко, В. І., 2017).

Умови розрідження водонасичених піщаних ґрунтів при вібрації докладно розглядалися (Алешин, & Кудрявцев, 1991; Вознесенский, 1997; Кудрявцев, 1999). Як було встановлено (Кудрявцев, 1999), більш всього розріджуються водонасичені мілкі та пилюваті піски, що мають пухку будову. При цьому виникнення розрідження обумовлено наявністю в ґрунтовій товщі знакозмінних напружень.

Як було відмічено, під час руху метропоїздів по лінії, що розглядається, створювалися коливання низької частоти, що відрізняються від гармонійних. При цьому завжди виникає розрідження ґрунтів.

З врахуванням високого рівня слабких ґрунтів навколо тунелю на ділянці 500 м та високої їх водонасиченості виникла ситуація зміни фізико-механічних властивостей і створення умов для розвитку віброповзучості при відрокомпресії (Алешин, & Кудрявцев, 1991; Кудрявцев, 1999). Це призвело до небезпечного деформування оправ тунелю, що спричинило зниження швидкостей потягів метрополітену на згаданій ділянці тунелю.

На вказаному інтервалі тунелю виконувався комплекс геофізичних вишукувань з метою вивчення гідрогеологічного стану ґрунтів, виявлення зон підвищеної фільтрації ґрунтових вод та ділянок можливого утворення суфозійного розущільнення ґрунту. При проведенні науково-виробничим підприємством «ГЕОПРОМ» геофізичних досліджень на ділянці перегону «Осокорки» – «Позняки» довжиною 180 м отримані наступні результати:

- 1) по осі тунелю встановлені зони підвищеної фільтрації ґрунтових вод;
- 2) встановлено, що основні витoki води в тунель розташовані в зонах підвищеної фільтрації;
- 3) побудовані вертикальні розрізи фільтраційних зон;
- 4) виділені траси суфозійно-міграційних потоків, вздовж яких ймовірно формування водяних міграційних каналів і окремих ліній;
- 5) уточнений гідрогеологічний стан зони закріплення ґрунтів з максимальною можливістю виникнення явища віброповзучості.

На основі аналізу отриманих даних було прийнято рішення закріплення ґрунтів і сформульовані наступні рекомендації:

1) при проведенні робіт із закріплення ґрунтів на ділянках підвищеної фільтрації застосовувати суміші на основі швидкотверднучого цементу;

2) глибина закріплення зон підвищеної фільтрації не повинна перевищувати 12,0...12,5 м від рівня денної поверхні;

3) закріплення ґрунтів вздовж обох тунелів проводити одночасно, не допускаючи значного випередження лівого над правим і навпаки.

На багатьох об'єктах підприємством «Київметробуд» в значних обсягах реалізовані способи укріплення ґрунтових масивів із найскладнішими фізико-механічними властивостями. Причому хімічні способи стабілізації слабких ґрунтів можуть бути впроваджені шляхом улаштування суцільних масивів або окремих колон з ґрунту та в'язучих, що протистоять боковому тиску ґрунтового масиву на підпирні стінки та оправу тунелів, а також можуть слугувати протифільтраційними завісами. Перевага таких методів полягає в економії в'язучих та наповнювача, оскільки ґрунт не видаляється, а тільки змішується з в'язучими.

Порядок ін'єктування водонасичених ґрунтів полягає в наступному. Буріння ін'єкційних свердловин поряд з тунелем здійснюється на відстані 0,5 м по трасі лінії в три черги із додатковим розміщенням в четверту чергу контрольних свердловин. Всі свердловини буряться колонковими свердлами діаметром 93 мм буровим верстатом УКБ-500С з розміщенням обсадної труби (кондуктора) діаметром 89 мм, яка виймається при піднятті ін'єктору.

Відстань між свердловинами в ряду складає 2,0 м, а глибина – 15,0 м. Ін'єкційні та контрольні свердловини проходяться через раніше виконаний укріплений силікатно-цементним розчином шар під лотком потужністю до 1,0 м. В процесі буріння визначаються зони фільтраційних вікон, через які без належного їх перекриття можуть відбуватися небезпечні суфозійні процеси з виносом ґрунту в нижніх шарах. Попередження цих явищ виконується шляхом буріння кінців свердловин та їх закріплення нагнітанням спеціальним розчином (рис. 1).

В подальшому з відставанням в кілька десятків метрів виконується другий етап хімічного закріплення ґрунтів ін'єкційними свердловинами глибиною 15 м з нагнітанням розчину в нижній їх частині, довжина якої досягає 7,4 м, а діаметр – 1,0...1,4 м (рис. 2). Основними факторами, що враховуються при хімічному закріпленні, є вибір рецептури розчину на основі

характеристик ґрунтів із мінімальною пористістю, вологості та літологічного складу: маловологий ґрунт повинно закріплювати цементно-силікатними розчинами з додатково диспергованим цементом, а водонасичений – на основі дворозчинної силікатизації з додаванням хлористого кальцію.

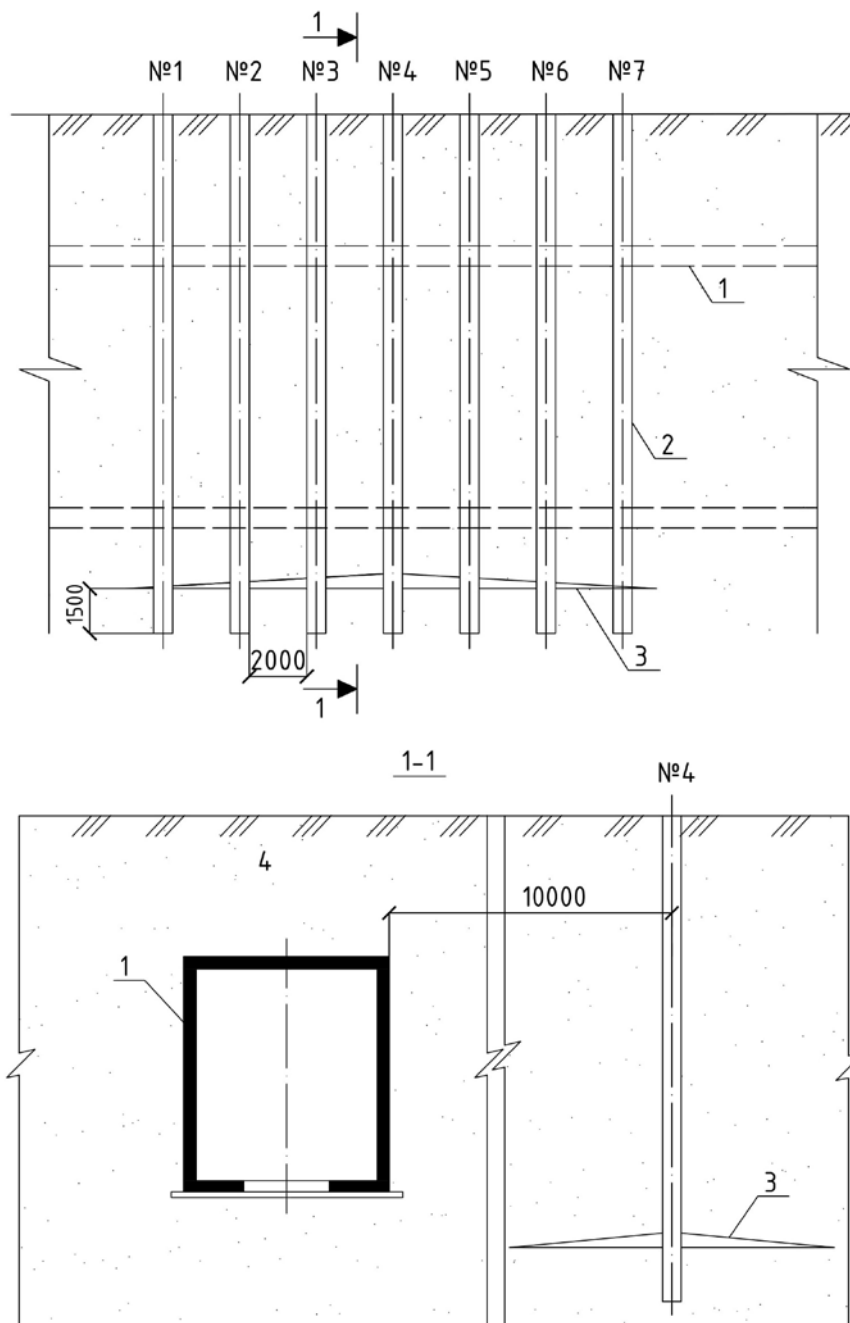


Рис. 1. Схема укріплення ґрунту в місцях знаходження «лінз» під тунелями:

- 1 – контур конструкції перегінного тунелю; 2 – свердловини;
- 3 – зони підвищеної фільтрації («лінзи»); 4 – ґрунтовий масив

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

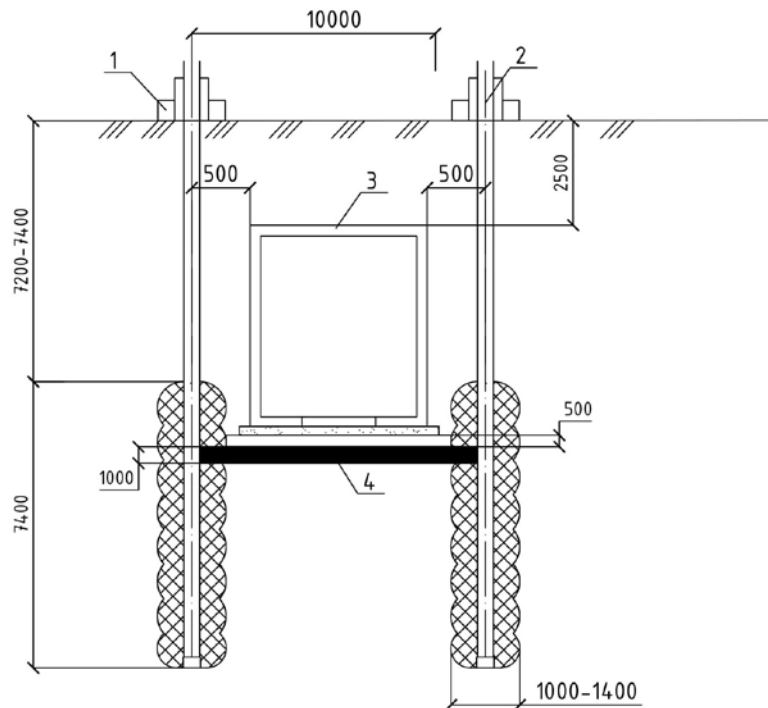


Рис. 2. Схема хімічного закріплення ґрунтів:

1 – буровий верстат УКБ-500С; 2 – ін'єктор $\varnothing 42$ мм; 3 – оправа тунелю;
4 – закріплений шар ґрунту під лотком; 5 – закріплені зони з боків тунелю

Контроль суцільності та однорідності закріпленого масиву здійснюється по завершенні ін'єкційних робіт шляхом буріння контрольних свердловин, в ході якого виконується опис кернів, що витягаються із закріпленого ґрунту через кожний метр і візуально оцінюються.

Наукова новизна та практична значимість

На основі виконаних аналітичних досліджень отримана залежність пористості слабких водонасичених ґрунтів від відношення прискорення коливань до прискорення сили тяжіння при визначених частотах коливань колії, обумовлених рухом поїздів метрополітену, а також визначені параметри укріплення (силікатизація та цементация) ґрунтів з боків та під лотком оправи перегінних тунелів.

Застосування геофізичних методів (створення короткоімпульсного поля, вертикального електрорезонансного та георадарного видів зондування) визначення слабких місць в ґрунтовому масиві дозволило виконати їх укріплення в діючих тунелях метрополітену мілкого закладення та знизити ризик їх небезпечної експлуатації.

Висновки

На основі виконаних за участю науково-виробничого підприємства «ГЕОПРОМ» геофізичних досліджень та підвищення рівня закріплення слабких шаруватих та водонасичених ґрунтів по трасі Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену були рекомендовані методи укріплення, які характеризуються високим рівнем ефективності.

Геофізичні методи дозволили виконати картування зон підвищеної водонасиченості та фільтрації ґрунтів, побудувати вертикальні розрізи, провести пошук суфозійно-міграційних каналів і порожнин, підтвердивши високий рівень їх точності при обстеженні 500 метрів ґрунтових умов по трасі тунелю.

Після проведених геофізичних досліджень шаруватих та водонасичених ґрунтів було обґрунтовано технологію хімічного закріплення під лотком та з боків тунелів мілкого закладення цементно-силікатними розчинами та на основі дворозчинної силікатизації з додаванням хлористого кальцію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Petrenko, V. D., & Kovalevych, V. V. (2014). The Results of the Defect Places Investigation of Donetsk Railway Road Bed by Ground Penetrating Radar Complex. *Наука та прогрес транспорту*, 5 (53), 83-91.
- Qiu, Y., Dennis, N. D., & Elliott, R. P. (2000). Design Criteria for Permanent Deformation of Subgrade Soils in Flexible Pavements for Low-Volume Roads. *Soils and Foundations*, 40, 1, 1-10.
- Shibazaki, M. (2003). State of Practice of Jet Grouting. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, 1, 198-217.
- Алешин, А. С., & Кудрявцев, И. А. (1991). О влиянии динамических воздействий на виброкомпрессию несвязных грунтов. *Инженерная геология*, 4, 38-41.
- Битюков, Ю. С., Зорина, С. С., Майминас, Е. З., и др. (1971). *Математика и кибернетика в экономике. Словарь-справочник*. Москва: Экономика.
- Вериго, М. Ф., & Коган, А. Я. (1986). *Взаимодействие пути и подвижного состава*. Москва: Транспорт.
- Вознесенский, Е. А. (1997). *Поведение грунтов при динамических нагрузках*. Москва: Изд-во МГУ.
- Гришко, Д. А., Шуплик, М. Н., & Куликова, Е. Ю. (2011). Перспективы применения струйной цементации в городском подземном строительстве с целью снижения экологических рисков. *Научный вестник Московского государственного горного университета*, 9, 16-22.
- Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., Ларцева, И. И., Шокарев, В. С., & Крисан, В. И. (2011). Характеристики штучных твердых грунтов, які поліпшені бурозмішувальним методом. *Світ геотехніки*, 3, 14-18.
- Кудрявцев, И. А. (1999). *Влияние вибрации на основания сооружений*. Гомель: БелГУТ.
- Малинин, А. Г. (2009). *Струйная цементация грунтов*. Москва: Стройиздат.
- Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, Г. К. (2011). Надежность способов закрепления грунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена. *Вісник ДНУЗТу імені академіка В. Лазаряна*, 35, 135-139.
- Петренко, В. Д., Тютюкін, О. Л., Кулаженко, Є. Ю., & Петренко, В. І. (2017). Моніторинг деформацій оправи Сирецько-Печерської лінії Київського метрополітену та заходи щодо їх зменшення. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 11, 42-51.
- Петренко, В. И., & Петренко, В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления грунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.
- Цытович, Н. А. (1983). *Механика грунтов (краткий курс)*. Москва: Высшая школа.
- Черняков, А. В. (2011). Струйная цементация грунтов при строительстве в условиях плотной городской застройки. *Наука и техника в дорожной отрасли*, 3, 62-66.

В. Д. ПЕТРЕНКО¹, Д. О. БАННИКОВ^{2*}, Н. И. НЕТЕСА³

¹ Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (050) 708 50 69, эл. почта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (063) 400 43 07, эл. почта bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Кафедра «Строительное производство и геодезия», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (067) 195 50 27, эл. почта andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ СЛОИСТОГО И ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ КИЕВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Цель. Актуальным вопросом для тоннелей метрополитена мелкого заложения в сложных инженерно-геологических условиях является определение физико-механических свойств грунтов не только при инженерных изысканиях, но и при их изучении с использованием геофизических методов исследования грунтовых условий. Кроме того, важным является выбор способов улучшения свойств грунтов путем укрепления, особенно в зонах снижения их прочностных характеристик. Это обеспечивает эффективную эксплуатацию тоннелей с исключением опасных явлений типа виброползучести грунтов и деформаций пути и обделок.

Методика. Используя существующие положения о геофизических исследованиях, с целью определения слабых мест слоистого и водонасыщенного массива и обоснования способов его укрепления, разработаны основы комплексного исследования и производственной реализации для повышения уровня безопасной работы тоннелей метрополитена. **Результаты.** Выполнены геофизические исследования по выявлению слабых мест в грунтовой толще по трассе перегонных тоннелей Сырецко-Печерской линии Киевского метрополитена (левый берег Днепра) и установлено, что в современных условиях для усиления слабых водонасыщенных и слоистых грунтов необходимо использовать способы перемешивания грунтов с вяжущими веществами, которые инъецируются под давлением. **Научная новизна.** На основе выполненных аналитических исследований получена зависимость пористости слабых водонасыщенных грунтов от отношения ускорения колебаний к ускорению силы тяжести при определенных частотах колебаний пути, обусловленных движением поездов метрополитена, а также определены параметры укрепления грунтов по бокам и под лотком обделки перегонных тоннелей. **Практическая значимость.** Применение геофизических методов определения слабых мест в грунтовом массиве позволило выполнить их укрепление в действующих тоннелях метрополитена мелкого заложения и снизить риск их опасной эксплуатации.

Ключевые слова: физико-механические свойства; слоистый и водонасыщенный массив; тоннели метрополитена; мелкое заложение; геофизические методы; химическое закрепление

V. D. PETRENKO¹, D. O. BANNIKOV^{2*}, M. I. NETESA³

¹ Department «Bridges and tunnels» of Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (050) 708 50 69, e-mail petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

^{2*} Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (063) 400 43 07, e-mail bdo2020@yahoo.com, ORCID 0000-0002-9019-9679

³ Department «Construction Production and Geodesy», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 195 50 27, e-mail andreynetesa@meta.ua, ORCID 0000-0003-1730-7642

GEOPHYSICAL STUDIES AND STRENGTHENING A LAYERED AND WATER-SATURATED SOIL MASS IN THE KYIV METRO CONDITIONS

Purpose. An urgent issue for shallow underground tunnels in difficult engineering and geological conditions is the determination of the physical and mechanical properties of soils not only during engineering surveys, but also when they are studied using geophysical methods for studying ground conditions. In addition, it is important to choose ways to improve the properties of soils by strengthening, especially in areas where their strength characteristics are reduced. This ensures the efficient operation of tunnels with the elimination of hazardous phenomena such as vibration creep of soils and deformations of the track and lining. **Methodology.** Using the existing provisions on geophysical research, in order to identify the weaknesses of the layered and water-saturated massif and justify ways to strengthen it, the basics of a comprehensive study and production implementation have been developed to increase the level of safe operation of metro tunnels. **Findings.** Geophysical studies were carried out to identify weaknesses in the soil stratum along the route of the running tunnels of the Syretsko-Pechersk line of the Kyiv metro (the left bank of the Dnipro) and it was established that in present conditions, to strengthen weak water-saturated and layered soils, it is necessary to use methods of mixing soils with binders that are injected under pressure. **Originality.** Based on the performed analytical studies, the dependence of the porosity of weak water-saturated soils on the ratio of the acceleration of vibrations to the acceleration of gravity at certain frequencies of the path vibration caused by the movement of metro trains was obtained, and the parameters of soil strengthening on the sides and the bottom of the rim of the running tunnels were determined. **Practical value.** The use of geophysical methods for determining weak spots in the soil massif allowed them to be strengthened in the existing shallow underground tunnels and reduce the risk of their dangerous operation.

Keywords: physical and mechanical properties; layered and water-saturated massif; metro tunnels; shallow laying; geophysical methods; chemical stabilization

REFERENCES

- Petrenko, V. D., & Kovalevych, V. V. (2014). The Results of the Defect Places Investigation of Donetsk Railway Road Bed by Ground Penetrating Radar Complex. *Nauka ta prohresh transportu*, 5 (53), 83-91. (in English)
- Qiu, Y., Dennis, N. D., & Elliott, R. P. (2000). Design Criteria for Permanent Deformation of Subgrade Soils in Flexible Pavements for Low-Volume Roads. *Soils and Foundations*, 40, 1, 1-10. (in English)
- Shibazaki, M. (2003). State of Practice of Jet Grouting. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, 1, 198-217. (in English)
- Aleshin, A. S., & Kudrjavcev, I. A. (1991). O vlijanii dinamicheskikh vozdeystvij na vibrokompresiju nesvjaznykh gruntov. *Inzhenernaja geologija*, 4, 38-41. (in Russian)
- Bitjukov, Ju. S., Zorina, S. S., Majminas, E. Z., i dr. (1971). *Matematika i kibernetika v jekonomike. Slovar'-spravochnik*. Moskva: Jekonomika. (in Russian)
- Verigo, M. F., & Kogan, A. Ja. (1986). *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Voznesenskij, E. A. (1997). *Povedenie gruntov pri dinamicheskikh nagruzkah*. Moskva: Izd-vo MGU. (in Russian)
- Grishko, D. A., Shuplik, M. N., & Kulikova, E. Ju. (2011). Perspektivy primenenija strujnoj cementacii v gorodskom podzemnom stroitel'stve s cel'ju snizhenija jekologicheskikh riskov. *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 9, 16-22. (in Russian)
- Zocenko, M. L., Vynnykov, Ju. L., Larceva, I. I., Shokarev, B. C., & Krysan, V. I. (2011). Kharakterystyky shtuchnykh tverdykh gruntiv, jaki polipsheni burozmishuval'nym metodom. *Svit gheotekhniki*, 3, 14-18. (in Ukrainian)
- Kudrjavcev, I. A. (1999). *Vlijanie vibracii na osnovanija sooruzhenij*. Gomel': BelGUT. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2009). *Strujnaja cementacija gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Petrenko, V. I., & Savinkov, G. K. (2011). Nadezhnost' sposobov zakreplenija gruntov pri jekspluatacii peregonnykh tonnel'ej Kievskogo metropolitena. *Visnik DNUZTu imeni akademika V. Lazarjana*, 35, 135-139. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Tjutjkin, O. L., Kulazhenko, Je. Ju., & Petrenko, V. I. (2017). Monitoryng deformacij opravy Syrecjko-Pechersjkoji liniji Kyjivskogho metropolitenu ta zakhody shhodo jikh zmenshennja. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 11, 42-51. (in Ukrainian)
- Petrenko, V. I., & Petrenko, V. D. (2014). Obosnovanie parametrov himicheskogo zakreplenija gruntov pri stroitel'stve Kievskogo metropolitena. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka*, 4, 60-66. (in Russian)
- Cytovich, N. A. (1983). *Mehanika gruntov (kratkij kurs)*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Chernjakov, A. B. (2011). Strujnaja cementacija gruntov pri stroitel'stve v uslovijah plotnoj gorodskoj zastrojki. *Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli*, 3, 62-66. (in Russian)

Надійшла до редколегії 09.05.2020.

Прийнята до друку 30.05.2020.