

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.191:624.139.62-026.656

О. Л. ТЮТЬКІН¹, В. А. МІРОШНИК^{2*}

¹ Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Кафедра «Мости та тунелі», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, ел. пошта miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПЕЦІАЛЬНИХ СПОСОБІВ ПІД ЧАС ПРОХОДКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВИРОБОК

Мета. Все частіше в умовах України будівництво тунелів і метрополітенів потребує спеціальних способів робіт, що дозволяють зменшити водонасиченість та збільшити стійкість ґрунтів та порід оточуючого масиву. Різноманіття способів, що застосовуються в підземному будівництві, потребує наукового обґрунтування, особливо коли спеціальні способи близькі за прямими та трудовитратами. Метою наукової статті є аналіз спеціальних способів проходки вертикальних виробок у складних інженерно-геологічних умовах для визначення області їх застосування. **Методика.** Існуючі технології закріплення водонасичених ґрунтів використовують без достатнього наукового обґрунтування, в деяких випадках без проведення техніко-економічного порівняння способів на стадії проектування. Слід виокремити особливості, переваги та недоліки кожного з них та окреслити межі їх застосування. Для досягнення поставленої мети розглянуті і проаналізовані три спеціальні способи закріплення ґрунтів: «стіна в ґрунті», штучне заморожування ґрунтів та струминна цементация «jet-grouting». **Результати.** Визначені переваги та недоліки трьох способів закріплення ґрунтів та розрахована кошторисна вартість будівництва. Доведено, що єдиною технологією, що забезпечує безпечну проходку стовбурів в складних умовах під час проходки протяжних складних ділянок або у разі проходки дуже глибоких стовбурів, є технологія заморожування ґрунтів. А у тих випадках, коли потужність шарів слабких обводнених ґрунтів незначна, ефективнішою стає технологія струминної цементация ґрунтів «jet-grouting». Результати аналізу є підґрунтям для подальшого обґрунтування кожного зі способів з позиції напружено-деформованого стану загальної системи, що утворюється при спорудженні підземних об'єктів, зокрема вертикальних виробок для шахтних стовбурів. **Наукова новизна.** Проведений порівняльний аналіз трьох основних спеціальних способів спорудження вертикальних виробок надав змоги окреслити та науково обґрунтувати умови застосування кожного з них. **Практична значимість.** У програмному комплексі АВК-5 (3.5.1) було виконано розрахунок кошторисної вартості всіх трьох способів закріплення ґрунтів. За результатами розрахунку штучне замороження ґрунтів є найбільш економічно вигідним.

Ключові слова: вертикальна виробка; інженерно-геологічні умови; «стіна в ґрунті»; штучне заморожування ґрунтів; струминна цементация «jet-grouting»

Вступ

Спорудження тунелів і метрополітенів в слабких водонасичених ґрунтах представляє складну інженерну задачу, особливо в містах, забудованих великими житловими й промисловими будівлями, з наявністю інтенсивного руху міського транспорту і складного підземного комунального господарства (Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005). У цих умовах проходка виробок в нестійких і водоносних ґрунтах тягне за собою просідання поверхні землі і, як наслідок, деформації будівель і порушення нормального життя міста.

Під час проходки підземних споруд метрополітенів (стовбури шахт, похилі ескалаторні тунелі, перегінні і станційні тунелі, котловани підземних вестибюлів, підземні камери) в складних несприятливих геологічних і гідрогеологічних умовах (в нестійких ґрунтах, при великому обводненні ґрунтовими водами, наявності пливунів тощо) широко застосовують спеціальні способи виконання робіт з метою закріплення ґрунтів і поліпшення їх властивостей.

В області закріплення ґрунтів розроблені два напрямки: закріплення ґрунтів у природному заляганні і закріплення їх в порушеному стані. За способами перегину водонасичених

© О. Л. Тютюкін, В. А. Мірошник, 2020

грунтів спеціальні способи проходки виробок можна поділити на групи (Дорман, 1981; Петренко, В. И., & Петренко, В. Д., 2014):

1) які не потребують будь-яких змін фізико-хімічних і механічних властивостей водонасичених ґрунтів (огорожі з буронабивних паль, «стіна в ґрунті») (Колесников, & Стрельникова, 1999; Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005);

2) які знижують рухливість цих ґрунтів на певний період часу (штучне заморожування ґрунтів) (Andersland, & Ladanyi, 2003; Tiutkin, Petrenko, Petrosian, Mirosnyk, & Alkhdour, 2018; Дорман, 1971);

3) які змінюють фізико-механічні властивості ґрунтів на тривалий період будівництва та експлуатації (струминна цементация «jet-grouting») (Croce, Flora, & Modoni, 2014; Kutzner, 1996; Малинин, 2010).

Кожна з вищеназваних груп має свою, вже окреслену за наявним досвідом застосування, зону застосування. Так, спосіб «стіна в ґрунті» дозволяє створювати в ґрунті стіни, які використовують в якості несучої або огорожувальної конструкції, протифільтраційної завіси.

Штучне заморожування ґрунтів широко застосовується для запобігання припливу води в підземні виробки і тимчасового надання ґрунтам міцності. Заморожування може бути застосовано для всіх типів пухких, зв'язних і незв'язних ґрунтів, напівскельних і скельних порід. Цей спосіб є універсальним, але і в ньому наявні особливості, що утруднюють його найширше застосування (Andersland, & Ladanyi, 2003; Harris, 1995; Tiutkin, Mirosnyk, Radkevych & Alkhdour, 2019).

Струменева цементация «jet-grouting» використовується для закріплення слабких, нестійких порід під час проходки шахтних стволів (вертикальних виробок) та інших підземних об'єктів (Croce, Flora, & Modoni, 2014; Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, 2011).

Мета

Для наукового обґрунтування технологій спорудження підземних об'єктів та подальших досліджень їх впливу на напружено-деформований стан системи «тимчасове кріплення – оправа – оточуючий масив», слід провести аналіз спеціальних способів проходки вертикальних виробок у складних інженерно-

геологічних умовах для визначення оптимального варіанту виконання робіт. Важливо проаналізувати суть цих спеціальних технологій, переваги та недоліки, необхідне обладнання для їх реалізації та на основі цих знань уміти визначати раціональні області її застосування.

Методика

Детально розглянемо технологію «стіна в ґрунті». При будівництві тунелів і станцій метрополітенів мілкого закладення і інших підземних споруд цим способом влаштовують в траншеї стіни, які є конструкцією споруди і одночасно використовуються як кріплення котловану, під захистом якого здійснюється виїмка ґрунту екскаватором. Спочатку при влаштуванні «стіна в ґрунті» їх використовували тільки для кріплення котловану, однак подальше вдосконалення цього способу дозволило використовувати ці стіни в конструкції споруд (В. И., Петренко, В. Д., & Тютюкин, 2005).

При виконанні робіт способом «стіна в ґрунті» під глинистим розчином бурять свердловини ударним або обертальним способом. Діаметр свердловини повинен бути на 50 мм більше розрахункової товщини стін, крок між ними приймають рівним розмаху щелеп грейфера або кратним цієї величині.

У пробурені свердловини, заглиблені на 1...1,5 м нижче проектною позначки стіни, опускають обсадні труби, які й утворюють між собою окремі захватки (рис. 1). Між свердловинами плоским грейфером, відповідним товщині стіни, вибирають ґрунт під глинистим розчином до проектною позначки. Після установки арматурного каркаса і укладання бетону обсадні труби витягають, при цьому утворюються свого роду паз і шпонка між окремими захватками.

Залізобетонні стіни внаслідок утворення на їх поверхні бентонітового шару стають водонепроникними. Слабким місцем у конструкції стін є стики, особливо при влаштуванні стін в водоносних ґрунтах, тому вибору стикувально-го пристрою і його виконання має бути приділена особлива увага.

Ґрунт з внутрішньої частини споруд розробляють не раніше ніж через 28 днів після закінчення бетонування «стіна в ґрунті» (рис. 2), тобто коли бетон конструкції набере найбільшу міцність (ДБН В.2.3-7:2018).

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

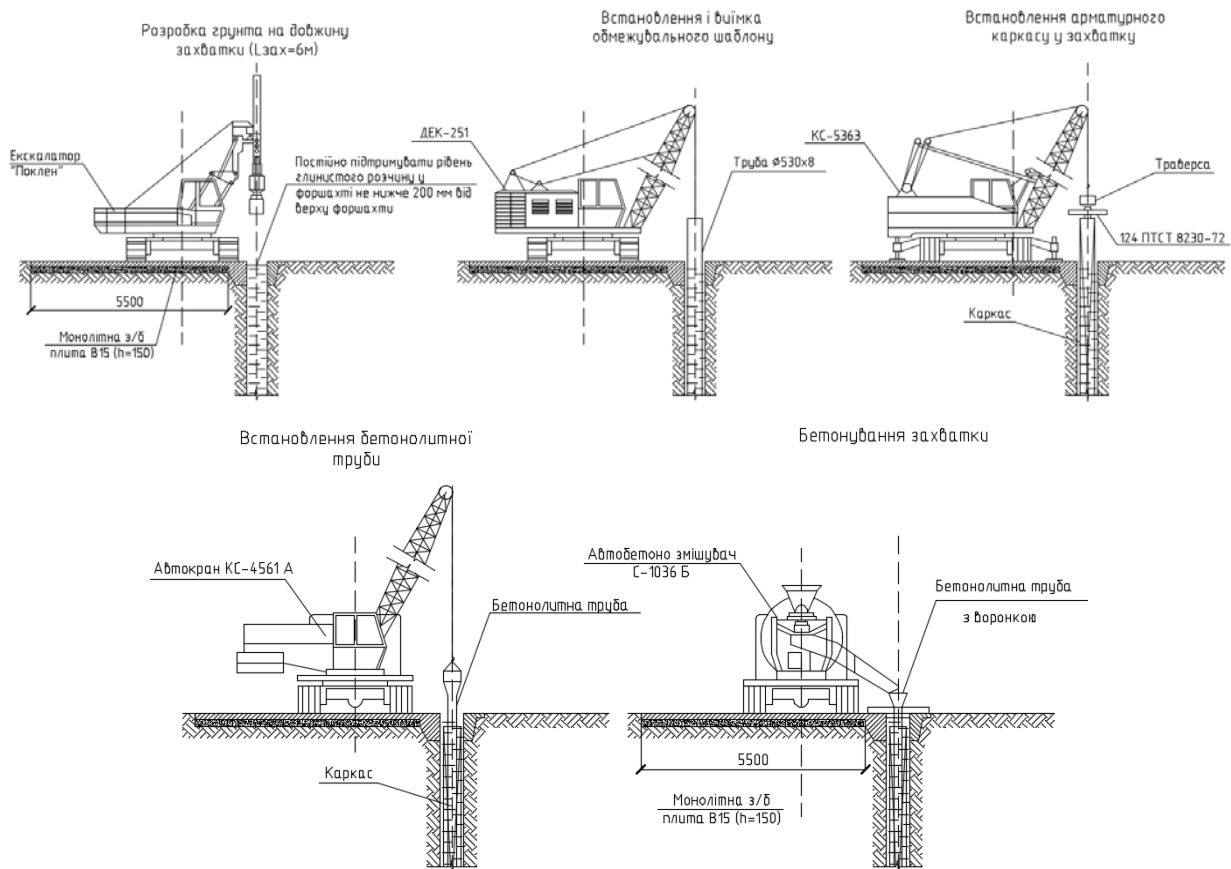


Рис. 1. Технологія будівництва вертикальних виробок способом «стіна в ґрунті»



Рис. 2. Вертикальна виробка при закріпленні ґрунту технологією «стіна в ґрунті»

Штучне заморожування ґрунтів дозволяє створити міцне огороження кругового або прямокутного обрису із замороженого ґрунту, що перешкоджає проникненню в споруджувані виробки ґрунтової води або водонасичених нестійких ґрунтів. Таке огороження сприймає тиск навколишнього ґрунту на виробку або котлован, а також гідростатичний напір ґрунтових вод.

Для заморожування ґрунтів, як правило, використовують так званий холодильний агент (холодоагент). В його якості застосовують охолоджений водний розчин хлористого кальцію (розсіл), який має здатність залишатися рідким при негативних температурах. Такий розсіл, охолоджений на заморожувальній станції, по системі труб подають до заморожувальної колонки, яка занурена в пробурені свердловини.

Для створення льодогрунтової огорожі попередньо по контуру майбутньої виробки через всю товщу водонесних ґрунтів бурять свердловини, занурюючи кінці їх на 6 м в водоупорний

грунт (суглинок). Відстань між визначається проектом з розрахунку, що радіус наморозження навколо свердловини льодогрунтового циліндра становить 1,25...1,5 м.

У пробурені свердловини опускають заморожуючі труби-колонки з наглухо завареним нижнім кінцем (дном). У колонки, не доходячи до дна їх на 40...50 см, опускають труби меншого діаметру з відкритим нижнім кінцем – труби живлення.

Заморожуючі колонки через спеціальні оголовки з'єднують в розташовану на поверхні загальну систему, що складається з труби-розподільника, по якій подається охолоджений на заморожувальній станції розчин хлористого кальцію (розсіл), і труби-колектора, що відводить розсіл з колонок до тієї ж станції.

На заморожувальній станції монтують насосно-компресорні агрегати і пристрої, призначені для забезпечення роботи всієї системи заморожування. Холодний розсіл насосами нагнітається в розподільник, звідки він рівномірно розходить по живильних трубах заморожувальних колонок. Досягнувши дна колонки, розсіл, тиск якого підтримується насосами на станції, піднімається вгору по кільцевому простору між живильною трубою і заморожуючою колонкою, омиваючи її внутрішні стінки. При цьому відбувається теплообмін: розсіл віднімає тепло у ґрунту, що оточує колонку, і знижує його температуру, що поступово призводить до заморожування ґрунту. Потім з колонки через оголовок розсіл надходить у колектор, а з нього – на заморожуючу станцію, де знову охолоджується.

На заморожувальній станції монтують дві системи машин і механізмів. Перша система (аміачна) призначена для охолодження розсолу аміаком і включає компресор, конденсатор і випарник, з'єднані трубопроводами. Друга система (розсільна) призначена для забезпечення циркуляції розсолу і включає розсільний бак, насос, трубопроводи, розподільник, колектор і заморожуючі колонки.

Поступово навколо кожної колонки утворюється масив замороженого ґрунту циліндричної форми. При подальшому заморожуванні обсяг заморожених циліндрів збільшується, і вони змерзаються між собою в суцільний кільцевий масив (рис. 3).



Рис. 3. Послідовність виникнення льодогрунтового кільця масиву навколо виробки

Час, необхідний для утворення замороженого масиву, залежить від гідрогеологічних умов, числа заморожувальних колонок, температури циркулюючого розсолу, проектної товщини замороженого масиву.

Про виникнення замкнутої льодогрунтової огорожі судять з підняття рівня води у спеціально пробуреній контрольній гідрогеологічній свердловині.

Роботи з проведення заморожування починають з буріння свердловин та встановлення в них заморожувальних колонок з живлячими трубами. Паралельно ведуть роботи з будівництва заморожувальних станцій, монтажу обладнання та розсолпроводу з таким розрахунком, щоб до закінчення буріння свердловин можна було провести випробування і ввести всю систему в роботу (рис. 4).

Виробництво гірничопрохідницьких і будівельних робіт у замороженій зоні має ряд особливостей. Роботи слід вести при ретельному контролі за станом льодогрунтової огорожі та режимом роботи заморожуючої станції для збереження розмірів льодогрунтової огорожі та її температури.

Виїмку ґрунту з котловану в період плюсових температур повітря необхідно вести із захистом стінок льодогрунтової огорожі від дії атмосферних опадів і сонячних променів.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА



Рис. 4. Схема розсолопроводної мережі

При розробці ґрунту буровибуховим способом необхідно дотримуватися запобіжних заходів, не допускати деформації льодогрунтової огорожі та пошкодження заморожувальних колонок. Після закінчення прохідницьких робіт і зведення постійної оправи споруди приступають до відтавання заморожених ґрунтів, яке може відбуватися природним шляхом або виконується штучно шляхом нагнітання в свердловини нагрітого розсолу або води.

Струменева цементация «jet-grouting» полягає у використанні енергії високонапірного струменя цементного розчину для руйнування і одночасного перемішування ґрунту з цементним розчином в режимі "mix-in-place" (перемішування на місці). Після твердіння розчину утворюється новий матеріал – ґрунтобетон або ґрунтоцемент, що володіє високими характеристиками міцності і деформації.

Відзначимо, що в деяких випадках руйнування ґрунту проводять струменем води, в інших випадках – струменем цементного або цементно-бентонітового розчину. Струмінь витікає із сопел спеціального пристрою – монітора, розташованого в нижній частині бурової колони відразу за буровим наконечником.

В соплах монітора відбувається перетворення потенційної енергії робочої рідини, що нагнітається під високим тиском насосом в моні-

тор, в кінетичну енергію струменя. У зв'язку з високими абразивними властивостями цементного розчину сопла виготовляються зі спеціального металокерамічного складу. Діаметр сопел становить 1,6...3,5 мм. Для отримання високої однорідності результатів цементации кількість сопел в моніторі становить 2...6 шт.

Струминну цементацию ґрунту виконують в два етапи – в процесі прямого і зворотного ходу бурової колони.

Під час прямого ходу виконують буріння лідируючої свердловини до проектної позначки. Для буріння м'яких порід застосовують п'яні долота, а при бурінні щільних порід використовують шарошечні долота з твердосплавними елементами.

В процесі зворотного ходу в бурову колону під високим тиском подають робочу рідину і починають підйом колони. Якщо під час підйому одночасно виконувати обертання, то в результаті в ґрунтовому масиві формуються елементи у вигляді колон (рис. 5). Якщо підйом виконувати без обертання, то елементи будуть мати вигляд тонких панелей.

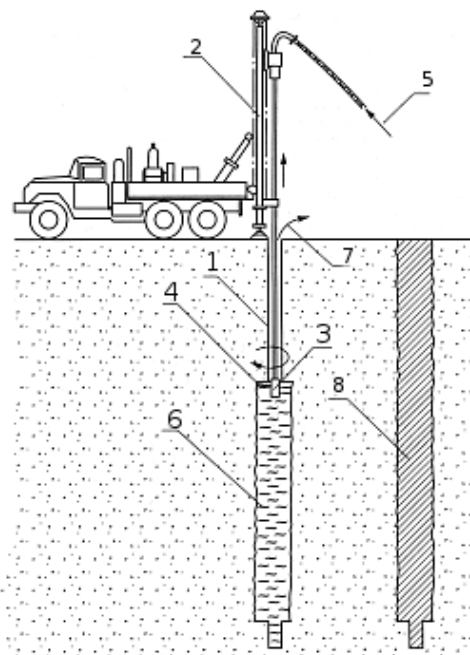


Рис. 5. Схема виробництва струменевої цементации: 1 – технологічна свердловина; 2 – гідравлічний буровий верстат; 3 – свердловинний струминний однокомпонентний монітор; 4 – високошвидкісний струмінь тверднучого розчину; 5 – розчин; 6 – розмита порожнина; 7 – розчино-ґрунтова суміш, що виливається; 8 – готова колона ґрунтобетону (ґрунтоцементу)

На рис. 6 показана схема виконання робіт по струминній цементації при проходці глибокого клітьового стовбура на руднику Грем'ячинського ГЗК із застосуванням спеціального сконструйованого бурового верстата.

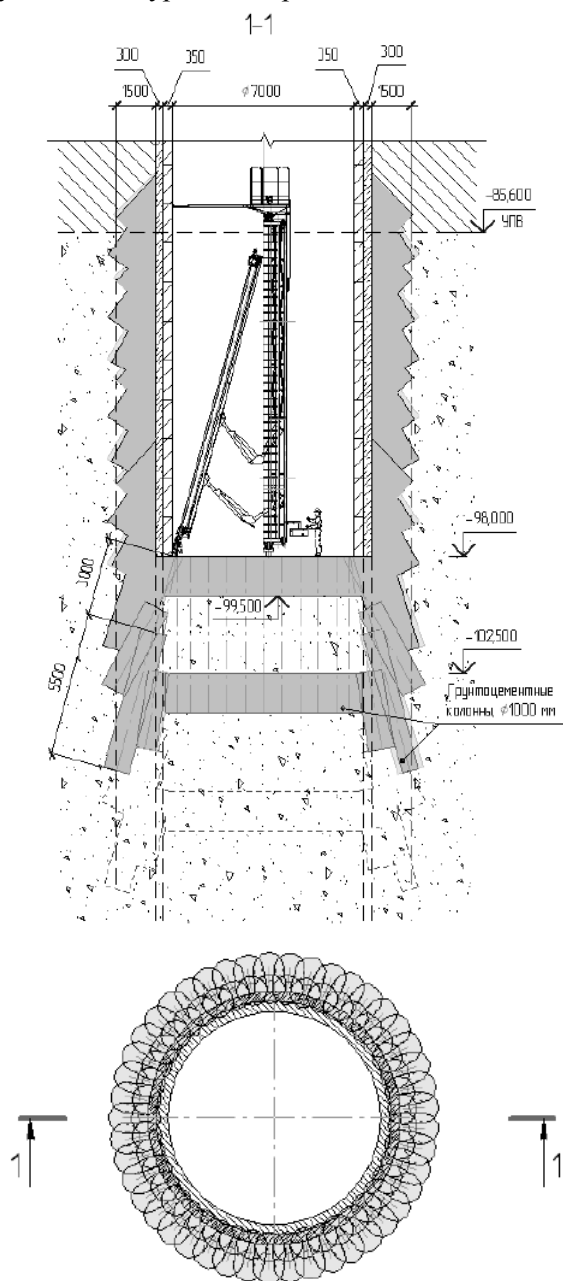


Рис. 6. Влаштування породобетонного огородження у декілька етапів

Така проходка стовбура в шарі нестійких порід великої потужності є надскладним завданням, оскільки у цьому випадку цементацію порід доводиться вести заходками.

Крім того, на кожній заходці доводиться додатково влаштувати горизонтальну протифільтраційну завісу товщиною 2...3 м.

Схема носить циклічний характер і складається з наступних етапів:

- формування вертикальної огорожі за допомогою струминної цементації ґрунтів;
- формування горизонтальної протифільтраційної завіси;
- час вичікування для набору міцності породобетону;
- розробка ґрунту на існуючій заходці.

Послідовний характер всіх робіт призводить до збільшення часу циклу. Скоротити час на перших двох етапах можливо за рахунок підвищення продуктивності робіт по влаштуванню ґрунтоцементних колон.

Результати

Існуючі технології закріплення водонасичених ґрунтів використовують без достатнього наукового обґрунтування, в деяких випадках без проведення техніко-економічного порівняння способів на стадії проектування. Слід виокремити особливості, переваги та недоліки кожного з них та окреслити межі їх застосування.

1. Переваги способу «стіна в ґрунті»:

- будівництво може здійснюватися в будь-яких інженерно-геологічних умовах на глибині до 20 м і більше;
- при будівництві в водонасичених ґрунтах і заглибленні стін у водоупор відпадає необхідність в застосуванні інших спеціальних способів (водозниження, заморожування ґрунтів);
- роботи можна проводити в безпосередній близькості від існуючих будівель і підземних комунікацій і нижче їх основи без влаштування додаткових заходів, що забезпечують їх стійкість і безпеку.

Недоліки способу «стіна в ґрунті»:

- відсутність можливості контролювати якість бетону, що укладається в бентонітовому розчині;
- труднощі збереження проектного положення арматурних каркасів щодо поверхні стіни і збереження захисного шару бетону певної товщини;
- необхідність сколювання бетону для вирівнювання верху стіни на кінцевому етапі робіт.

2. Спеціальний спосіб заморожування. Правильний вибір глибини заморожуючих свердловин має велике значення. Заморожуючі свердловини повинні бути досить заглиблені у водостійкий пласт: при глибині заморожування до 50 м – на 2,0...3,0 м, від 50 м до 100 м – на 3,0...4,0 м, більше 100 м – приймають в залежності від нашарування ґрунтів. Величина їх заглиблення повинна забезпечити повну водонепроникність стін виробки. При визначенні величини заглиблення свердловин необхідно враховувати нерівності покриття водостійкого пласта, тріщинуватість пласта, а також можливу втрату глибини під час буріння свердловин через скупчення дрібного ґрунту на забої.

У загальному комплексі робіт по проходці підземних споруд метрополітенів з попереднім заморожуванням ґрунтів найбільш тривалими, трудомісткими і відповідальними є роботи по бурінню заморожуючих свердловин. На буріння витрачається від 30 до 50 % загального часу, необхідного для виконання робіт по заморожуванню.

На відміну від заморожування ґрунтів під час проходки вертикальних стволів шахт, де бурять виключно вертикальні свердловини, при будівництві метрополітенів переважно бурять похилі свердловини для проходки ескалаторних, перегінних і станційних тунелів.

Від ретельності проведення бурових робіт залежить успіх штучного заморожування ґрунтів.

На жаль, технологія має ряд істотних недоліків і характеризується тривалим періодом активного заморожування, необхідністю підтримки від'ємних температур в процесі будівництва вертикальної виробки, істотними деформаціями кріплення виробок в момент відтавання порід, ускладненням робіт з бетонування постійного кріплення, значним споживанням електроенергії тощо.

3. Струминна цементация дозволяє зміцнювати практично весь діапазон ґрунтів – від гравійних відкладень до дрібнодисперсних глин і мулів. Іншою важливою перевагою технології є надзвичайно висока передбачуваність результатів зміцнення ґрунтів. Це дає можливість на етапі проектування досить точно розрахувати геометричні та міцнісні характеристики майбутньої підземної конструкції та відповідно тривитрати, матеріали та вартість робіт.

Залежно від конкретних цілей обробки ґрунтів застосовується однокомпонентна, двокомпонентна і трикомпонентна струминні цементация. Крім того, можуть бути використані такі спеціальні прийоми, як часткове попереднє промивання оброблюваних ґрунтів («pre-washing») або повне їх заміщення після гідророзмиву і винесення на поверхню цементним розчином або цементним розчином з додаванням мармурової пудри.

Режим попереднього розмиву дозволяє при обробці підвищити співвідношення цемент/ґрунт і, отже, міцність закріплених ґрунтів, що особливо актуально в глинистих ґрунтах.

Використання цементно-піщаних розчинів для заміщення ґрунтів неприпустимо з причини високої абразивності зерен кварцу (швидко зношуються і виходять з ладу розчиноподаючі шланги високого тиску).

У тих випадках, коли стовбур перетинає невеликий шар нестійких порід, цементация цього шару вигідно виконувати з виробки стовбуру. При даному способі значно знижуються обсяги буріння, відсутня проблема розбіжності колон з глибиною буріння. Основним недоліком є необхідність роботи в обмеженому просторі. У стовбурах діаметром 6...8 м доводиться застосовувати малогабаритні бурові верстати з частими з'єднаннями і роз'єднаннями бурових штанг, довжина яких, як правило, становить 1,0 м.

Другим істотним недоліком є необхідність збору і підйому на поверхню ґрунтоцементної пульпи, що в умовах обмеженого простору являє досить трудомістке завдання. На практиці з умов безпеки рідко вдається виконати паралельно ці дві операції – струминну цементацию і збір пульпи, тому їх доводиться виконувати послідовно, що істотно знижує продуктивність робіт.

Наукова новизна та практична значимість

Проведений порівняльний аналіз трьох основних спеціальних способів спорудження вертикальних виробок надав змоги окреслити та науково обґрунтувати умови застосування кожного з них. Результати аналізу є підґрунтям для подальшого обґрунтування кожного зі способів з позиції напружено-деформованого стану загальної системи, що утворюється при спорудженні підземних об'єктів, зокрема вертика-

льних виробок для шахтних стовбурів. У програмному комплексі АВК-5 (3.5.1) було виконано розрахунок кошторисної вартості всіх трьох способів закріплення ґрунтів. За результатами розрахунку штучне замороження ґрунтів є найбільш економічно вигідним.

Висновки

Єдиною технологією, що забезпечує безпечну проходку стовбурів в складних умовах під час проходки протяжних складних ділянок або у разі проходки дуже глибоких стовбурів, є технологія заморожування ґрунтів.

У тих випадках, коли потужність шарів слабких обводнених ґрунтів незначна, ефективнішою стає технологія струминної цементації ґрунтів «jet-grouting».

В подальших теоретичних та практичних побудовах слід, спираючись на вже отримані результати, провести більш комплексний аналіз проаналізованих спеціальних способів. Окрім вже отриманих результатів, остаточний доказ щодо застосування конкретного спеціального способу можливий на основі математичного моделювання процесу проходки та спорудження вертикальних виробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003) *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition. John Wiley & Sons.
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press.
- Harris, J. S. (1995). *Ground freezing in practice*. Amer Society of Civil Engineers.
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema.

А. Л. ТЮТЬКИН¹, В. А. МИРОШНИК^{2*}

¹ Кафедра «Мости и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Кафедра «Мости и тоннели», Днепровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 828 64 87, эл. почта miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Цель. Все чаще в условиях Украины строительство тоннелей и метрополитенов требует специальных способов работ, позволяющих уменьшить водонасыщенность и увеличить устойчивость ґрунтов и пород окружающего массива. Многообразие способов, применяемых в подземном строительстве, требует научного

Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology, *International Conference Essays Of Mining Science And Practice*, E3S Web of Conferences 109, 00099

Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36.

ДБН В.2.3-7:2018. *Метрополітени. Основні положення*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Дорман, Я. А. (1981). *Специальные способы работ при строительстве метрополитенов*. Москва: Транспорт.

Дорман, Я. А. (1971). *Искусственное замораживание ґрунтов при строительстве метрополитенов*. Москва: Транспорт.

Колесников, В. С., & Стрельникова, В. В. (1999). *Возведение подземных сооружений методом «стена в ґрунте»*. Технология и средства механизации. Волгоград: Изд-во ВолГУ.

Малинин, А. Г. (2010). *Струйная цементация ґрунтов*. Москва: Стройиздат.

Петренко, В. Д., Петренко, В. И., & Савинков, Г. К. (2011). Надежность способов закрепления ґрунтов при эксплуатации перегонных тоннелей Киевского метрополитена. *Вісник ДНУЗТу імені академіка В. Лазаряна*, 35, 135-139.

Петренко, В. И., Петренко, В. Д., & Тюткин, А. Л. (2005). *Современные технологии строительства метрополитенов в Украине*. Дніпропетровськ: Наука і освіта.

Петренко, В. И., & Петренко, В. Д. (2014). Обоснование параметров химического закрепления ґрунтов при строительстве Киевского метрополитена. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 4, 60-66.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

обоснования, особенно когда специальные способы близки по прямым и трудозатратами. Целью научной статьи является анализ специальных способов проходки вертикальных выработок в сложных инженерно-геологических условиях для определения области их применения. **Методика.** Существующие технологии закрепления водонасыщенных грунтов используют без достаточного научного обоснования, в некоторых случаях без проведения технико-экономического сравнения способов на стадии проектирования. Следует выделить особенности, преимущества и недостатки каждого из них и определить границы их применения. Для достижения поставленной цели рассмотрены и проанализированы три специальных способа закрепления грунтов: «стена в грунте», искусственное замораживание грунтов и струйная цементация «jet-grouting». **Результаты.** Определены преимущества и недостатки трех способов закрепления грунтов и рассчитана сметная стоимость строительства. Доказано, что единственной технологией, обеспечивающей безопасную проходку стволов в сложных условиях при проходке протяженных сложных участков или в случае проходки очень глубоких стволов, является технология замораживания грунтов. А в тех случаях, когда мощность слоев слабых обводненных грунтов незначительна, эффективнее становится технология струйной цементации грунтов «jet-grouting». Результаты анализа являются основой для дальнейшего обоснования каждого из способов с позиции напряженно-деформированного состояния общей системы, образующейся при сооружении подземных объектов, в частности вертикальных выработок для шахтных стволов. **Научная новизна.** Проведенный сравнительный анализ трех основных специальных способов сооружения вертикальных выработок предоставил возможность определить и научно обосновать условия применения каждого из них. **Практическая значимость.** В программном комплексе АВК-5 (3.5.1) был выполнен расчет сметной стоимости всех трех способов закрепления грунтов. По результатам расчета искусственное замораживание грунтов является наиболее экономически выгодным.

Ключевые слова: вертикальная выработка; инженерно-геологические условия; «стена в грунте»; искусственное замораживание грунтов; струйная цементация «jet-grouting»

O. L. TIUTKIN¹, V. A. MIROSHNYK^{2*}

¹ Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

^{2*} Department «Bridges and tunnels», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana Str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 828 64 87, e-mail miroshnikvetal@gmail.com, ORCID 0000-0002-8115-0128

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECIAL METHODS DURING VERTICAL WORKS

Purpose. Increasingly, in Ukraine, the construction of tunnels and metro requires special methods of work to reduce water saturation and increase the stability of soils and rocks of the surrounding massif. The variety of methods used in underground construction requires scientific justification, especially when special methods are close in direct and labor. The purpose of the scientific article is to analyze special methods of sinking vertical workings in difficult engineering and geological conditions to determine their scope. **Methodology.** Existing technologies for fixing water-saturated soils are used without sufficient scientific justification, in some cases without conducting a feasibility comparison of methods at the design stage. It should highlight the features, advantages and disadvantages of each of them and determine the boundaries of their application. To achieve this goal, three special ways of fixing soils were considered and analyzed: "wall in the ground", artificial freezing of soils and jet-grouting. **Findings.** The advantages and disadvantages of three methods of fixing the soil are determined and the estimated cost of construction is calculated. It has been proved that the only technology that ensures safe penetration of trunks in difficult conditions when penetrating extended complex sections or in the case of penetrating very deep trunks is the technology of freezing soils. And in those cases when the thickness of the layers of weak watered soils is insignificant, the jet-grouting soil cementation technology becomes more efficient. The results of the analysis are the basis for the further substantiation of each of the methods from the standpoint of the stress-strain state of the overall system formed during the construction of underground facilities, in particular vertical workings for mine shafts. **Originality.** A comparative analysis of the three main special methods for constructing vertical workings made it possible to determine and scientifically substantiate the conditions for using each of them. **Practical value.** In the AVK-5 (3.5.1) software pack-

age, the estimated cost of all three methods of soil fixation was calculated. According to the calculation results, artificial freezing of soils is the most cost-effective.

Keywords: vertical work; engineering and geological conditions; "wall in the ground"; artificial freezing of soils; "jet-grouting"

REFERENCES

- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003) *Frozen Ground Engineering*, 2nd Edition. John Wiley & Sons. (in English)
- Croce, P., Flora, A., & Modoni, G. (2014). *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. CRC Press. (in English)
- Harris, J. S. (1995). *Ground freezing in practice*. Amer Society of Civil Engineers. (in English)
- Kutzner, C. (1996). *Grouting of rock and soil*. A. A. Balkema. (in English)
- Tiutkin, O., Miroshnyk, V., Radkevych, A., & Alkhdour, A. (2019). Nonuniform stress state of a hoisting shaft lining as a result of disturbance of the ground freezing technology, *International Conference Essays Of Mining Science And Practice*, E3S Web of Conferences 109, 00099. (in English)
- Tiutkin, O., Petrenko, V., Petrosian, N., Miroshnyk, V., & Alkhdour, A. (2018). Controlling stress state of a hoisting shaft frame in the context of specific freezing process, *Mining of Mineral Deposits*, 12 (4), 28-36. (in English)
- DBN V.2.3-7:2018. *Metropoliteny. Osnovni polozhennja*. Kyjiv: Minreghionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Dorman, Ja. A. (1981). *Special'nye sposoby robot pri stroitel'stve metropolitenov*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Dorman, Ja. A. (1971). *Iskusstvennoe zamorazhivanie gruntov pri stroitel'stve metropolitenov*. Moskva: Transport. (in Russian)
- Kolesnikov, V. S., & Strel'nikova, V. V. (1999). *Vozvedenie podzemnyh sooruzhenij metodom «stena v grunte»*. *Tehnologija i sredstva mehanizacii*. Volgograd: Izd-vo VolGU. (in Russian)
- Malinin, A. G. (2010). *Strujnaja cementacija gruntov*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Petrenko, V. D., Petrenko, V. I., & Savinkov, G. K. (2011). Nadezhnost' sposobov zakreplenija gruntov pri jekspluataciji peregonnyh tonnelej Kievskogo metropolitena. *Visnyk DNUZTu imeni akademika V. Lazarjana*, 35, 135-139. (in Russian)
- Petrenko, V. I., Petrenko, V. D., & Tjut'kin, A. L. (2005). *Sovremennye tehnologii stroitel'stva metropolitenov v Ukraine*. Dnipropetrovsjk: Nauka i osvita. (in Russian)
- 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)

Надійшла до редколегії 30.04.2020.

Прийнята до друку 22.05.2020.