

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.5/.134.1

Й. Й. ЛУЧКО^{1*}, Т. І. БУБНЯК², І. Б. КРАВЕЦЬ³

^{1*} Кафедра будівельних конструкцій, Львівський національний аграрний університет, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Україна, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра вищої математики, Львівський національний аграрний університет, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Україна, 80381, тел. +38 (067) 990 06 67, ел. пошта tbubnyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Кафедра мостів та тунелів, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, ел. пошта kravetsivan2017@gmail.com, ORCID 0000-0002-2239-849X

МЕХАНІЧНІ ПРОЦЕСИ У ҐРУНТОВОМУ МАСИВІ ПРИБОРИЗОНТАЛЬНИХ ВИРОБКАХ (ОГЛЯД)

Мета. Метою роботи є огляд та аналіз існуючих науково-технічних джерел, які присвячені методам і способам горизонтальних виробок та технологічним процесам, які проходять у ґрунтовому масиві при прокладці інженерних комунікацій на основі досвіду провідних організацій. Дослідити ефективність застосування того чи іншого способу безтраншейної прокладки труб та інженерних комунікацій у сучасних умовах будівництва. **Методика.** На основі аналізу сучасних методів і способів силового впливу на ґрунтовий масив та механічних і технологічних процесів, які відбуваються у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках методом статичного проколу та методом продавлювання. Сформулювати загальні відомості про процеси в ґрунтовому масиві та вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на вказані процеси. На основі відомих і існуючих даних для подальших досліджень ми сформулюємо основні теоретичні засади та відповідні припущення для дослідження механічних процесів при проведенні горизонтальних виробок тим чи іншим більш ефективним способом ущільнення ґрунтового масиву. Також вивести нестационарні рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби, та сформулювати розрахункову схему для виведення розрахункових рівнянь рівноваги ґрунтового масиву. **Результати.** Виконано аналіз вітчизняних та закордонних науково-технічних джерел щодо безтраншейних способів прокладки інженерних комунікацій. Зокрема, у вступі описано загальні відомості та актуальність і постановка проблеми дослідження механічних процесів у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках. Розглянуто основні дані літературних джерел, які дали змогу проаналізувати основні методи та способи прокладки інженерних комунікацій та змогу оцінити ефективність застосування того чи іншого способу в конкретній ситуації і умовах. Ґрунтовно проаналізовано можливості ефективного застосування методу статичного проколу методу продавлювання залежно від діаметра виробки. Сформульовані основні задачі, які необхідно розв'язати у майбутньому. **Наукова новизна.** В даній статті на основі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на суцільний ґрунтовий масив, вдалось узагальнити результати досліджень впливу механічних і технологічних процесів на ґрунтовий масив. Зокрема, дослідити механічні процеси ущільнення ґрунтового масиву при виконанні виробки методом статичного проколу і методом продавлювання та встановити їх ефективність при прокладці підземних інженерних комунікацій закритим способом. Також, вперше досліджено вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на процеси, які проходять у ґрунтовому масиві, при дії силового навантаження використовуючи той чи інший метод підземної виробки. **Практична значимість.** На підставі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на ґрунтовий масив отримано дані про можливості ефективно застосовувати закриті (безтраншейні) способи прокладки водопропускних труб, каналізації, теплових трас, підземних переходів під залізничними та автомобільними дорогами та інших інженерних комунікацій, це особливо актуально для мегаполісів, але не всебічно вивчений цей напрямок і деякі аспекти потрібно досліджувати і уточнювати для подальшого практичного застосування.

Ключові слова: продавлювання; прокол ґрунту; ґрунтовий масив; проходка; виробка

Вступ

Найважливішим напрямком економічної політики в світі є підвищення ефективності всіх галузей народного господарства. Вирішення

цього завдання в галузі капітального будівництва інженерних споруд пов'язано із раціональним використанням виділених капітальних вкладень. Особливу увагу має бути звернено на впровадження прогресивних конструкцій і бу-

© Й. Й. Лучко, Т. І. Бубняк, І. Б. Кравець, 2020

дівельних матеріалів на будівництві чи усуненні наслідків руйнування земляного полотна залізничної колії та інших. Оскільки, підвищення ефективності капітальних вкладень значною мірою полягають в обґрунтованості рішень, прийнятих на стадії проектування об'єктів, які збільшать термін служби земляного полотна і штучних споруд та забезпечать надійний пропуск рухомого складу.

Розроблена в ИГД СО РАН класифікація способів спорудження горизонтальних свердловин в ґрунті, дала змогу систематизувати відомі технології та обґрунтувати можливі напрями їх розвитку (Данилов, 2012). В її основу покладено чотири головні ознаки, що відображають фізичну сутність процесу проходки свердловини в ґрунті. Основний з них – спосіб формування свердловини, який може бути реалізований:

- видаленням з масиву обсягу ґрунту по всьому перерізу свердловини;
- ущільненням обсягу ґрунту по всьому перерізу свердловини з витісненням його в масив переважно в радіальному напрямку;
- комбінацією першого і другого варіанту, коли більша частина ґрунту витягується з свердловини, а решта – вдавлюється в її стінки.

Комбінований варіант дає змогу забезпечити тимчасову стійкість свердловини з меншими витратами енергії в порівнянні з другим варіантом і без застосування закріплюючих розчинів, як в першому варіанті.

Перераховані варіанти способу утворення свердловин можуть бути реалізовані статичним, вібраційним і віброударними впливами на робочий орган або їх поєднанням.

Актуальність та постановка проблеми. При прокладці інженерних комунікацій під автомобільними і залізничними дорогами, трамвайними шляхами і іншими перешкодами більш ефективний є закритий метод, який не вимагає влаштування траншеї. У густонаселених та забудованих містах прокладка підземних комунікацій закритим способом не порушує благоустрою і санітарного стану та дезорганізацію у роботі міського транспорту. Тобто доцільність у цих випадках закритого способу прокладки комунікацій – метод безтраншейної прокладки, водопропускних труб, каналізації, теплових трас, переходів під залізничними та автомобільними дорогами очевидна. Основною

вимогою сучасних будівельних і екологічних нормативів є мінімізація впливу будівництва на існуючу інфраструктуру та природню екосистему, що дає поштовх до розвитку закритих (безтраншейних) способів розробки ґрунтових масивів (Рыбаков, 2006; Кравец, Каслин, Руднев, & Супонев, 2008). Потрібно зазначити, що характер ущільнення ґрунту при утворенні свердловин проколом подібний до вдавлювання паль (Васильев, 1964; Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016; Хачатурян, 2013), при цьому максимальне ущільнення ґрунту відбувається на поверхні паль і свердловин та акцентується увага на тому, як веде себе ґрунт на межі де пластичні деформації переходять у пружні. Недостатньо вивчено питання, на нашу думку, і механіки процесу наступного розширення свердловин до потрібного діаметру. Отже, насичена інфраструктура сучасних мегаполісів, жорсткіші будівельні і екологічні нормативи, направлені на мінімізацію втрат, нанесенню існуючим спорудам і природним екосистемам з наступним скороченням об'ємів та витрат при проведенні відновлювальних заходів, висувають на перший план розвиток закритих (безтраншейних) методів (Васильев, 1964; Васильев, & Лещенко, 1993).

Під час повеней у весняну та осінню пори року часто відбувається руйнування мостів та підмивання насипу земляного полотна залізничної колії чи автомобільної дороги. Для усунення наслідків розмиву земляного полотна залізничної колії виділяється велика сума грошей. Крім цього зупинення руху поїздів наносить значних економічних витрат для залізничної галузі через простій вантажних та пасажирських перевезень.

Для підвищення експлуатаційної надійності підтопленого земляного полотна під час повеней у весняну та осінню пори року, які спричиняють руйнування мостів та підмивання колії пропонується будівництво металевих гофрованих конструкцій (МГК) методом проколу масиву земляного полотна без перекидання руху та виконанням робіт у стислі терміни. Застосування водопропускних труб з використанням гофрованого металу для підвищення стійкості та міцності земляного полотна на залізничних та автомобільних дорогах України дасть змогу зменшити витрати коштів на усунення наслідків руйнування, а найголовніше забезпечить

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

безпечний пропуск рухомого складу. Тому робота із розробки технології будівництва (улаштування) металевих гофрованих труб у тілі підтоплювального земляного полотна продавлювання, проколу чи комбінованим методами є актуальною і своєчасною для будівельної галузі держави.

Мета

Метою роботи є огляд та аналіз існуючих науково-технічних джерел, які присвячені методам і способам горизонтальних виробок та технологічним процесам, які проходять у ґрунтовому масиві при прокладці інженерних комунікацій на основі досвіду провідних організацій. Дослідити ефективність застосування того чи іншого способу безтраншейної прокладки труб та інженерних комунікацій у сучасних умовах будівництва.

Методика

На основі аналізу сучасних методів і способів силового впливу на ґрунтовий масив та механічних і технологічних процесів які відбуваються у ґрунтовому масиві при горизонтальних виробках методом статичного проколу та методом продавлювання сформулювати загальні відомості про процеси в ґрунтовому масиві та вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на вказані процеси. На основі відомих і існуючих даних для подальших досліджень ми сформулюємо основні теоретичні засади та відповідні припущення для дослідження механічних процесів для проведення горизонтальних виробок тим чи іншим більш ефективним способом ущільнення ґрунтового масиву. Також вивести нестационарні рівняння руху ґрунту із врахуванням коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби, та сформулювати розрахункову схему для виведення розрахункових рівнянь рівноваги ґрунтового масиву.

Результати

Одним із найбільш розповсюджених способів механічного впливу на ґрунтовий масив є горизонтальне буріння, яке являє собою комплексний процес, який складається із декількох операцій. Цей процес включає розробку ґрунтового масиву різанням, транспортуванням розробленого ґрунту у робочий котлован та із нього на поверхню, перехід кріплення вздовж

проведення виробки і влаштування робочого і приймального котлованів. Усі ці операції технологічно взаємопов'язані і вимагають як роздільного так і сумісного розгляду.

Комплексні дослідження цих процесів висвітлено недостатньо, хоч окремі процеси розглянуто всесторонньо. Розробку масиву ґрунту різанням можна знайти у працях Л. Т. Дворнікова і В. С. Данченко (Дворников, & Данченко, 1980), Г. Є. Лаврова (Лавров, & Саттаров, 1973; Лавров, & Саттаров, 1978), а теорію розробки ґрунтів різанням землерийними машинами створено Ю. А. Ветровим (Ветров, 1971) і А. Н. Зелениним (Зеленин, 1968), процес взаємодії робочих органів дорожньо-будівельних машин в праці В. І. Баловнева (Баловнев, 1981).

Ці дослідження дають певне уявлення про залежність зусиль, діючих на робочі органи, від фізичних властивостей масиву, параметрів технологічного процесу і конструктивних особливостей робочих органів. Але використовувати результати цих досліджень для визначення зусиль, які впливають на роботу прохідних установок горизонтального буріння, не є можливим. Зокрема, Н. Є. Косенко і М. І. Гальперин дослідили процес різання скальних порід тонкими стружками (Лавров, & Саттаров, 1973), а Л. Т. Дворніков, В. С. Донченко і Б. І. Прокоф'єв виконали експериментальні дослідження, які встановлювали вплив швидкості на зусилля різання твердих і сипучих ґрунтів землерийними машинами.

У виконанні дослідження ставили мету – встановити оптимальні технологічні параметри роботи землерийних машин великої потужності, які зрізають стружки товщиною, що перевищує у декілька разів товщину ріжучої кромки робочого органу. Більш близькі до процесу, який аналізуємо, дослідження зусилля різання виконані Г. Є. Лавровим. Він встановив залежність зусилля, діючого на робочий орган УГБ. Характерною особливістю технологічного процесу виконання виробок цією установкою є збереження постійної товщини стружки незалежно від довжини виробки (проходки).

На базі основних припущень теорії М. М. Протодяконова дослідження тиску на кріплення виробок, виконаних способом горизонтального буріння, виконані зокрема, Д. І. Олександровим, М. В. Василевим в праці (Лавров, & Саттаров, 1973), В. М. Денисовим, Д. І. Коню-

шковим, Г. П. Кузнецовим, Є. С. Пригожиним, Д. Л. Павловим, Д. І. Шором та іншими. Зокрема Д. І. Олександров, М. В. Василів в праці (Лавров, & Саттаров, 1973), Х. А. Романович і Д. І. Шор досліджували зміну тиску за параметром крену кріплення круглого обрису близько до еліптичного з більшою вертикальною віссю. Розміри еліптичності залежали від фізичних властивостей ґрунтового масиву.

Частковий огляд досліджень і аналіз їх результатів дає змогу зробити висновок, що накопичено великий досвід у вивченні механічних процесів у ґрунтовому масиві при проникненні в нього твердого тіла з різними швидкостями, але реальний механічний процес, викликаний виконанням горизонтальних виробок способом проколу, ще недостатньо досліджений.

Розглянемо аналіз останніх досліджень механічних процесів ущільнення ґрунтового масиву. Питання проколу ґрунту детально досліджено у роботах (Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016; Супонев, & Олексин, 2010; Супонев, 2018a; Супонев, 2018b), а у таких працях, як (Васильєв & Лещенко, 1993; Супонев, 2018a; Кравець, Посмітюха, & Супонев, 2017a) запропоновано конструкції проколюючих наконечників, які в певних умовах забезпечують керування траєкторією руху. Однак слід зазначити, що більшість цих праць націлені на удосконалення сучасних машин для горизонтально спрямованого руху робочого обладнання в ґрунті.

Великі габарити машин, технологічні площі для розгортання робіт, високі ціни на навігаційну систему роблять їх використання ефективним тільки починаючи зі 100 м. У роботах (Супонев, 2018b; Балесный, 2017) наведено технічні рішення, які підтверджують можливість реалізації процесу корекції руху головки під час проколу ґрунту малогабаритною установкою за допомогою гідроциліндру з гвинтовою несамогальмованою парою та проколюючої головки з адаптованою формою наконечника.

Запропонована оригінальна конструкція гідроциліндру з несамогальмованою гвинтовою парою отримала ефективне використання при роботі гвинтових паль двобічної дії в конструкціях опорних контурів машин (Супонев, 2018). Це дає можливість різко знизити масу та енергонасиченість базової установки, а також відмовитися від окремого приводу для обертання ро-

бочого органу та спростити процес керування. Також гідроциліндр можна кріпити до рами установки та забезпечувати поступовий та поступово-обертальний рух робочого органу для включення механізму зміни форми його наконечника.

Дослідження безтраншейної прокладки труб методом проколу, стосовно будівельно-дорожніх машин для визначення їх техніко-економічних параметрів із дослідження процесів взаємодії робочих органів з середовищем, методи подібності та фізичного моделювання були розроблені проф. В. І. Баловневим (Баловнев, 1981). Їх успішно використовують як для виявлення факторів, так і для визначення раціональних параметрів технічних об'єктів, що здійснюють найбільший вплив на експлуатаційні параметри землерійно-транспортних машин (Хачатурян, 2013). У праці (Супонев, Олексин, & Хачатурян, 2016) розглянуто експериментальні дослідження зміни зони структурно-пружних деформацій ґрунту навколо горизонтальної свердловини, яку створено методом статичного проколу. Показано зміну пористості ґрунту при радіальному відхиленні від осі свердловини при її розширенні з 108 до 159 мм.

Результати дослідження визначення величини зони деформування ґрунту конусно циліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні подано у праці (Супонев, 2018a). Ґрунтові дослідження фізичного моделювання та багатофакторний експеримент проведено для визначення зусилля проколювання робочим органом активної дії в праці (Хачатурян, 2013), в результаті отримано критеріальне рівняння, що описує процес проколювання ґрунту робочим органом активної дії. В цій праці одержано рівняння регресії, а перевірку адекватності отриманого рівняння експериментальними даними виконано за допомогою критерію Фішера та оцінювання значущості коефіцієнта регресії – за критерієм Стюдента.

Отже, на основі наведеного вище аналізу науково-технічних джерел можна констатувати про необхідність та ефективність закритих способів прокладки підземних інженерних комунікацій незалежно чи методом проколу чи методом продавлювання чи щитовою проходкою. Нижче проаналізовано метод проколу діаметром до 600 мм. Та метод продавлювання до 2000 мм.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

а) метод проколу діаметром від 100 до 600 мм. Використання проколу ґрунту при безтраншейній прокладці труб, керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту і технології керування проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації, досліджувалось багатьма вченими. Зокрема, в праці (Гусев, & Чубаров, 2014) розглянуто одну із основних проблем – керування проколом за допомогою світлового променя або локації на основі радіосигналу. Наведено також наближений математичний опис передаточної функції та запропоновано структурну схему системи керування проколом ґрунту. Керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту під час горизонтального проколу ґрунту установками статичної дії, виникає необхідність керувати траєкторією руху робочого органу з конусним наконечником. Показано можливість керування траєкторією руху за допомогою робочого органу з адаптованим наконечником та визначено умови корекції траєкторії його руху. В праці (Супонев, 2018b) подано результати досліджень технології управління проколом ґрунту та вибором силового приводу установки для її реалізації. Технологія статичного проколу ґрунту пов'язана за допомогою установки з можливістю керування траєкторією руху робочого органу, що є важливою умовою ефективності прокладання інженерних комунікацій.

На основі аналізу науково-технічних джерел та досвіду виконання реальних робіт з прокладання підземних комунікацій методом проколу і аналізу технологічних (механічних) процесів ущільнення ґрунтового масиву методом проколу вивчено і обґрунтовано досить добре і їх доцільно застосовувати в таких межах:

- при діаметрі 50...500 мм і довжиною до 80 м у піщаних і глинистих ґрунтах без твердих включень;

- при застосуванні гідропроколу діаметром 100...200 мм і довжиною до 40 м у піщаних ґрунтах і 400...500 мм і довжиною до 20 м у супісках;

- при вібропроколюванні труби діаметром до 500 мм і довжиною до 60 м у незв'язних, піщаних, супісчаних ґрунтах;

- виконання вібропробойками проколу труби діаметром 90...108 мм і довжиною до 60 м,

менші ґрунти до III категорії при проколу з використанням пневмопробійників труби діаметром 300...400 мм, довжина 40...50 м в ґрунтах I-II категорії.

Спостереженнями встановлено, що стійка тенденція росту збільшення об'ємів міського і промислового будівництва, реконструкції міст і промислових підприємств та їх розвиток визначає потребу у спорудженні інженерних комунікацій різного призначення: водопроводів та водовідводів, теплових мереж, прокладання інженерних комунікацій під автомобільними та залізничними дорогами, річками і каналами де використання інших методів недоцільно. Безтраншейні методи мають свою область застосування, яка обмежується розмірами інженерних конструкцій, зокрема для методу проколу використовують труби діаметром до 600 мм, а для методу продавливання – від 600 до 2000 мм.

б) метод продавливання діаметром від 600 до 2000 мм. Незважаючи на багаточисельність комплексів для спорудження трубопроводів методом продавливання з механізованою розробкою ґрунту представлених на ринку (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008), найчастіше використовують метод розробки ґрунту вручну та просту конструкцію установки для продавливання через її низьку вартість. Тому, зважаючи на зазначене, найбільш перспективним у практиці міського і промислового підземного будівництва є метод статичного і динамічного продавливання, особливо при спорудженні колекторних тунелів діаметром 1220...1620 мм. Зупинимось на технології виконання горизонтальних виробок способом продавливання та аналізі науково-технічних джерел, які висвітлюють теоретичні і експериментальні дослідження безтраншейної прокладки інженерних комунікацій методом продавливання (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008; Гилета, Тищенко & Ванаг, 2017; Гилета, Ванаг & Тищенко, 2016; Олексин, 2012; Панин, Сарычев, Прохоров, & Савин, 2013).

Технологія виконання горизонтальних виробок способом продавливання, на відміну від способу проколу, передбачає виймання розробленого ґрунту у забої і його транспортування із виробки. Але так само як і у способі проколу, кріплення яке утримує контур виробки від обвалення, рухається в міру проведення виробки.

Ці особливості технології виконання виробок способом продавлювання обумовлюють діаметр виробки, достатній для розміщення, в ній людей з інструментами та механізмами, а також більш потужними силовими агрегатами для переміщення кріплення.

Способом продавлювання у нашій країні і за кордоном виконано багаточисельні переходи під дорогами і навіть деякі ділянки метрополітенів. Споруджено різної протяжності, розміру і форми каналізаційні колектори. У способі продавлювання удосконалюється як технологія пересування кріплення, так і розробка та прибирання ґрунту із виробки. Інтенсивне використання за кордоном, одержав спосіб продавлювання із закріпленням горизонтальних виробок залізобетонними і пластмасобетонними кільцями.

Із результатів теоретичних і експериментальних досліджень технології та механічних процесів у масиві ґрунту, викликаних продавлюванням, випливає, що цей спосіб зацікавив багатьох вчених як у нашій країні, так і за кордоном і знайшов широке застосування у різних видах підземного будівництва (Червов, 2003; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013; Лучко, 2013; Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020).

Зокрема, у праці (Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020) наведено комплекс результатів досліджень різних типів ґрунтів та розв'язано низка задач впливу різного типу навантаження на ґрунтовий масив на засадах механіки ґрунтів. Тут також описано теорію гранично напруженого стану ґрунтів і її застосування. Наведено розв'язок задачі про напружений стан ґрунтового масиву при проведенні горизонтальної виробки способом ущільнення, ґрунтового масиву.

Формування горизонтальних свердловин, які використовуються у безтраншейному прокладанні інженерних комунікацій, використовують комбінований метод (Олексин, 2012; Панин, Сарычев, Прохоров, & Савин, 2013), який використовує кращі особливості обох методів: статичного проколу та продавлювання.

У першому випадку мінімізується об'єм ґрунту шляхом його радіального ущільнення конусним наконечником, тим самим відпадає потреба у вилученні його із забою. Крім того, завдяки радіальному ущільненню ґрунту утворюються стійкі щільні стінки, що в подальшому полегшує прокладання (протягування) комунікацій. Але при цьому утворюється велика

зона деформованого ґрунту, яка може пошкодити прилеглі комунікації та споруди.

У другому – навколо продавлюючої труби не формується зона структурно-пружної деформації це пов'язано з тим, що майже увесь розроблений ґрунт за профілем свердловини потрапляє у порожнину труби, а не витісняється в сторони. Основною перевагою цього методу є відсутність руйнівного впливу на існуючі комунікації та споруди. Але даний метод має суттєвий недолік у тому, що кожні 2...3 метри виробку потрібно зупинити і видалити ґрунтовий kern, що не завжди можливо в обмежених міських умовах. Це вимагає застосування додаткових пристроїв типу та принцип роботи яких наведено у працях (Червов, 2003; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013).

в) аналіз механізмів проколу та продавлювання. Механічні способи ущільнення ґрунтового масиву знаходять найбільше застосування у будівництві завдячуючи незначному їх впливу на стійкість будівель і споруд які знаходяться поблизу, простоті технології і більшій ступені безпеки у порівнянні з іншими видами ущільнення. Спосіб механічного ущільнення отримав велике (широке) розповсюдження і у спеціальному виді робіт – проведення горизонтальних виробок, які використовують для прокладки у них підземних інженерних комунікацій. Цей спосіб виконується механічним пристосуванням, різними за конструктивною складністю та робочими органами, типи, вибір, область їх застосування, експериментальне дослідження яких детально описано у наукових працях (Червов, 2003; Бреннер, Головин, Пушкарев, Рогачев, & Сарычев, 2006; Кондратенко, 2013; Тищенко, 2013; Кравець, Кованько, & Лук'янчук, 2015; Кравець, Посмітюха & Супонев, 2017a; Кравець, Посмітюха & Супонев, 2017b; Супонев, 2018).

Простіші механічні способи засновані на використанні будівельних машин і механізмів у якості силових агрегатів, які вдавлюють металеві труби в ґрунтовий масив. Більш складні прохідницькі пристрої працюють на енергії стиснутого повітря, високочастотної вібрації або з використанням напірної гідравлічної системи (Кантович, Ружицкий, Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С., 2008).

Будь-які способи проведення виробки ущільненням засновані на стисканні ґрунтового

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

масиву як головної його властивості, яка зв'язана з іншими фізико-механічними властивостями ґрунтів і технологічними параметрами процесу проведення виробок способом ущільнення.

Найбільш простий і достовірний спосіб встановлення взаємозв'язку між окремими властивостями і їх сукупністю – це експериментальний, який отримав велике розповсюдження у будівництві при вивченні властивостей ґрунтів. Але деякі властивості ґрунтів аналітично виражені одні через інші, що також полегшує аналіз механічних процесів у масиві при проведенні виробок.

Для розрахунку деформацій, оцінки міцності та стійкості ґрунтових масивів, які відбуваються при механічних процесах під час виконання горизонтальних виробок методом проколу, продавлювання (протискування), горизонтальним бурінням чи щитовою проходкою, необхідно знати характеристики механічних властивостей ґрунтів. Під механічними властивостями ґрунту потрібно розуміти ті властивості, що визначають його поведінку як механічної системи, тобто зумовлюють механічні переміщення ґрунтового масиву й окремих його частин у просторі та часі під дією тих чи інших зовнішніх чинників. До показників цих властивостей належать ті, які безпосередньо визначають величину деформації та міцності ґрунтів. Окремо їх будемо називати характеристиками деформативності (стисливості) й міцності. Зокрема, стисливість – найхарактерніша властивість, що відрізняє ґрунти від твердих тіл. Вона зумовлена трьома чинниками – ущільненням, пружністю та зміною фізичного стану.

Під міцністю ґрунтів, розуміють їх властивість у певних умовах сприймати вплив зовнішніх зусиль без повного руйнування, яка визначається межею їх міцності. Зокрема, механічні властивості ґрунтів залежать від їх мінерального та гранулометричного складу, щільності, вологості, температури, умов формування та інше. Нижче зупинимось тільки на тих властивостях, які необхідно знати при розробці підземних свердловин для прокладки інженерних комунікацій, водопропускних труб тощо.

Ґрунт складається із окремих частинок твердого тіла, що утворюють скелет ґрунту і порожнини різного розміру (Лучко, Ковальчук, &

Кравець, 2020). Порожнини скелета ґрунту заповнені водою або повітрям, або і тим, і тим. У зв'язку з цим, при вивченні ґрунту, перш за все визначаємо, яку частину об'єму займають тверді частинки, а яку порожнини. Введемо поняття порожнистості ґрунту, як відношення об'єму порожнин до повного об'єму. Для визначення порожнистості або іншого параметру ґрунту, потрібно знати інші властивості цього ґрунту (Лучко, 2013; Лучко, Ковальчук & Кравець, 2020).

Наукова новизна та практична значимість

В даній статті, на основі аналізу науково-технічних джерел силового впливу на суцільний ґрунтовий масив, вдалось узагальнити результати досліджень впливу механічних і технологічних процесів на ґрунтовий масив. Зокрема, дослідити механічні процеси ущільнення ґрунтового масиву при виконанні виробки методом статичного проколу і методом продавлювання та встановити їх ефективність при прокладці підземних інженерних комунікацій закритим способом. Також, вперше досліджено вплив основних динамічних властивостей ґрунтів на процеси, які проходять у ґрунтовому масиві при дії силового навантаження використовуючи той чи інший метод підземної виробки.

Висновки

1. Виконано аналіз досліджень впливу технологічних процесів на суцільний масив. Зокрема, описано механічні та технологічні процеси ущільнення ґрунтового масиву методом статичного проколу та методом продавлювання та сформульовано і наведено основні динамічні властивості ґрунтів.

2. Сформульовано основні теоретичні засади для дослідження механічних процесів при виконанні горизонтальної виробки способом ущільнення ґрунтового масиву.

3. Надалі в процесі досліджень потрібно уточнити основні теоретичні засади механічних (технологічних) процесів при проведенні горизонтальних виробок способом ущільнення ґрунтового масиву. Сформулювати основні припущення та побудувати загальну схему дослідження напружено-деформованого стану в стискаючому суцільному ізотропному масиві під дією рівномірно розподіленого навантаження по контуру виробки. Розв'язати задачу нестационарного рівняння руху ґрунту із врахуванням

коефіцієнта тертя до зовнішньої поверхні труби. Скласти умови граничної рівноваги Треска-Сен-Венана і умови співпадіння максимальних швидкостей зсуву з напрямком ліній ковзання. Змодельовати динаміку руху ґрунту у циліндричній трубі в умовах плоскої осесиметричної деформації та отримати основні критерії, які повинні виконуватись при певних умовах і властивостях ґрунтів. Дослідити експериментально і визначити коефіцієнт тертя. Дослідити рівняння нестационарного руху суцільного стиснутого середовища з врахуванням сил тертя і сил тяжіння в циліндричних координатах. Визначення зони плинності ґрунту при прокладці труб різного діаметру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Балесный, С. П. (2017). Особенности процессов статического прокола ґрунта. *Вестник Харьковско-го национального автомобильно-дорожного университета*, 76, 138-141.
- Баловнев, В. И. (1981). *Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин*. Москва: Высшая школа.
- Бреннер, В. А., Головин, К. А., Пушкарев, А. Е., Рогачев, А. А., & Сарычев, В. И. (2006). Экспериментальные исследования взаимодействия исполнительного органа прокалывающей установки с ґрунтовым массивом. *Известия ТулГУ. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*, (8), 158-160.
- Васильев, Н. В. (1964). *Закрытая прокладка трубопроводов*. Москва: Недра.
- Васильев, С. Г. & Лещенко, А. В. (1993). *Технологические процессы проведения горизонтальных выработок*. Львов: Свит.
- Ветров, Ю. А. (1971). *Резание ґрунтов землеройными машинами*. Москва: Машиностроение.
- Гилета, В. П., Ванаг, Ю. В., & Тищенко, И. В. (2016). Повышение эффективности проходки скважин методом виброударного продавливания. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 6, 82-88.
- Гилета, В. П., Тищенко, И. В., & Ванаг, Ю. В. (2017). Повышение эффективности циклической проходки скважин в ґрунте. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*, 3 (55), 21-31.
- Гусев, И. В., & Чубаров, Ф. Л. (2014). Применение управляемого прокола ґрунта при бестраншейной прокладке труб. *Потенциал современной науки*, 2, 30-34.
- Данилов, Б. Б. (2012). Экспериментальное обоснование процесса транспортирования разрушенного ґрунта при горизонтальном бурении скважин. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 3, 82-90.
- Дворников, Л. Т. & Данченко, В. С. (1980). Основные закономерности разрушения горных пород при вращательном бурении скважин малого диаметра машинами ограниченной мощности. *Механика разрушения горных пород: Мат. 6-й Всесоюз. конф, механики горных пород, Фрунзе*, 26-31.
- Зеленин, А. Н. (1968). *Основы разрушения ґрунтов механическими способами*. Москва: Машиностроение.
- Кантович, Л. И., Ружицкий, В. П., Григорьев, С. М., & Григорьев, А. С. (2008). Результаты исследования продавливающих установок для бестраншейной технологии строительства подземных инженерных коммуникаций. *Горное оборудование и электромеханика*, 2, 2-7.
- Кондратенко, А. С. (2013). Удаление ґрунтового керна из трубы с помощью комбинированного воздействия на систему «труба с керном в ґрунте». *Механизация строительства*, (4), 3-5.
- Кравець, С. В., Кованько, В. В., & Лук'янчук, О. П. (2015). *Наукові основи створення землеройно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв*. Рівне: НУВГП.
- Кравець, С. В., Каслин, Н. Д., Руднев, В. К., & Супонев, В. Н. (2008). *Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций*. Харьков: ООО «Фавор».
- Кравець, С. В., Посмітюха, О. П., & Супонев, В. М. (2017а). Визначення еквівалентного та оптимального діаметрів конічно-циліндричного наконечника з виступами для прокалювання ґрунту. *Наука та прогрес транспорту*, 4, 89-97.
- Кравець, С. В., Посмітюха, О. П., & Супонев, В. Н. (2017б). Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование*, (97), 91-98.
- Лавров, Г. Е. & Саттаров, Т. Х. (1973). Исследование конструктивных и рабочих параметров шнековых установок горизонтального бурения. *Механизация строительства магистральных трубопроводов*, 27.
- Лавров, Г. Е. & Саттаров, Т. Х. (1978). *Механизация строительства, переходов магистральных трубопроводов под автомобильными и железными дорогами*. Москва: ВНИИСТ Главгаза СССР.
- Лучко, Й. Й. (2013). *Ґрунтознавство, механіка ґрунтів та основи і фундаменти*. Львів: Каменяр.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- Лучко, Й. Й., Ковальчук, В. В. & Кравець, І. Б. (2020). *Мости і труби з гофрованих металевих конструкцій та моніторинг ґрунтових основ доріг і споруд*. Львів: Світ.
- Олексин, В. И. (2012). Комбинированный метод разработки горизонтальной скважины при бестраншейной прокладке коммуникаций. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 57, 207-213.
- Панин, А. Н., Сарычев, В. И., Прохоров, Н. И., & Савин, И. И. (2013). Обоснование параметров совмещенной схемы прокладки труб бестраншейной технологии. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 12(2), 298-306.
- Рыбаков, А. П. (2006). *Основы бестраншейных технологий (теория и практика)*. Москва: Стройиздат.
- Супонев, В. М. (2018а). Визначення величини зони деформування ґрунту конусоциліндричним наконечником і тиску на бічній поверхні. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 83, 22-28.
- Супонев, В. М. (2018б). Технологія управління проколом ґрунту та вибір силового приводу установки для її реалізації. *Наукові вісті Дніпровського університету*, 15.
- Супонев, В. Н. & Олексин, В. И. (2010). Обоснование параметров установок для бестраншейной прокладки распределительных сетей инженерных коммуникаций методом гидростатического прокола. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 5 (75), 66-74.
- Супонев, В. Н., Олексин, В. И., & Хачатурян, С. Л. (2016). Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины при ее разработке методом статического прокола. *Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, 73, 202-205.
- Тищенко, И. В. (2013). Виброударное продавливание и комбинированный способ очистки труб от ґрунтового керна. *Строительные и дорожные машины*, 11, 39-42.
- Хачатурян, С. Л. (2013). Фізичне моделювання та багатофакторний експеримент для визначення зусилля проколювання робочим органом активної дії. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*, 1(1), 237-242.
- Червов, В. В. (2003). Новый способ очистки труб от ґрунтового керна при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций. *Механизация строительства*, 1.

И. И. ЛУЧКО^{1*}, Т. И. БУБНЯК², И. Б. КРАВЕЦЬ³

^{1*} Кафедра строительных конструкций, Львовский национальный аграрный университет, ул. В. Великого, 1, г. Дубляны, Украина, 80381, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Кафедра высшей математики, Львовский национальный аграрный университет, ул. В. Великого, 1, г. Дубляны, Украина, 80381, тел. +38 (067) 990 06 67, эл. почта tbubnyak@gmail.com, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Кафедра мостов и тоннелей, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 479 00 50, эл. почта kravetsivan2017@gmail.com, ORCID 0000-0002-2239-849X

МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГРУНТОВОМ МАССИВЕ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТКАХ (ОБЗОР)

Цель. Целью работы является обзор и анализ существующих научно-технических источников, посвященных методам и способам горизонтальных выработок, и технологическим процессам, которые проходят в ґрунтовом массиве при прокладке инженерных коммуникаций на основе опыта ведущих организаций. Исследовать эффективность применения того или иного способа бестраншейной прокладки труб и инженерных коммуникаций в современных условиях строительства. **Методика.** На основе анализа современных методов и способов силового воздействия на ґрунтовый массив и механических и технологических процессов, которые происходят в ґрунтовом массиве при горизонтальных выработках методом статического прокола и методом продавливания. Сформулировать общие сведения о процессах в ґрунтовом массиве и влияние основных динамических свойств почв на указанные процессы. На основе известных и существующих данных для дальнейших исследований мы сформулируем основные теоретические основы и соответствующие предположения для исследования механических процессов при проведении горизонтальных выработок тем или иным более эффективным способом уплотнения ґрунтового массива. Вывести нестационарные уравнения движения ґрунта с учетом коэффициента трения к наружной поверхности трубы, и сформулировать расчетную схему для вывода расчетных уравнений равновесия ґрунтового массива. **Результаты.** Вы-

полнен анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников по бестраншейным способам прокладки инженерных коммуникаций. В частности, во введении описаны общие сведения и актуальность и постановка проблемы исследования механических процессов в грунтовом массиве при горизонтальных выработках. Сформулированы цель и методику исследований. Рассмотрены основные данные литературных источников, которые позволили проанализировать основные методы и способы прокладки инженерных коммуникаций и оценить эффективность применения того или иного способа в конкретной ситуации и условиях. Основательно проанализированы возможности эффективного применения метода статического прокола метода продавливания в зависимости от диаметра выработки. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить в будущем и установить критерии их использования для исследования механических процессов при проведении горизонтальных выработок способом уплотнения грунтового массива. **Научная новизна.** В данной статье на основе анализа научно-технических источников силового воздействия на сплошной грунтовый массив, удалось обобщить результаты исследований влияния механических и технологических процессов на грунтовый массив. В частности, исследовать механические процессы уплотнения грунтового массива при выполнении выработки методом статического прокола и методом продавливания и установить их эффективность при прокладке подземных инженерных коммуникаций закрытым способом. Также, впервые исследовано влияние основных динамических свойств почв на процессы, проходящие в грунтовом массиве, при действии силовой нагрузки используя тот или иной метод подземной выработки. **Практическая значимость.** На основании анализа научно-технических источников силового воздействия на грунтовый массив получены данные о возможности эффективно применять закрытые (бестраншейные) способы прокладки водопропускных труб, канализации, тепловых трасс, подземных переходов под железнодорожными и автомобильными дорогами и других инженерных коммуникаций, это особенно актуально для мегаполисов, но не всесторонне изучен это направление и некоторые аспекты нужно исследовать и уточнять для дальнейшего практического применения.

Ключевые слова: продавливание; прокол грунта; грунтовый массив; проходка; выработка

J. J. LUCHKO^{1*}, T. I. BUBNYAK², I. B. KRAVETS³

^{1*} Department of Building Constructions, Lviv National Agrarian University, V. Velykoho Street, 1, Dubliany, Ukraine, 80381, ORCID 0000-0002-3675-0503

² Department of Higher Mathematics, Lviv National Agrarian University, V. Velykoho Street, 1, Dubliany, Ukraine, 80381, ORCID 0000-0002-2814-8571

³ Department of Bridges and tunnels, Dnipro national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, ORCID 0000-0002-2239-849X

MECHANICAL PROCESSES IN THE SOIL MASS FOR HORIZONTAL DEVELOPMENTS (REVIEW)

Purpose. The aim of the work is to review and analyze the existing scientific and technical sources, which are devoted to the methods and techniques of horizontal workings and technological processes that take place in the soil during the laying of utilities based on the experience of leading organizations. Investigate the effectiveness of a particular method of trenchless pipe laying and engineering communications in modern construction conditions. **Methodology.** Based on the analysis of modern methods and technics of force influence on the soil mass and mechanical and technological processes occurring in the soil mass at horizontal workings by static puncture and pushing method. Formulate general information about the processes in the soil mass and the influence of the main dynamic properties of soils on these processes. On the basis of known and existing data for further research, we will formulate the basic theoretical principles and appropriate assumptions for the study of mechanical processes in the conduct of horizontal workings in one or another more effective way of compacting the soil mass. Also, derive non-stationary equations of soil motion taking into account the coefficient of friction to the outer surface of the pipe, and formulate a design scheme for the output of the calculated equations of equilibrium of the soil mass. **Findings.** The analysis of domestic and foreign scientific and technical sources on trenchless methods of laying utilities is performed. In particular, the introduction describes the general information and the relevance and formulation of the problem of studying mechanical processes in the soil mass at horizontal workings. The purpose and methods of research are formulated. The basic data of literature sources are considered, which made it possible to analyze the main methods and technics of laying engineering communications and the ability to assess the effectiveness of a particular method in a specific situation and conditions. The possibilities of effective application of the static puncture method of the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

punching method depending on the working diameter are thoroughly analyzed. The main tasks that need to be solved in the future and set the criteria for their use for the study of mechanical processes during horizontal workings by compacting the soil mass are formulated. **Scientific originality.** In this article, based on the analysis of scientific and technical sources of force influence on a solid soil, we managed to generalize the results of studies of the impact of mechanical and technological processes on the soil. In particular, to investigate the mechanical processes of soil compaction during excavation by static puncture and punching and to establish their effectiveness in the laying of underground utilities in a closed way. Also, for the first time the influence of the main dynamic properties of soils on the processes that take place in the soil mass, under the action of power load using a particular method of underground mining was investigated. **Practical value.** Based on the analysis of scientific and technical sources of force impact on the soil, data obtained about the possibility of effectively using closed (trenchless) methods of laying underground pipes, sewers, heating mains, underpasses under the railways and highways and other utilities, this is especially true for cities, but this area has not been thoroughly studied and some aspects need to be investigated and clarified for further practical application.

Keywords: pushing; soil puncture; soil mass; drilling; excavation

REFERENCES

- Balesnyj, S. P. (2017). Osobennosti processov staticheskogo prokola grunta. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 76, 138-141. (in Russian)
- Balovnev, V. I. (1981). *Modelirovanie processov vzaimodejstvija so sredoj rabocnih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin*. Moskva: Vysshaja shkola. (in Russian)
- Brenner, V. A., Golovin, K. A., Pushkarev, A. E., Rogachev, A. A., & Sarychev, V. I. (2006). Jeksperimental'nye issledovanija vzaimodejstvija ispolnitel'nogo organa prokalyvajushhej ustanovki s gruntovym massivom. *Izvestija TulGU. Ser. Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, (8), 158-160. (in Russian)
- Vasil'ev, N. V. (1964). *Zakrytaja prokladka truboprovodov*. Moskva: Nedra. (in Russian)
- Vasil'ev, S. G. & Leshhenko, A. V. (1993). *Tehnologicheskie processy provedenija gorizonta'lnyh vyrabotok*. L'vov: Svit. (in Russian)
- Vetrov, Ju. A. (1971). *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami*. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
- Gileta, V. P., Vanag, Ju. V., & Tishhenko, I. V. (2016). Povyszenie jeffektivnosti prohodki skvazhin metodom vibroudarnogo prodavlivanija. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 6, 82-88. (in Russian)
- Gileta, V. P., Tishhenko, I. V., & Vanag, Ju. V. (2017). Povyszenie jeffektivnosti ciklicheskoj prohodki skvazhin v grunte. *Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii*, 3 (55), 21-31. (in Russian)
- Gusev, I. V., & Chubarov, F. L. (2014). Primenenie upravljaemogo prokola grunta pri bestranshejnoj prokladke trub. *Potencial sovremennoj nauki*, 2, 30-34. (in Russian)
- Danilov, B. B. (2012). Jeksperimental'noe obosnovanie processa transportirovanija razrushennogo grunta pri gorizonta'lnom burenii skvazhin. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznych iskopaemyh*, 3, 82-90. (in Russian)
- Dvornikov, L. T. & Danchenko, V. S. (1980). Osnovnye zakonomernosti razrushenija gornyh porod pri vrshatel'nom burenii skvazhin malogo diametra mashinami ogranichennoj moshhnosti. *Mehanika razrushenija gornyh porod: Mat. 6-j Vsesojuz. konf. mehaniki gornyh porod, Frunze*, 26-31. (in Russian)
- Zelenin, A. N. (1968). *Osnovy razrushenija gruntov mehanicheskimi sposobami*. Moskva: Mashinostroenie. (in Russian)
- Kantovich, L. I., Ruzhickij, V. P., Grigor'ev, S. M., & Grigor'ev, A. S. (2008). Rezul'taty issledovanija prodavlivajushhijh ustanovok dlja bestranshejnoj tehnologii stroitel'stva podzemnyh inženernyh kommunikacij. *Gornoe oborudovanie i jelektromehanika*, 2, 2-7. (in Russian)
- Kondratenko, A. S. (2013). Udalenie gruntovogo kerna iz truby s pomoshh'ju kombinirovannogo vozdejstvija na sistemu «truba s kernom v grunte». *Mehanizacija stroitel'stva*, (4), 3-5. (in Russian)
- Kravec, S. V., Kovanjko, V. V., & Luk'jančuk, O. P. (2015). *Naukovi osnovy stvorennja zemlerijno-jarusnykh mashyn i pidzemnorukhomykh prystrojiv*. Rivne: NUVGhP. (in Ukrainian)
- Kravec, S. V., Kaslin, N. D., Rudnev, V. K., & Suponev, V. N. (2008). *Mashiny dlja bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij*. Har'kov: OOO «Favor». (in Russian)
- Kravec, S. V., Posmitjukha, O. P., & Suponjev, V. M. (2017a). Vyznachennja ekvivalentnogho ta optymal'nogho diametriv konično-cylindrychnogho nakonečnyka z vystupamy dlja prokoljuvannja gruntu. *Nauka ta prohres transportu*, 4, 89-97. (in Ukrainian)
- Kravec, S. V., Posmitjukha, O. P., & Suponjev, V. N. (2017b). Analityčnyj sposib vyznachennja oporu zanurennja konusnogho nakonečnyka v grunt. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Serija: Podjomno-*

- transportnye, stroitel'nye i dorozhnye mashiny i oborudovanie*, (97), 91-98. (in Ukrainian)
- Lavrov, G. E. & Sattarov, T. X. (1973). Issledovanie konstruktivnyh i rabochih parametrov shnekovyh ustanovok gorizontalnogo burenija. *Mehanizacija stroitel'stva magistral'nyh truboprovodov*, 27. (in Russian)
- Lavrov, G. E. & Sattarov, T. X. (1978). *Mehanizacija stroitel'stva, perehodov magistral'nyh truboprovodov pod avtomobil'nymi i zheleznyimi dorogami*. Moskva: VNIIST Glavgaza SSSR. (in Russian)
- Luchko, J. J. (2013). *Gruntoznavstvo, mekhanika gruntiv ta osnovy i fundamenti*. Ljviv: Kamenjar. (in Ukrainian)
- Luchko, J. J., Kovaljchuk, V. V. & Kravecj, I. B. (2020). *Mosty i truby z ghofrovanykh metalevykh konstrukcij ta monitoryngih gruntovykh osnov dorigh i sporud*. Ljviv: Svit. (in Ukrainian)
- Oleksin, V. I. (2012). Kombinirovannyj metod razrabotki gorizontal'noj skvazhiny pri bestranshejnoy prokladke kommunikacij. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 57, 207-213. (in Russian)
- Panin, A. N., Sarychev, V. I., Prohorov, N. I., & Savin, I. I. (2013). Obosnovanie parametrov sovmeshhennoj shemy prokladki trub bestranshejnoy tehnologii. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 12(2), 298-306. (in Russian)
- Rybakov, A. P. (2006). *Osnovy bestranshejnyh tehnologij (teorija i praktika)*. Moskva: Strojizdat. (in Russian)
- Suponjev, V. M. (2018a). Vyznachennja velychyny zony deformuvannja gruntu konusnocylyndrychnym nakonechnykom i tysku na bichnij poverkhni. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 83, 22-28. (in Ukrainian)
- Suponjev, V. M. (2018b). Tekhnologhija upravlinnja prokolom gruntu ta vybir sylovogho pryvodu ustanovky dlja jiji realizaciji. *Naukovi visti Dalivsjkogho universytetu*, 15. (in Ukrainian)
- Suponev, V. N. & Oleksin, V. I. (2010). Obosnovanie parametrov ustanovok dlja bestranshejnoy prokladki raspredelitel'nyh setej inzhenernyh kommunikacij metodom gidrostatcheskogo prokola. *Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit*, 5 (75), 66-74. (in Russian)
- Suponev, V. N., Oleksin, V. I., & Hachaturjan, S. L. (2016). Issledovanie processa izmenenija sostojanija gruntu vokrug gorizontal'noj skvazhiny pri ee razrabotke metodom staticheskogo prokola. *Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*, 73, 202-205. (in Russian)
- Tishhenko, I. V. (2013). Vibroudarnoe prodavlivanie i kombinirovannyj sposob ochistki trub ot gruntovogo kerna. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 11, 39-42. (in Russian)
- Khachaturjan, S. L. (2013). Fizychno modeljuvannja ta baghatofaktornyj eksperyment dlja vyznachennja zusyllja prokoljuvannja robochym orghanom aktyvnoji diji. *Zbirnyk naukovykh pracj [Poltavsjkogho nacional'nogho tekhnichnogho universytetu im. Ju. Kondratjuka]. Serija: Ghaluzeve mashynobuduvannja, budivnyctvo*, 1(1), 237-242. (in Ukrainian)
- Chervov, V. V. (2003). Novyj sposob ochistki trub ot gruntovogo kerna pri bestranshejnoy prokladke podzemnyh kommunikacij. *Mehanizacija stroitel'stva*, 1. (in Russian)

Надійшла до редколегії 24.04.2020.

Прийнята до друку 21.05.2020.