

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: Дослідження впливу часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом  
за освітньою програмою «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання»  
зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування

Виконав: студент групи: ПМ2326

  
\_\_\_\_\_ (підпис)


/ Валентин АНТОНОВ /

Керівник:

  
\_\_\_\_\_ (підпис)

/ Олександр ПОСМІТЮХА /

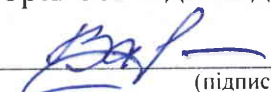
Нормоконтролер:

  
\_\_\_\_\_ (підпис)

/ Олександр ПОСМІТЮХА /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

  
\_\_\_\_\_ (підпис)

Дніпро – 2025

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Transport Engineering

Department of Applied Mechanics and Materials Science

**Explanatory Note  
to Master's Thesis**

on the topic:

**Study of the effect of partial excavation of soil from a technological cavity on the force of static expansion of a conical working body**

according to educational curriculum «Lifting and transport, road, construction, reclamation machines and equipment»

in the Speciality: 133 Industrial Engineering

Done by the student of the group: ПІМ2326 / Valentin ANTONOV /

Scientific Supervisor:  / Oleksandr POSMITIUKHA /

Normative controller:  / Oleksandr POSMITIUKHA /

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

Факультет: Транспортна інженерія  
Кафедра: Прикладна механіка та матеріалознавство  
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)  
Освітня програма: Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання  
Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ (підпис) **Сергій РАКША**

Дата \_\_\_\_\_

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу \_\_\_\_\_ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

студенту Валентину Геннадійовичу Антонову

1. Тема роботи: Дослідження впливу часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом

Керівник роботи: Посмітюха Олександр Петрович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від \_\_\_\_\_ "27" 10 2023 р. № 1043ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Характеристики ґрунтів, технічна характеристика буршнекової установки, машини керованого статичного проколювання ґрунту

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Будівництво підземних комунікацій в умовах міста.

4.2 Горизонтально спрямоване буріння ГСБ.

4.3 Процес статичного проколювання та розширення отворів конусними робочими органами.

4.4 Вплив глибини прокладання отворів при розширенні на поверхню.

4.5 вплив часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом.

5. Перелік демонстраційного матеріалу:

Загальний вигляд та технічна характеристика установки горизонтально-шнекового буріння, установки статичного проколювання, аналіз впливу глибини прокладання порожнини на її розмір, аналіз впливу розміру внутрішнього отвору на силу статичного проколювання ґрунту.

Висновки.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Охорона праці			

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прийняв
1	Будівництво підземних комунікацій в умовах міста. Горизонтально спрямоване буріння	06.03.2024	
2	Горизонтально-шнекове буріння. Динамічне проколювання пневмопробійниками	24.06.2024	
3	Процес статичного проколювання та розширення отворів конусними робочими органами	20.11.2024	
4	Вплив часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом	20.12.2024	
5	Підготовка презентації роботи	10.10.2024	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	20.12.2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Експертної комісії	22.01.2025	

Студент

  
(підпис)

Валентин АНТОНОВ

Керівник роботи

  
(підпис)

Олександр ПОСМІТЮХ

## РЕФЕРАТ

Кількість томів: 1

В записці всього 66 сторінки

Найменування роботи: «Дослідження впливу часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом».

Ілюстрації: схем \_\_\_\_\_; рисунків 28 \_\_\_\_\_;

графіків 4 \_\_\_\_\_; фотографій \_\_\_\_\_;

таблиць 9 \_\_\_\_\_.

Ключові слова: Статичний прокол, конусний робочий орган, технологічна порожнина, горизонтально шнекове буріння, ґрунт, установка, безтраншейні технології.

Текст реферату:

У роботі розглянути питання спорудження технологічних порожнин у ґрунті для прокладання підземних комунікацій в обмежених умовах міської забудови при переході автомобільних доріг, трамвайних колій залізниць тощо. Розглянуто найбільш простий та швидкий спосіб статичного проколювання з послідовним розширенням порожнини конусними робочими органами.

Окремо розглянути варіанти можливого розширення порожнин з використанням часткової ескалації ґрунту як методу зниження напруження у ґрунтовому масиві та зменшення впливу на сусідню комунікації та дорожнє полотно. Описано варіанти використання комбінованого способу отримання горизонтальних порожнин керованим статичним проколюванням з наступним частковим розширенням отвору конусом екскавацією переущільненого шару ґрунту в стінках порожнини горизонтальну шнековим бурінням і остаточним розширенням та затягуванням комунікації. Отримання результати дають можливість стверджувати суттєве зменшення робочих зусиль та впливу на навколишню комунікацію. даний спосіб був випробуваний в реальних умовах будівництва у 2024 році

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
<b>1. БУДІВНИЦТВО ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ МІСТА .....</b>	<b>8</b>
1.1. Вибір методу створення порожнин для комунікацій залежить від їхніх розмірів .....	10
1.2. Горизонтально спрямоване буріння .....	13
1.3. Статичне проколювання .....	15
1.4. Горизонтально-шнекове буріння.....	19
1.5. Динамічне проколювання пневмопробійниками.....	21
<b>2. ПРОЦЕС СТАТИЧНОГО ПРОКОЛЮВАННЯ ТА РОЗШИРЕННЯ ОТВОРІВ КОНУСНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ.</b>	<b>25</b>
2.1. Вплив робочих органів на ґрунт. ....	25
2.2. Сила статичного проколювання отворів .....	28
2.3. Сила ступінчатого розширення отворів.....	33
2.4. Вплив глибини прокладання отворів при розширенні на поверхню .....	37
2.5. Горизонтально-шнекове буріння як метод зменшення напружень у ґрунті при статичному проколі .....	42
<b>3. ВПЛИВ ЧАСТКОВОЇ ЕКСКАВАЦІЇ ҐРУНТУ З ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОРОЖНИНИ НА СИЛУ СТАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ КОНУСНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ.....</b>	<b>48</b>
3.1. Розширення горизонтальних порожнин .....	48
3.2. Розширення горизонтальних порожнин з частковою екскавацією ґрунту шнеком.....	54
<b>ВИСНОВОК .....</b>	<b>61</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....</b>	<b>62</b>

					ДІПТ. 630000. 301. МРПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Антонов В.				Дослідження впливу часткової екскавації ґрунту з технологічної порожнини на силу статичного розширення конусним робочим органом	Літ.	Лист	Листів
Перевірив.	Посмітюха О.						6	64
Н. контр.	Посмітюха О.				УДУНТ, гр ПМ2326			
Затвердив	Ракша С.							

## ВСТУП

На сьогоднішній день активно виконуються роботи по модернізації та ремонту підземних комунікацій міста. Найбільш критичними є електричні мережі, що піддаються постійним впливам. В умовах війни електричні мережі мають бути посаджені якомога глибше під землю щоб знизити ймовірність враження в результаті обстрілу, за рахунок чого підвищити стійкість мережі до зовнішніх впливів. З іншої сторони, не дивлячись на бойові дії, міста розвиваються, змінюють та удосконалюють свої електричні мережі, що пов'язано з інтенсивним будівництвом та реконструкцією об'єктів житлового комплексу та комунального господарства.

Будівництво та ремонт обов'язково пов'язані зі значними обсягами земляних робіт в межах вільних територій. Сучасний розвиток технологій дає можливість знизити вплив на навколишнє середовище, людей і автомобільний транспорт за рахунок використання безтраншейних технологій, при переході вулиць, автомобільних доріг, залізниць, трамвайних колій, водних перепон. В нашому місті широко використовується без траншейні технології багатьма фірмами. У співпраці з фірмою ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ» було випробувано спосіб поєднання статичного керованого проколювання з подальшим розширенням отвору конусними робочими органами та горизонтально шнековим бурінням ГШБ, що проведено на певному етапі, та дозволило викопати частину ґрунту з майбутнього отвору. Таке поєднання робочих процесів дозволяє знизити глибину залягання технологічних порожнин розміром більше 300 мм та мінімізує ризик руйнування покриття. Наявність відповідного обладнання дає можливість фірмі комбінувати різні способи виконання безтраншейних робіт та бути конкурентоспроможною на ринку послуг по монтажу кабельних ліній.

Аналіз наукових видань та патентів виявив запропонований колегами з Харківського національного автомобільно-дорожнього університету способу розширення отворів конусними робочими органами з подальшим вирізанням

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кільцевими ножами частини ущільненого ґрунту та транспортування його з порожнини поршнем здається нам не зовсім ефективним на відстанях більше 10 м оскільки ґрунт зіб'ється до купи, створить, перед поршнем, ядро ущільнення і в певній мірі буде даліше ущільнювати стінки отвору, що не відповідає поставленій задачі.

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1. БУДІВНИЦТВО ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ В УМОВАХ МІСТА

У наш час активної агломерації, появи мегаполісів та розвитку їх інфраструктури питання проведення нових та реконструкції зношених підземних комунікацій є першочерговим для вирішення жителів міст та селищ. Ще донедавна на вулицях можна було зустріти перекопані автомагістралі з ремонтними бригадами та важкою землерийною технікою, що міняли водогони (особливо в зимній період), прокладали нові комунікації тощо. Все це завдало незручностей оточуючим, створювало затори на дорогах, шкодило екології та здоров'ю людей через згубний вплив вихлопних газів, запилення, шум та вібрацію. Саме тому як перспективний і безальтернативний спосіб реконструкції та будівництва підземних комунікацій почала впроваджено безтраншейні технології.

Окремо слід відмітити проблеми з обмеженим простором, при виконанні робіт по прокладанню комунікацій, як безтраншейними так і традиційними методами. Щільність забудови, автомобільні дороги, тротуари і паркові зони не дують можливості використати високопродуктивні потужні бурові машини, що заставляє інженерів створювати малогабаритні бурові установки, а також шукати інші методи вирішення цих питань [5].

Інша проблема яка гостро стоїть перед планувальниками та виконавцями робіт це перенасичення підземного простору комунікаціями й обмеження по глибині прокладання деяких типів комунікацій, що обмежує глибину або траєкторію прокладання комунікації. Невелика глибина суттєво зменшує розміри порожнин які можна отримати статичним проколюванням (далі СП) або горизонтально спрямованим бурінням (далі ГСБ).

Існує багато способів, які можна реалізувати малогабаритними установками, що мають свої напрями ефективного використання та потребують пов-

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нішого аналізу. За характером дії на ґрунт існуючі безтраншейні методи формування порожнин можна поділити на три: з радіальним втрамбовуванням ґрунту у стінки порожнини, з екскавацією ґрунту зі свердловини та шляхом комбінації перших двох способів [1-5]. Розглянемо особливості кожної групи окремо. Формування порожнини шляхом радіального втрамбовування ґрунту виникає при осьовому просуванні РО з конусним наконечником (рис. 1.1). При цьому зусилля витрачається як на втрамбовування об'єму, що витісняється, так і на подолання опору тертя ґрунту по робочій та бічній поверхнях РО.

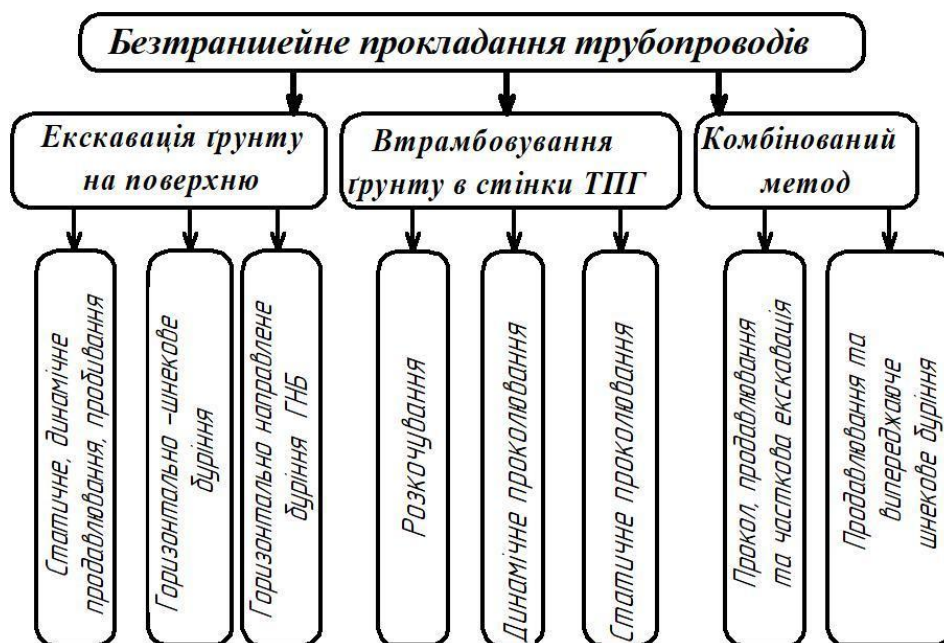


Рис. 1.1. Класифікація безтраншейних технологій отримання технологічної порожнини для лінійно протяжних об'єктів підземних комунікацій

Найбільш поширеними безтраншейними технологіями є горизонтально спрямоване буріння ГСП, статичним проколанням СП, пневматичне пробивання (далі ПП), горизонтально-шнекове буріння (далі ГШБ) [6]. Економічні, екологічні та соціальні переваги даних видів є відомими та беззаперечними, а саме: мінімальні терміни виконання робіт, незначна кількість робітників та важкої техніки, відсутність витрат на відновлення пошкоджених ділянок автошляхів, колій, збереження здоров'я людей та навколишнього середовища, мінімальні незручності автомобілям та пішоходам, тощо.

Вибір способу прокладання комунікацій залежить від необхідного діаметру та довжини порожнини, фізико-механічних властивостей і гідрогеологічних умов розроблюваних ґрунтів, технологічних можливостей установок, агрегатів і обладнання, якими можна виконати прокладку комунікацій, пори року, кліматичних умов, місця проведення робіт тощо.

Першою і найважливішою проблемою при виконанні порожнин під комунікації є правильність вибору траєкторії та шляхи обходу підземних перешкод, від чого залежить кінцева якість комунікацій і швидкість виконання робіт. В даний час жодні роботи безтраншейним способом не проводяться без попереднього обстеження території, аналізу топографічних карт та виявлення існуючих сусідніх комунікацій.

При проведенні робіт по прокладанню комунікацій слід ретельно дотримувати вимог охорони праці з електробезпеки, при виконанні підйомно-транспортних робіт, земляних робіт, при роботі з машинами та обладнанням, тощо. До роботи з установками мають допускатися лише кваліфіковані, навчені люди з відповідними посвідченнями.

### **1.1. Вибір методу створення порожнин для комунікацій залежить від їхніх розмірів**

Для прокладання комунікацій застосовують труби діаметром від 100 до 750 мм (кабельні лінії електромереж і зв'язку) або від 500 до 1500 мм — для водопровідних і каналізаційних мереж, а також футляри для газопроводів. Довжина переходів у міських умовах зазвичай варіюється в межах 10–200 м, а глибина прокладання становить від 0,8 до 12 м, причому може бути виконано від одного до чотирьох паралельних отворів. Залежно від умов, роботи виконуються установками ГСБ, малогабаритними або ручними установками СП та ГШБ зі шнековим робочим органом (далі — РО), пневмопробійниками чи пневмомолотами ПП. [1, 6, 7].

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Статичне проколювання (СП) (рис. 1.2). Завдяки низьким навантаженням на робочі органи та можливості «безвідходного» буріння, найбільшого поширення набули малогабаритні установки СП із проколюючими робочими органами. Цей метод передбачає ущільнення ґрунту до стінок порожнини, яка утворюється внаслідок проштовхування конусоподібного наконечника РО у ґрунті. У порівнянні з буровими методами створення отворів, СП є більш раціональним з огляду на стійкість стінок, що мінімізує засмічення та підвищує довговічність порожнин. Максимальна ефективність СП досягається у супіщаних, суглинистих та глинистих ґрунтах при діаметрах від 80 до 320 мм, довжині 10–100 м та глибині 1–5 м, з можливістю виконання як некерованих, так і керованих траєкторій. Також метод придатний для застосування в обводнених ґрунтах.

До недоліків СП належать складність керування траєкторією, значні осьові зусилля, що потребують підготовки напрямків, а також ущільнення ґрунту в зоні прокладання, яке може негативно впливати на сусідні комунікації. Крім того, надмірне ущільнення стінок порожнини (до 6–8 діаметрів отвору) може призводити до пошкоджень сусідніх комунікацій, а при мінімальній глибині залягання — до утворення тріщини на поверхні (рис. 2.1). Метод має суттєві обмеження при діаметрах отворів понад 300 мм та вимагає додаткових зусиль. Також СП неможливо застосовувати у піщаних ґрунтах через неспроможність ущільнення піску.

Горизонтально спрямоване буріння (далі ГСБ) (рис. 1.4–1.7). Цей метод дозволяє швидко створювати технологічні порожнини у ґрунті (далі ТПГ) мінімального діаметра 120 мм при довжині 50–200 м. Серед переваг ГСБ – можливість прокладання комунікацій у піщаних, супіщаних і сильно зволжених ґрунтах з високою продуктивністю. Метод є ефективним для порожнин діаметром 300–800 мм та довжиною 50–400 м і більше. Додаткові переваги включають керованість траєкторії та можливість обходу перешкод або створення порожнин непрямої траєкторії.

										ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							11

Серед недоліків ГСБ для невеликих порожнин і коротких дистанцій є висока вартість, обумовлена потребою у значному обсязі допоміжного обладнання та матеріалів. Іншим недоліком є неможливість корекції профілю отвору у разі виникнення перешкод, що потребує повторного буріння. Також при створенні великих отворів збільшується навантаження на робочий орган та установку, а при розширенні отворів утворюється значний обсяг відпрацьованого бурового розчину, який необхідно утилізувати.

Горизонтально-шнекове буріння (ГШБ) (рис. 1.8). Метод ГШБ є оптимальним для виконання робіт у суглинистих і глинистих ґрунтах на відстані до 50 м, з діаметрами комунікацій від 200 до 1200 мм.

Слід зазначити значні труднощі застосування даного методу в перезволожених ґрунтах і за наявності великої кількості кам'янистих включень, що робить використання шнеків неможливим. Окрім цього, варто відмітити неможливість плавного регулювання діаметра отвору, мінімальний розмір якого становить 200–250 мм. Додатково, потреба облаштування будівельного майданчика з направляючими суттєво ускладнює застосування цього методу в умовах обмеженого простору міської забудови. Також використання ГШБ є неможливим або значно ускладненим у піщаних і надмірно зволжених ґрунтах.

Пневматичне пробивання (ПП) (рис. 1.5). Метод пневматичного пробивання отворів із використанням пневмопробійників (кротів) характеризується високою швидкістю виконання робіт та їх відносною простотою. Цей спосіб є ефективним для створення отворів діаметром 80–180 мм на довжину 10–30 м.

Основним недоліком пневматичних пробійників і пневматичних молотів, що використовуються для забивання сталевих футлярів, є складність конструкції робочого органу, а також висока собівартість виконання робіт. Окрім того, метод характеризується повною некерованістю процесу, неможливістю роботи в піщаних і сильно зволжених ґрунтах, а також непрогнозованою змі-

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Спочатку вздовж траси прокладання комунікацій здійснюють пілотне буріння (рис. 1.2, а) із використанням пілотної бурової голівки, у передній частині якої розміщено випромінювач. Бурова голівка з'єднана зі ставом штанг, що дозволяє контролювати процес створення пілотної свердловини та обходити виявлені перешкоди в межах допустимого радіусу вигину штанг. У разі передачі лише поступального руху штангам траєкторія зміщується у бік скосу голівки, а при комбінованому поступальному й обертальному русі бурова голівка та штанги рухаються прямолінійно. Завдяки зміні режимів забезпечується досягнення проектної траєкторії свердловини.

Розширення свердловини (рис. 1.2, б) виконується при зворотному русі штанг, до яких прикріплено розширювач (ример). Він збільшує діаметр свердловини шляхом розбурювання та змішування ґрунту з буровим розчином. Утворена пульпа виноситься із зони буріння в приямки, після чого її випомповують для утилізації або повторного використання (рис. 1.2, в).

Сучасні установки дозволяють прокладати трубопроводи діаметром від 100 мм до 2500 мм на глибині до 20 м та довжиною до 2,5 км. Основними виробниками таких установок є Vermeer (США) (рис. 1.3), Ditch Witch (США), Astec Industries Ins (США), Tracto-Technik (Німеччина), Sany Heavy Industry CO (Китай).



Рис. 1.3. Установка ГСБ фірми Vermeer

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Технологія має переваги, серед яких широкий діапазон розмірів і довжин свердловин, можливість використання криволінійної траєкторії, одночасне затягування футляра у створену свердловину, заповнення пустот буровим розчином, який після згущення забезпечує надійне закріплення футляра.

Однак, разом із перевагами, ГСБ має недоліки. Вартість виконання робіт залишається високою, а технологія є обмеженою для використання за негативних температур. Економічно не вигідною вона стає для коротких відстаней (до 20–40 м) і малих діаметрів трубопроводів. Також значні габарити установки та допоміжного обладнання ускладнюють її використання в умовах обмежених міських вулиць, а вартість самої установки є досить високою.

### 1.3. Статичне проколювання

Отримання порожнин у ґрунті способом статичного проколювання зазвичай виконується в кілька етапів (рис. 1.4, б). Для цього використовуються силові циліндри та гідростанція, що їх живить. Робочі штанги з наконечником по черзі вдавлюються в ґрунт у напрямку, визначеному оператором, до моменту виходу в приймальний або проміжний приямок [1, 3, 5-7, 9-12].

Процес розширення отворів починається після виходу першої штанги у приймальний приямок. Зі штанги знімається пілотний наконечник, а на його місце встановлюється перший розширюючий конус більшого розміру. Ця процедура може повторюватися кілька разів до досягнення необхідного діаметра порожнини. Максимальний розмір порожнини залежить від типу ґрунту, його вологості та умов проведення робіт [10].

Створення технологічних порожнин починається з копання двох приямків потрібних розмірів: стартового та приймального. У стартовому приямку монтується гідравлічна домкратна установка, яка опирається в опорну стіну. Зворотно-поступальним рухом гідроциліндрів стартова головка разом із нарощуваною штангою впроваджується в ґрунт до виходу в приймальний приямок (рис. 1.4) [12].

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



Аналіз світових тенденцій [1, 3], патентного огляду [10] та сучасних установок для статичного проколювання ґрунту від різних виробників, представлених на рис. 1.6, дозволив узагальнити їх технічні параметри (табл. 1.1).

У таблиці 1.1 наведено технічні характеристики поширених у нашій місцевості установок для статичного проколювання. З таблиці видно, що всі вони мають схожі габаритно-масові показники. Робочі штанги розміром 500×50 мм чи 850×64 мм виготовляються зі сталюї труби або прутка. Швидкість проколювання та осьове зусилля залежать від типу насосів, потужності приводу та параметрів гідроциліндрів.

Для роботи установок потрібна мобільна гідравлічна станція, що працює на базі двигуна внутрішнього згоряння та гідравлічних насосів із витратами від 4 до 45 л/хв. Тиск робочої рідини досягає 25 МПа. Аналіз технічних характеристик показав тенденцію до зменшення габаритів і маси установок, що дозволяє обходитися без застосування спеціальних вантажопідйомних і транспортних засобів [13, 14].

Прикладом таких установок є МПК-30-100, виробництва ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ», м. Дніпро, або МП-250, НВП «Газтехніка», м. Харків, зображені на рис. 1.6.

Таблиця 1.1

Основні параметри установок для проколювання ґрунту

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці заміру	Тип установки	
			МПК-30-100 Дніпро	МП-250 Харків
1	2	3	4	5
1	Керованість пілотного проколювання		Керована	Не керована
2	Зовнішній діаметр штанги	мм	63,5	63,5
3	Довжина	мм	900	540
4	Кількість штанг в комплекті	шт	150	50
5	Діаметри конічних розширювачів	мм	80; 120; 159; 219; 273; 350	70; 108; 159; 219; 273

1	2	3	4	5
6	Довжина ТПГ, до	м	100	25
7	Зусилля на штоках ГЦ: – при проколі; – при розширенні	кН кН	150 350	100 250
8	Тиск гідростанції nom max	МПа	20 25	16 20
9	Швидкість проколу	м/хв	1	0,6
10	Маса установки	т	0,180	0,123
11	Теоретична швидкість проходки ТПГ, П	м/год	35	10
12	Потужність приводу, $N$	кВт	13	6

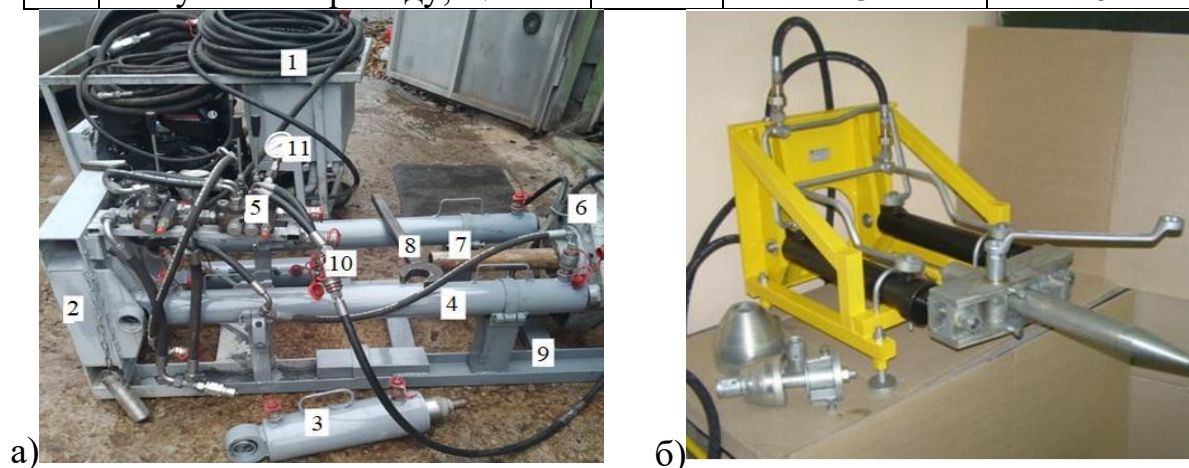


Рис. 1.6. Машини статичного проколу: а) – установка керованого проколу ґрунту МПК-30-100, ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ», м. Дніпро; б) – установка МП-250, НВП «Газтехніка», м. Харків: 1 – насосна станція з бензиновим двигуном, двома аксіальними насосами, гідробаком, фільтром і комплектом гідрорукавів; 2 – силова рама установки; 3 – короткі гідроциліндри; 4 – довгі гідроциліндри; 5 – гідророзподільники із запобіжними клапанами; 6 – редуктор для створення оберտального моменту на робочих штангах; 7 – робочі штанги; 8 – ключ для фіксації та переміщення штанг; 9 – подовжуюча рама з регульованими опорами; 10 – комплект швидкокороз'ємних з'єднань для гідрорукавів із захисними ковпачками; 11 – манометри для контролю зусиль протягування штанг і оберտального моменту.

Аналіз даних, наведених у табл. 1.1, свідчить, що розроблені РО та установка МПК-30-100, призначені для проколювання ТПГ на довжину до 100 м, демонструють найвищий рівень ефективності. Це досягнуто завдяки оптимальному поєднанню швидкості та зусилля проколювання, що забезпечується використанням аксіальних насосів змінного робочого об'єму з регулюванням за постійною потужністю. Така конструкція дозволяє досягти максимальних швидкостей при невеликих навантаженнях зворотного ходу. Додатковою перевагою є застосування гідроциліндрів із ходом довжиною в один метр, що мінімізує кількість холостих ходів.

Серед переваг методу статичного проколювання за допомогою малогабаритних установок слід відзначити їх компактні розміри та невелику масу, високу мобільність, а також відносно значні робочі швидкості. Метод дозволяє отримувати отвори діаметром до 350 мм шляхом послідовного розширення. Невеликі габарити приямків, необхідних для проведення робіт, знижують обсяги земляних робіт і мінімізують витрати на відновлення благоустрою території.

#### **1.4. Горизонтально-шнекове буріння**

Установка ГШБ Perforator GMBH, фірми SCHMIDT, KRANZ & CO GMBH (рис. 1.7) Призначена для розробки свердловин діаметром до 600 мм і довжиною до 100 метрів. Для надточної проходки Perforator GMBH оснащена: системою спостереження, виконавчим органом (керованої головкою) з форсунками для подачі бентоніту, подвійними пілотними штангами (труба в трубі) [1, 6, 7, 15-16 ]. Установку відрізняє високий рівень технологічності, якості та досконалості системи наведення.

Машина Bohrtec BM 400 від фірми Herrenknecht AG забезпечує керовану проходку на відстань до 80 метрів та може працювати з стартового котловану глибиною до 2 метрів. Система управління проколом базується на використанні відеокамери, світлодіодної мішені та теодоліта.

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

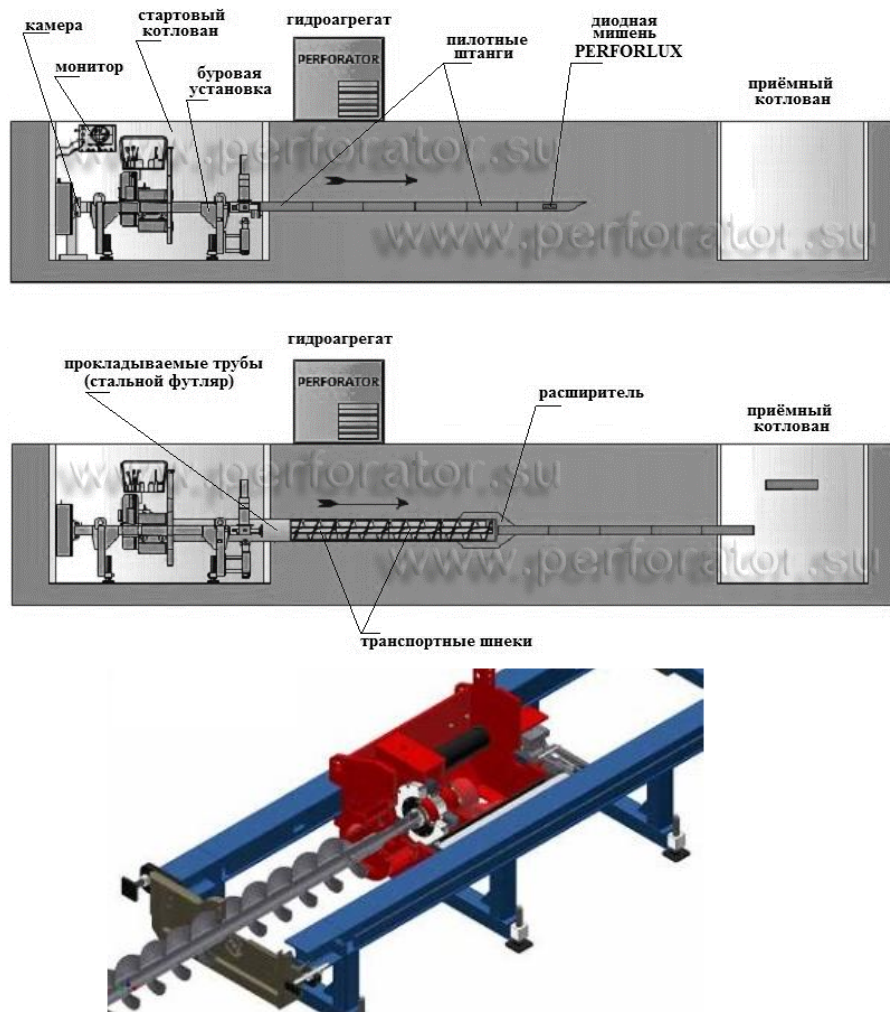


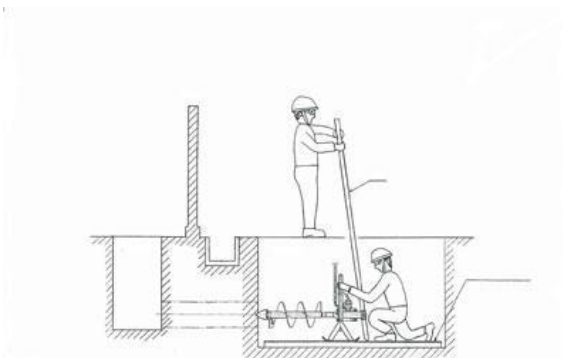
Рис. 1.7. Технологія роботи та установка Perforator GMBH,

Широке застосування отримала установка для мікротонелювання RVS-80 від компанії Soltan Mikrotonnelling GmbH. Як і в попередній установці, керований прокол здійснюється шляхом формування пілотної свердловини. Розширення проходки виконується обертанням шнека з промивкою свердловини водою.

Фірма ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ» (м. Дніпро) розробила та виготовила установку шнекового буріння з моторним приводом від двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) та комплектом шнеків (200 мм) і розширювачів (до 450 мм) типу УШБМ (рис. 1.8). Ця установка працює за принципом комбінації методів проколу і шнекового буріння, забезпечуючи прокладання комунікацій діаметром

						ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			20

до 450 мм. Вона призначена для використання в обмежених міських умовах [14].



а)

б)

Рис. 1.8. Установка фірми «ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ», м. Дніпро: а) – схема використання буро-шнекової малогабаритної установки ; б) – шнек робочий та конусний розширювач; в) – привід ГБШ установки

### 1.5. Динамічне проколювання пневмопробійниками

Безтраншейна прокладка комунікацій з використанням пневмопробійників та пневмомолотів рис. 1.9. [1, 2, 5-6, 10, 17]. При прокладці підземних комунікацій різного призначення безтраншейним методом, діаметром від 100 до 530 мм і довжиною до 40-50 м, ця технологія успішно використовується для забивання труб-оболонок. Застосування такої методики дозволяє виконувати роботи під автомагістралями та залізничними коліями без припинення транспортних потоків, без порушення дорожнього покриття, а також при великих глибинах залягання трубопроводів під будівлями та спорудами.

Для безтраншейної прокладки, в залежності від умов проведення робіт та вимог замовника, можуть використовуватись різні прохідницькі установки: пневмоударна машина СО-134 (для прокладки труб діаметром від 50 до 219 мм із закритим кінцем), пневмомолоти СО-134 (для прокладки труб середнього діаметра від 219 до 530 мм з подальшим чищенням) (рис. 1.10) [6, 17].

Пневмопробійники (рис. 1.10-1.11) та пневмомолоти ефективно використовуються для забивання труб-футлярів (рис. 1.10) закритим або відкритим

									Арк.
									21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДПТ. 630000. 301. МРПЗ				



- висока швидкість виконання робіт;
- зменшення собівартості робіт;
- реверсивність устаткування (можна вийняти забиту трубу);
- можливість забивання труб під різними кутами до горизонту (включаючи вертикально);
- можливість одночасного пробивання отвору та затягування труб-футлярів;
- забивання труб великого розміру (від 400 до 1200 мм).



Рис. 1.11. Пневмопробійник для проколювання ґрунту та забивання труб фірми GRUNDOMAT

До недоліків відносяться:

- висока собівартість експлуатації обладнання;
- необхідність використання додаткового обладнання (компресор, гідростанція, електростанція);
- некерована траєкторія отвору (при роботі пневмопробійника);
- різка зміна траєкторії на слабких ґрунтах та пливунах;

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

- необхідність вибурювання ґрунту з футляра (при забиванні "відкритим кінцем");
- дуже істотне ущільнення ґрунту навколо стінок отвору, що призводить до збурення ґрунту на поверхні (поява горбика та розтріскування асфальтного покриття по осі отвору) або руйнації комунікацій, що проходять поруч;
  - руйнація інших комунікацій при зустрічі з робочим органом;
  - великі динамічні навантаження на сусідні об'єкти.

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. ПРОЦЕС СТАТИЧНОГО ПРОКОЛЮВАННЯ ТА РОЗШИРЕННЯ ОТВОРІВ КОНУСНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

### 2.1. Вплив робочих органів на ґрунт.

Метод проколу передбачає розробку горизонтальної свердловини шляхом впровадження в ґрунтовий масив конусного наконечника. Цей метод рекомендується для прокладання труб діаметром до 350 мм у глинистих та суглиннистих ґрунтах. Відомі випадки застосування методу проколу для діаметрів до 500 мм.

Проте слід зазначити, що радіально витіснений ґрунт при цьому утворює навколо свердловини зону структурно-пружних деформацій. Тверді частинки, переміщуючись у зону менших напруг, займають весь обсяг пір цієї зони. За даними Вазетдінова А.С. [3, 5, 10, 18, 19], епюра поширення напруги має вигляд концентричних кіл (рис. 2.1), центром яких є вісь свердловини.

Для визначення зусилля деформування ґрунту необхідно знати закон зміни його нормального тиску  $q_x$  на конічний наконечник (рис. 2.1.) у залежності від деформації  $x$ . Визначимо його на основі компресійних кривих для ґрунтів, які можна у першому наближенні представити у вигляді лінійних залежностей [3, 5, 10, 20, 21].

$$e_x = e_0 - c_k q_x, \quad (2.1)$$

де  $e_x$  – змінний коефіцієнт пористості ґрунту в залежності від деформації;

$e_0$  – початковий коефіцієнт пористості ґрунту у природному стані;

$c_k$  – коефіцієнт компресії ґрунту ( $c_k = 0,07 \dots 0,09(\omega_T - 10)$ , МПа<sup>-1</sup>) [18- 21];

$\omega_T$  – межа текучості ґрунту або  $c_k = 0,1\omega$ ;

$\omega$  – природна вологість ґрунту.

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Коефіцієнти пористості  $e_x$  і  $e_0$  можна виразити через щільність ґрунту за залежностями [10, 20, 21]

$$e_x = \frac{(1 + \omega)\rho_{тв}}{\rho_x} - 1, \quad e_0 = \frac{(1 + \omega)\rho_{тв}}{\rho_{нр}} - 1, \quad (2.2)$$

де  $\rho_{тв}$  – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту при умові, що в ньому відсутні пори);

$\rho_x$  – змінна щільність ґрунту по висоті конуса, пропорційна зміні площі поперечного перетину конуса;

$\rho_{нр}$  – щільність ґрунту в природному стані.

Тоді нормальний тиск ґрунту в кожному поперечному перерізі конуса дорівнює [18]:

$$q_x = \frac{(1 + \omega)\rho_{тв}}{c_k} \left( \frac{1}{\rho_{нр}} - \frac{1}{\rho_x} \right). \quad (2.3)$$

Визначимо закон зміни щільності ґрунту по висоті конуса на основі закону рівності мас:

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{нр} = \frac{\pi}{4} (D^2 - 4x^2) \rho_x, \quad (2.4)$$

де  $D$  – діаметр конусного наконечника;

звідки

$$\rho_x = \frac{\rho_{нр}}{1 - (2x/D)^2}. \quad (2.5)$$

Знайдемо значення  $x$  із залежності (2.5), при якому ґрунт максимально ущільнюється до  $\rho_{тв}$ .

$$x = \frac{D}{2} \sqrt{1 - \frac{\rho_{нр}}{\rho_{тв}}}. \quad (2.6)$$

У подальшому ґрунт буде витіснятися за межі ґрунтового отвору. Для ідеального сипучого середовища зона максимального ущільнення ( $\rho_{зр} = \rho_{тв}$ )

розповсюджується навколо осі проколини на відстань  $D_{\rho_{тв}}$ . Визначимо цю відстань із умови

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{np} = \frac{\pi}{4} (D_{\rho_{тв}}^2 - D^2) \rho_{тв}. \quad (2.7)$$

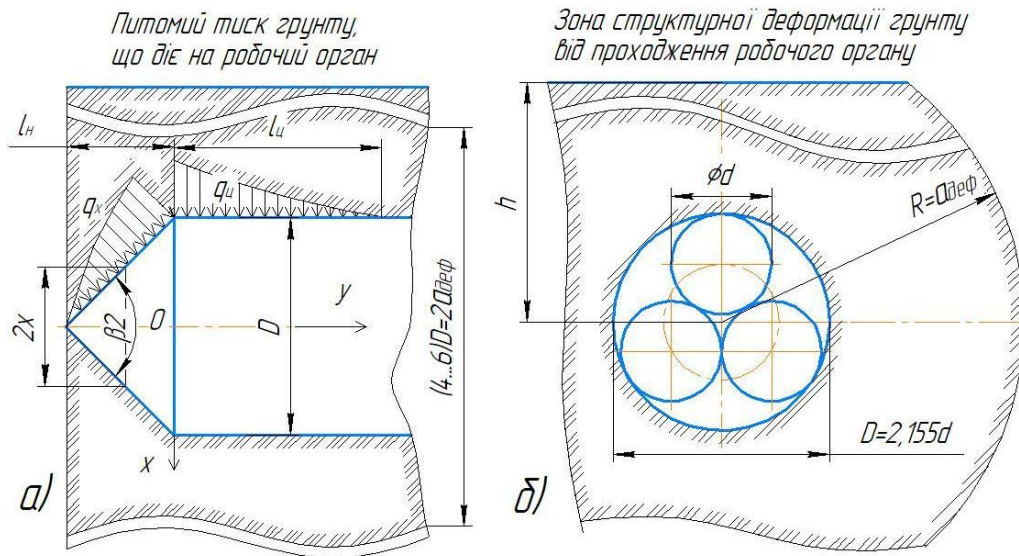


Рис. 2.1. Взаємодія конусно-циліндричного наконечника з ґрунтом

Звідки

$$D_{\rho_{тв}} = D \sqrt{1 + \frac{\rho_{np}}{\rho_{тв}}}. \quad (2.8)$$

Для зв'язних ґрунтів зона руйнування ґрунту  $D_p$  розповсюджується на значно більшу відстань  $D_p > D_{\rho_{тв}}$  [10, 18-21].

Відповідно до залежності (2.3) закон зміни нормального тиску на бічну поверхню конусного наконечника запишеться у вигляді

$$q_x = E_{zp} \left( \frac{2x}{D} \right)^2, \quad (2.9)$$

де  $E_{zp} = \frac{(1+\omega)\rho_{тв}}{c_k \cdot \rho_{np}}$  – компресійний модуль деформації ґрунту.

Закон зміни тиску (2.9), що приведений на рис. 2.2, підтверджений експериментальними даними, для твердого супіску [10, 18-20]. Для розрахунку

прийняті наступні вихідні дані: для твердого супіску –  $\rho_{тв} = 2,70 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{нр} = 2,05 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 14\%$ ;  $c_k = 1,08 \text{ МПа}^{-1}$ ; для напівтвердого суглинку –  $\rho_{тв} = 2,70 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{нр} = 2,10 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 10\%$ ;  $c_k = 1,73 \text{ МПа}^{-1}$ ; для тугопластичної глини –  $\rho_{тв} = 2,73 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{нр} = 2,00 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 30\%$ ;  $c_k = 2,81 \text{ МПа}^{-1}$ .

## 2.2. Сила статичного проколювання отворів

Статичне проколювання ґрунту залежить від параметрів тиску ґрунту на бічній поверхні, типу ґрунту, розмірів робочого органу, початкових умов вологості, наявності попереднього отвору, глибини прокладання, швидкості проходження та інших факторів. Параметри зміни тиску на бічній поверхні для твердого супіску, напівтвердого суглинку та тугопластичної глини наведені на графіку (див. рис. 2.2) [5, 18, 22].

Елементарна площа конусного наконечника дорівнює

$$dF = 2\pi x \cdot \frac{dx}{\sin\beta}, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} dP_{нр} &= dN \sin\beta + f \cdot dN \cos\beta = dN \sin\beta(1 + f \operatorname{ctg}\beta) = \\ &= q_x \cdot dF \sin\beta(1 + f \operatorname{ctg}\beta) = \frac{8\pi E_{зр}}{D^2} (1 + f \operatorname{ctg}\beta) x^3 dx. \end{aligned} \quad (2.11)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по конусу;

$2\beta$  – кут при вершині конуса.

Тоді

$$P_{нр} = \frac{8\pi E_{зр}}{D^2} (1 + f \operatorname{ctg}\beta) \int_0^{D/2} x^3 dx = \frac{\pi E_{зр} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg}\beta). \quad (2.12)$$

Лобовий питомий опір проколюванню дорівнює

$$P = \frac{\pi D^2}{4} \frac{E_{зр}}{2} (1 + f \operatorname{ctg}\beta). \quad (2.13)$$

						ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

На рис. 2.3 побудовані залежності зусилля заглиблення конічної частини наконечника в твердий супісок, напівтвердий суглинок і тугопластичну глину від діаметра проколу [18].

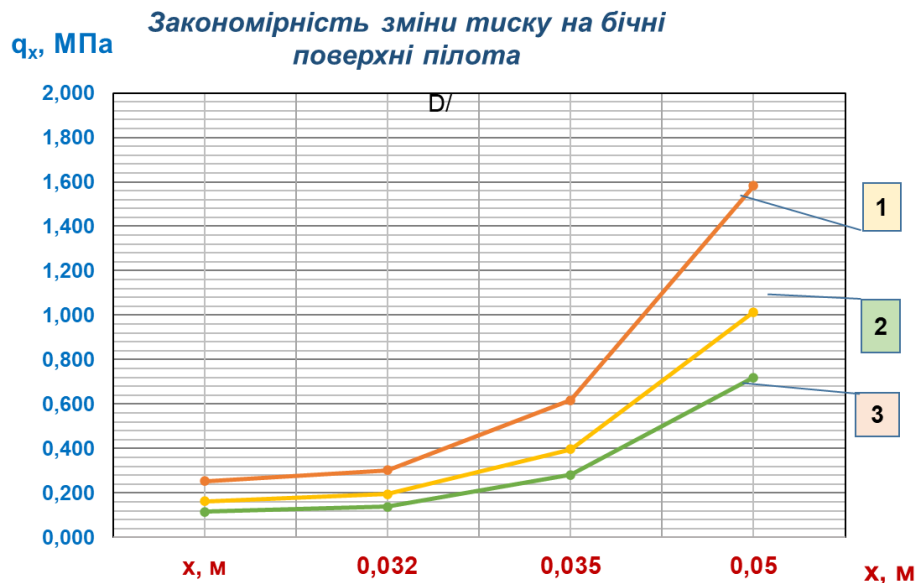


Рис. 2.2. Закономірність зміни тиску на бічній поверхні конуса в різних видах ґрунтів: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

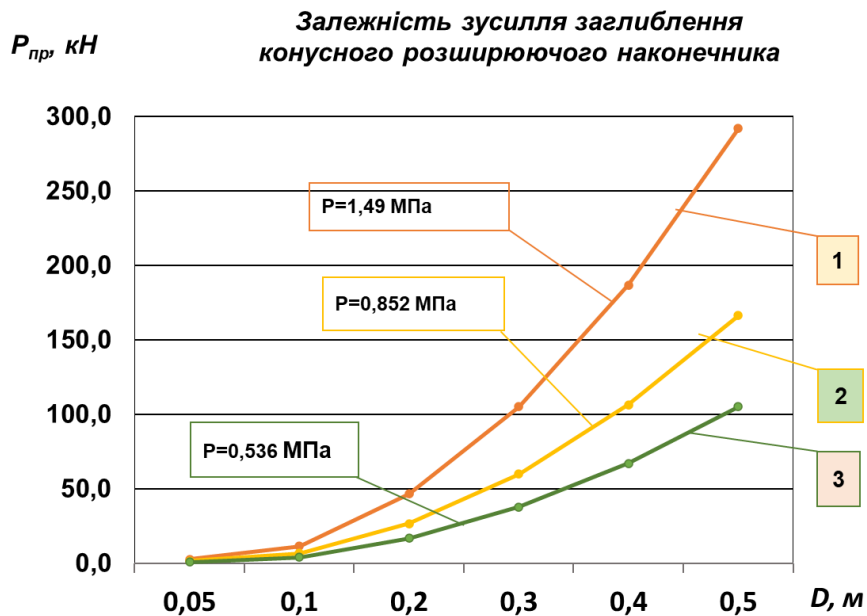


Рис. 2.3. Залежність зусилля заглиблення конусної частини наконечника від діаметра проколу: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

Для побудови графіка залежності рис. 2.3. зусилля заглиблення конусної частини наконечника вихідними даними для розрахунку були:  $2\beta = 50^\circ$  для твердого супіску –  $E_{zp} = 1,39$  МПа;  $f = 0,532$ ; для напівтвердого суглинку –  $E_{zp} = 0,892$  МПа;  $f = 0,424$ ; для тугопластичної глини  $E_{zp} = 0,631$  МПа;  $f = 0,325$ .

Для визначення сил тертя на циліндричній поверхні наконечника розглянемо фізику процесу проколювання в цілому. Після формування ґрунтової порожнини кінцевою частиною наконечника до необхідного діаметра деформування ґрунту в радіальному напрямку припиняється. З цього моменту часу ( $t = 0, y = 0$ ) в напруженому середовищі встановлюється статична рівновага, коли напруження, які характеризують стан середовища релаксують (зменшуються з часом) у результаті зменшення пружної складової деформації. Такий стан середовища описується рівністю [3, 10, 20].

$$q_{\text{ц}} = q_{\text{ц}}^{\text{max}} \cdot e^{-\frac{E_V t_{\text{ц}}}{k_g}}, \quad (2.14)$$

де  $q_{\text{ц}}^{\text{max}}$  – максимальний тиск ґрунту на циліндричну частину наконечника;

$E_V$  – модуль пружної об'ємної деформації ґрунту;

$k_g$  – коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунту;

$t_{\text{ц}}$  – час контакту з ґрунтом наконечника ( $t_{\text{ц}} = \frac{y}{v}$ );

$v$  – швидкість пересування наконечника.

$$q_{\text{ц}}^{\text{max}} = \frac{D_p}{D} \sigma_1, \quad (2.15)$$

де  $D_p$  – діаметр пружно-пластичної зони (зони руйнування), [18-21];

$\sigma_1$  – напруження на границі пружної і пластичної зон визначили Кравець С. В. і Кованько В. В. [3, 10, 20].

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} = \left| \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \right|, \quad (2.16)$$

$$\text{де } \left\{ \begin{array}{l} A = \sin \varphi_0 (3 - \sin \varphi_0) \\ B = 3c \cdot \cos \varphi_0 - 2,5c \cdot \sin 2\varphi_0 + \gamma_{zp} h (1 + \sin \varphi_0) \\ C = [\gamma_{zp} h (1 + \sin \varphi_0) + 4c \cdot \cos \varphi_0] c \cdot \cos \varphi_0 \end{array} \right\};$$

$\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$c$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

$\gamma_{zp}$  – питома сила тяжіння ґрунту;

$h$  – глибина на якій здійснюється прокол.

У момент часу  $t = 0$  в поперечному перерізі наконечника в основі конуса діє максимальний контактний тиск (2.15). Якщо  $t > 0$ , то у зв'язку з тим, що  $E_V \gg k_g$ , тиск на циліндричній частині наконечника на довжині 10...20 см зменшується за даними [3, 10, 20] до 0,016...0,035 МПа, для діаметрів циліндра від 0,1 до 0,35 м, із збільшенням діаметра залишковий тиск зростає. Тому якщо  $l_{\text{ц}} \leq 0,2$  м,  $q_{\text{ц}}^{\text{сер}} = \frac{D_p}{2D} \sigma_1$ , а якщо  $l_{\text{ц}} > 0,2$  м, то тиск у залежності від діаметра знаходиться у межах 0,016...0,035 МПа.

Сумарна сила тертя на циліндричній частині наконечника дорівнює

$$F_{\text{тр}} = 0,1\pi\lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_{\text{ц}} - 0,2) q_3, \quad (2.17)$$

де  $\lambda = \frac{D_p}{D}$  – відношення діаметра зони пружно-пластичних деформацій

до діаметра конусного наконечника [18].

Тоді сумарний опір заглибленню конічно-циліндричного наконечника дорівнює

$$R_{\Sigma} = \frac{\pi E_{zp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1\pi\lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_{\text{ц}} - 0,2) q_3. \quad (2.18)$$

									ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
										31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Залежність сумарного опору заглиблення на глибині 1,5 м від діаметра наконечника приведена на рис. 2.4. ( $l_u = 0,5$  м).

Мінімальна довжина бічної циліндричної поверхні ґрунтопроколюючого пристрою визначається із умови компенсації реакції віддачі зусилля проколювання силами тертя ґрунту на бічній поверхні пристрою  $F_{mp} > P_k$  (для саморухомих динамічних пристроїв із внутрішнім підведенням енергії)

$$l_3 > \frac{E_{zp}D}{8q_3}(1 + f \operatorname{ctg}\beta) - \frac{0,1\lambda\sigma_1}{q_3} + 0,2, \text{ м.} \quad (2.19)$$

З урахуванням динамічності процесу [18-21]:

$$l_3 \geq \frac{(0,3 \dots 0,4)E_{zp}D}{8q_3}(1 + f \operatorname{ctg}\beta) - \frac{0,1\lambda\sigma_1}{q_3} + 0,2, \text{ м.} \quad (2.20)$$

Довжина корпусу збільшується прямопропорційно діаметру наконечника.

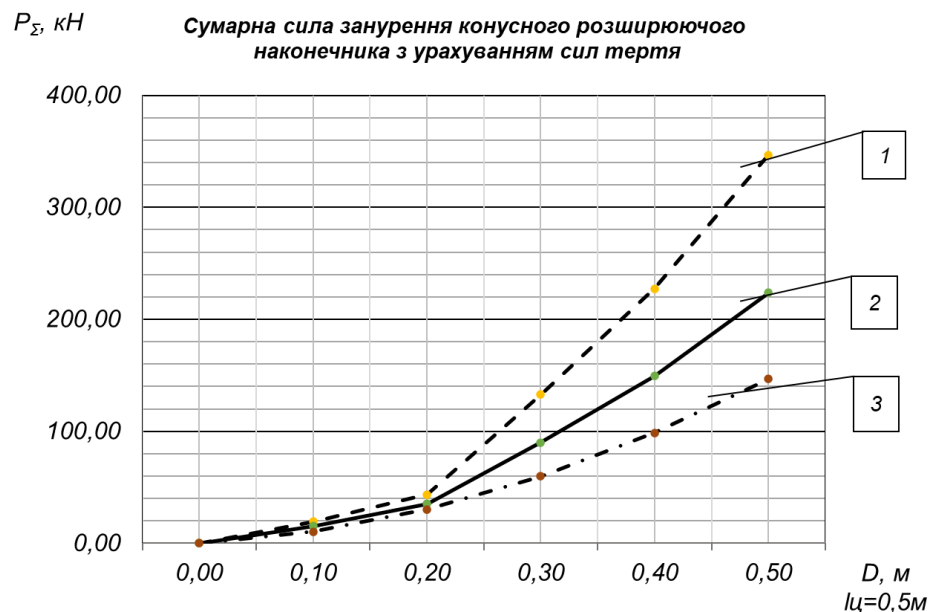


Рис. 2.4. Залежність сумарного опору переміщенню конічно-циліндричного наконечника від діаметра ( $l_u=0,5$  м): 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 2.3. Сила ступінчатого розширення отворів

При виконанні робіт по прокладанню декількох кабелів одночасно виникає необхідність групового прокладання футлярів [27], що вимагає утворення горизонтального отвору більшого діаметру. Збільшення розміру призводить до суттєвого збільшення зусилля проколювання ґрунту, а в деяких випадках стає зовсім неможливим. В роботах В. Супонєва та В. Олексіна розглянуто комбінований спосіб проходження отворів, що поєднує в собі переваги відомих способів проколу та продавлювання. Суть полягає в тому, що спочатку проколом утворюють пілотну, послаблюючу масив свердловину, яку потім розширюють, доводячи діаметр до потрібного розміру.

Розширення свердловини може здійснюватися конусом, що ущільнює, кільцевими ріжучими ножами, задавлюванням труби, желонкою. Розглянемо один із названих способів проходки свердловин [24] – розширення свердловини кільцевими ріжучими ножами, яке показано на рис. 2.5. Зауважимо, що одночасно із здійсненням 4-го етапу (рис. 2.6) може проводитись і затягування труби.

Між діаметрами  $d$  та  $d_1$  (рис. 2.6), також має витримуватися певне співвідношення, яке зумовлене пропускною здатністю ножа (рис. 2.7). З урахуванням конструкції та коефіцієнта розпушення ґрунту встановлено

$$\frac{d_1}{d} \approx 1,25 \dots 1,35, \text{ м.} \quad (2.21)$$

Опори, що виникають при реалізації цієї технології. Схема взаємодії кільцевого ножа з ґрунтом у свердловині показано на рис. 2.5.

Вважаємо, що товщина зрізаної ножом стружки відповідає умові. У міру просування ножа перед ним утворюється призма ґрунту, тиск якої сприяє проходженню зруйнованого ґрунту через вікна ножа. Ця сила  $P_1$  (рис. 2.6) викликає розпірне зусилля  $P_p$ , яке створює додаткове навантаження на відокремлюваний від масиву ножом елемент.

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

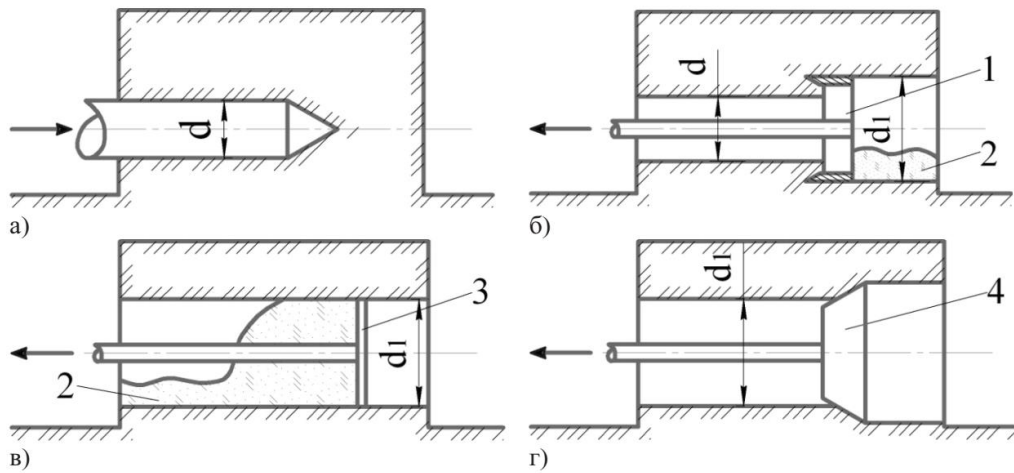


Рис. 2.5. Схема розширення свердловини кільцевим різальним ножом: а) – прохід лідируючої свердловини; б) – розширення свердловини кільцевим ножом; в) – очищення свердловини від зруйнованого ґрунту; г) – ущільнення стінок свердловини конусом; 1 – кільцевий ніж; 2 – зруйнований ґрунт; 3 – очищувальний диск; 4 – ущільнюючий конус

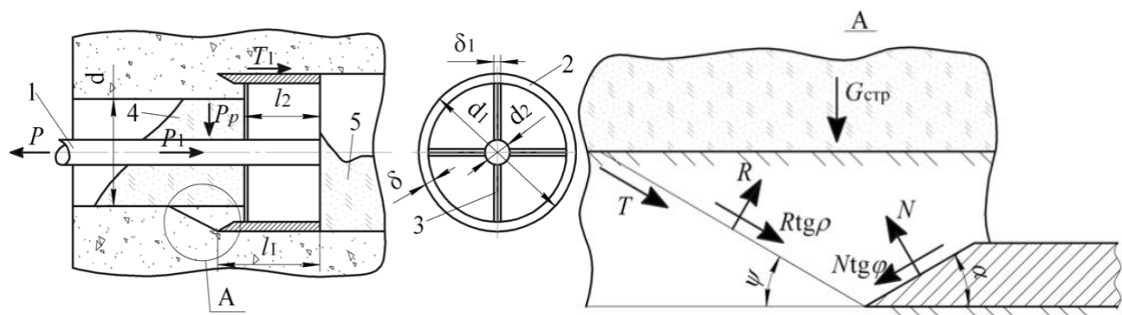


Рис. 2.6. Схема взаємодії кільцевого ножа з ґрунтом у свердловині:

1 – штанга; 2 – кільцевий ніж; 3 – ребро; 4 – призма ґрунту; 5 – ґрунт, що пройшов через отвори в ножі;  $P$  – зусилля, що прикладається до ножа при різанні ґрунту;  $P_1$  – зусилля проштовхування зруйнованого ґрунту через вікна в ножі;  $P_p$  – розпірне зусилля, викликане ущільненням ґрунту в призмі зусиллям  $P_1$ ;  $T_1$  – тертя обичайки ножа на стінки свердловини;  $\alpha$  – кут загострення кромки ножа;  $\rho$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;  $\phi$  – кут зовнішнього тертя ґрунту;  $T$  – опір зсуву відокремлюваного елемента ґрунту;  $N$  – нормальний тиск на ґрунт лобової грані загостреної кромки ножа;  $\psi$  – кут зсуву ґрунту

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------



Використовуючи рівність (2.22), (2.23) на рис. 2.7 представлені графіки залежності прикладається до кільцевого ножа зусилля при різанні ґрунтів залежно від діаметра ножів.

Як видно з представлених графіків, зусилля розширення свердловини зі зростанням діаметра кільцевих ножів збільшується за зростаючою залежністю.

Після розширення свердловини кільцевим ножом усередині по всій її довжині залишається розпушений ґрунт. Видалення може здійснюватися виштовхуванням його натискним диском. Розглянемо процеси, що відбуваються при цьому.

На першому етапі в міру руху диска перед ним накопичуватиметься ґрунт, доки не утвориться призма волочіння. При подальшому переміщенні диска весь переріз свердловини заповнюється ґрунтом, а ґрунт стискається. Подальше переміщення диска призводить до того, що тиск диска настільки великий, що розташований перед ним ґрунт не тільки стискається, але і частково витісняється в стінки свердловини. Нарешті, подальше переміщення диска призводить до того, що тиск диска досягає максимальної величини, коли весь ґрунт на відрізку переміщення диска вминається в стінки свердловини. Далі відбувається стабільний процес очищення свердловини від ґрунту.

На підставі викладеного встановлено, що для очищення свердловини до диска необхідно прикладати зусилля.

$$P_H = \frac{\pi P_{\partial}}{4\xi} (d_1^2 - d_2^2), \text{ м.} \quad (2.24)$$

де  $P_{\partial}$  – опір ґрунту вдавлюванню (70-150 Н/см<sup>2</sup>).

Залежність зусилля очищення свердловини її діаметра представлена рис. 2.7. При виборі величини  $P_{\partial}$  для різних ґрунтів слід пам'ятати, що вдавлювання відбувається в ущільнений ґрунт. Згідно з експериментальними даними його фізико-механічні властивості після пологового ущільнення при

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДІТ. 630000. 301. МРПЗ				



ефект його руйнування та спучування (рис. 2.8). На дорозі це виявиться у вигляді тріщини та руйнування дорожнього покриття. Тому важливо знати, за якої мінімальної глибини та прийнятого діаметра отвору не відбуватиметься цей негативний прояв.

Українські вчені Святослав Кравець, Володимир Супонєв, Віталій Рагулін дослідили цей процес у роботі [28, 32], а порядок перетину підземних комунікацій з автомобільними, трамвайними та залізничними коліями регламентовані ДСТУ [29-31].

Для розв'язання цього завдання розглянемо результати досліджень, проведених В. Рудневим [34], щодо занурення штампів у ґрунт. Учений установив зв'язок критичної глибини з його шириною, за умови якої поверхнєве руйнування не відбувається, у вигляді простої лінійної залежності:

$$H_{кр} = a + bd, \quad (2.25)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти лінійної апроксимації;

$d$  – ширина штампу, м.

Водночас коефіцієнти  $a$  і  $b$ , що містить формула, визначаються експериментальним шляхом для конкретних ґрунтових умов.

Отже, якщо припустити, що  $d$  – це розмір діаметра робочого органа, то можна отримати й розрахункову залежність для мінімальної глибини закладання свердловини, утворену методом проколу. Значення безрозмірних коефіцієнтів можуть бути визначені з вирішення системи рівнянь способом установавлення отриманих значень мінімальної глибини  $H_{np}$  для двох різних діаметрів проколювальних головок в однакових ґрунтових умовах:

$$\begin{cases} H_{np1} = a + bd_1 \\ H_{np2} = a + bd_2 \end{cases} \quad (2.26)$$

Для встановлення мінімальної глибини прокладання отворів залежно від їх діаметра проведена серія експериментів з натурним зразком ґрунтопроколювальної установки та її робочими органами (рис. 2.9) у різних ґрунтових

						ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			38

умовах. Після кожного заглиблення в процесі проколювання здійснювався візуальний контроль утворення тріщини на поверхні ґрунту, що поступово зменшувався. Здобуті експериментальні значення мінімальної глибини дозволяють оптимізувати проектування процесів прокладання труб і зменшити ризик руйнування дорожнього покриття чи інших поверхневих об'єктів. Підставили систему рівнянь (2.26) величини мінімальної глибини для двох випадків проколу й розрахували коефіцієнти апроксимації  $a$  і  $b$  щодо кожної з досліджуваної ґрунтової умови, які також наведені в таблиці.

Отже, підставляючи значення коефіцієнтів  $a$  та  $b$ , розрахуємо мінімально допустиму глибину проколу за будь-якого діаметра свердловини для досліджуваних ґрунтів:

- для супіску:  $H_{кр} = 57,8 + 9,4d$  ;
- для суглинку:  $H_{кр} = 20,9 + 8,14d$  ;
- для глини:  $H_{кр} = 125,6 + 13,8d$  .

Отримані формули мають обмежений характер застосування та справедливі лише для конкретних ґрунтових умов. Розроблення універсальних рекомендацій для широкого спектра ґрунтів потребує значних масштабних досліджень.

Розглядаючи фізичну картину процесу проколу, необхідно враховувати, що радіально витіснений ґрунт створює зону структурно-пружних деформацій. Це означає, що тверді частинки ґрунту переміщуються в зону менших напружень, і в процесі формування свердловини заповнюють порожнини. За результатами досліджень, візуалізація розподілу напружень відбувається у вигляді концентричних кіл, центр яких збігається з віссю свердловини [3, 20- 21, 28]. Найбільші напруження зосереджені безпосередньо біля свердловини, і це має суттєвий вплив на фізичні характеристики ґрунту, що визначають параметри проколу та стабільність процесу. Зона структурної деформації

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

ції, на думку автора, обмежується деяким радіусом  $R_{роз}$  далі від якої розміщена зона пружних деформацій  $R$ , обмежується величиною напруження в ґрунті й дорівнює природним напруженням. Величина  $R_{роз}$  розраховується за формулою:

$$R_{роз} = \frac{r}{\sqrt{\omega}}, \quad (2.27)$$

А. Вазетдінов вважає, що сила опору ґрунту проколу безпосередньо пов'язана з розміром зони структурних змін, що визначається його пористістю. Тому логічно припустити, що мінімальна глибина проколу також безпосередньо пов'язана з розмірами зони структурних змін. Для перевірки цього припущення за результатами експериментів, отримали залежності мінімальної глибини закладення свердловини  $H_{пр}$  від його пористості  $e_0$ . Для двох випадків проколу свердловини діаметрами  $d_1 = 65$  мм та  $d_1 = 108$  мм та за трьома точками значень мінімальної глибини проходки свердловини  $H_{кр}$  з пористістю  $e_0 = 38\%$ ;  $e_0 = 45\%$ ;  $e_0 = 53\%$  побудуємо криві, що на рис. 2.5. мають вигляд гіперболи та добре описуються кореляційною залежністю:

$$H_{пр} = D_{св} \left[ 4,4 + \frac{1}{(0,01\omega)^{2,25}} \right], \quad (2.28)$$

де  $D_{св}$  – діаметр свердловини, м;

$\omega$  – природна пористість ґрунту, %.

Як видно з графіків, поданих на рис. 2.8, залежності зони структурних змін і мінімальної глибини проколу дійсно мають однаковий характер залежності від пористості ґрунту.

Для перевірки адекватності формули (2.8) побудуємо графік розрахункової залежності критичної глибини від діаметра свердловини в ґрунтах із пористістю. Як видно з графіка (рис. 2.6), похибка розрахункових та експериментальних значень не перевищує 5.

									ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
										40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

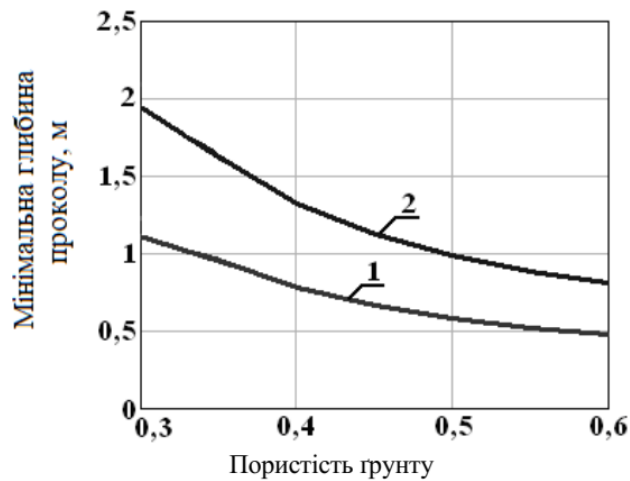


Рис. 2.8. Залежність мінімальної глибини проколу від пористості ґрунту: 1 – для діаметра проколу  $d_1 = 65$  мм; 2 – для діаметра проколу  $d_2 = 108$  мм

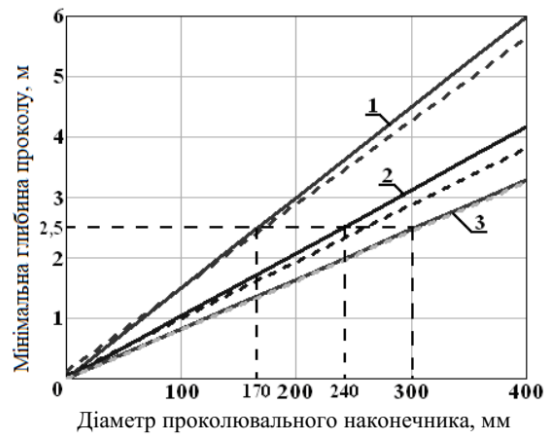


Рис. 2.9. Залежність мінімальної глибини проколу свердловини від діаметра конусного наконечника: 1 –  $e_0 = 38\%$ ; 2 –  $e_0 = 45\%$ ; 3 –  $e_0 = 53\%$

З рис. 2.9 видно, якщо необхідно розробити свердловину на глибині 2,5 м, то гранично допустимий розрахунковий діаметр проколу ґрунту установкою статичної дії становитиме 170 мм для ґрунтів з пористістю  $e_0 = 38\%$  для ґрунтів з пористістю  $e_0 = 45\%$  діаметр має бути 240 мм та для ґрунтів з пористістю  $e_0 = 53\%$  не більше ніж 300 мм.

У будівництві переходів під дорогами ключовим фактором є проектна глибина закладення інженерних мереж. Тому важливо визначити граничний

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

діаметр горизонтальної свердловини, яку можна сформува­ти за допомогою ме­тоду статичного проколювання. Цей діаметр буде розрахований на основі умови розробки свердловини в межах мінімальної допустимої глибини про­колу, що дорівнює:

$$D_{cv} = \left[ 4,4 + \frac{H}{(0,01e_0)^{2,25}} \right], \quad (2.29)$$

де  $H$  – глибина проходки свердловини до її верхньої утворювальної.

Висновки. Якщо заданий діаметр свердловини не перевищує значення розрахункового, метод статичного проколювання можна застосовувати без ри­зику руйнування дорожньої основи. Якщо розрахунковий діаметр буде понад заданий розмір свердловини, необхідно застосувати іншу технологію розроб­лення свердловини, наприклад буріння, продавлювання або комбінацію мето­дів проколювання та продавлювання. В реальних умовах будівництва розмір розширення визначений проектом, а спосіб реалізації залежить від виконавця та наявного обладнання.

## 2.5. Горизонтально-шнекове буріння як метод зменшення напру­жень у ґрунті при статичному проколі

Шнекове буріння або направлене горизонтально-шнекове буріння ГШБ застосовується для прокладання підземних комунікацій з діаметром від 200 до 2500 мм на відстань від 10 до 200 м. Процес розпушування та екскавації ґрунту здійснюється за допомогою різців та шнекового транспортера по спеціальних обсадних трубах або із використанням порожнини отвору в якості обсадної труби, або ж із спеціальними трубами всередині прокладеного футляра. При­від шнека відбувається за допомогою установки з механічним приводом від електромоторів, гідромоторів або двигуна через редуктори. Переміщення здій­снюється за рахунок м'язової сили, зубчатих рейок і гідромоторів або гідроци-

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

ліindrів, а орієнтування осі майбутнього отвору проводиться за допомогою попереднього прицілювання або керованого пілотного отвору, який прокладається за допомогою локаційного обладнання. Основним недоліком горизонтально-шнекового буріння є великі витрати на підготовчі роботи та необхідність наявності набору шнеків для кожного наступного розміру.

При великих розмірах отвору виникає потреба у спорудженні робочої площадки з направляючими та штовхаючими рамами, що призводить до значного підвищення вартості робіт і робить цю технологію неефективною для малих діаметрів на коротких відстанях. Пілотна свердловина є першим етапом процесу утворення технологічної порожнини під час її формування. Діаметр пілотного отвору коливається в межах 60...120 мм.

Необхідне осьове зусилля на різець для його продавлювання в ґрунт можна визначити за формулою (розрахунки виконані для існуючої буро шнекової установки створеної та експлуатованої бригадою безтраншейних технологій фірми ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ», м. Дніпро), Н

$$P = \frac{[\tau_{zp}] \cdot S_k}{\cos \alpha / 2} = \frac{0,01 \cdot 10^6 \cdot 0,006}{\cos 30^\circ / 2} = 138,6 , \quad (2.30)$$

де  $[\tau_{zp}] = 0,1 \dots 0,3 \text{ МПа}$  – значення модулю пружності ґрунту [18-21];

$\alpha = 30^\circ$  – кут при вершині різця.

$S_k$  – площа бічної поверхні конуса пілота, м<sup>2</sup>.

$$S_k = \pi \cdot r \cdot l = 3,14 \cdot 0,035 \cdot 0,125 = 0,006, \quad (2.31)$$

де  $r = 35 \text{ мм}$  – прийнятий радіус оголовка пілота;

$l = 125 \text{ мм}$  – довжина бічної поверхні конуса оголовка пілота, мм.

Нормальну силу, на поверхню пілота, визначимо за формулою, Н:

$$N = [\sigma_{zp}] A_{\text{шн}} = [\sigma_{zp}] \frac{\pi (d_{n.\text{сер}}^2 - d_{\text{сер}}^2)}{4} = 146 , \quad (2.32)$$

де  $d_{\text{сер}} = 63 \text{ мм}$  – середній діаметр пілота;

									ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						43

$d_{n.сер} = 70$  мм – середній діаметр оголовка пілота.

Силу тертя ґрунту по пілоту визначимо з врахуванням осьової сили, що діє на нього за співвідношенням:

$$F_{тр. зр-n} = \left( N + \frac{P}{\cos 30^\circ} \right) \cdot f_{n-зр} = 61, \quad (2.33)$$

де  $f_{n-зр} = 0,20 \dots 0,30$  – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі (табл. 1.5 [2]).

Визначимо крутний момент, що передає пілотний різець на привід установки за формулою:

$$M_{кр} = F_{тр. зр-n} \cdot \frac{d_{n.сер}}{2} \cdot k_3 = 61 \cdot \frac{0,070}{2} \cdot 2 = 43, \quad (2.34)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу, що враховує часткове тертя ґрунту по ґрунту.

Максимальну потужність, що передається на привід установки від обертання пілотного різця, визначимо за формулою з врахуванням максимально допустимої частоти обертання :

$$P_{n.p.} = M_{n.p.} \cdot \frac{3,14 \cdot n_{max}}{30} = 43 \cdot \frac{3,14 \cdot 70}{30} = 315, \quad (2.35)$$

де  $n_{max} = 180 \dots 200$  об/хв – діапазон частот обертання пілотного різця.

При горизонтальному бурінні шнековий робочий орган розглядається і розраховується як звичайний шнековий транспортер, що широко використовується в промисловості, на зернових елеваторах тощо.

Перед початком розрахунку задаємось наступними вихідними даними: довжина шнекового робочого органа  $L_{ш} = 2,0$  м , загальна довжина буріння  $L = 40$  м, діаметр шнекового робочого органу  $D_{ш} = 0,2$  м,  $D_{ш1} = 0,25$  м,  $D_{ш2} = 0,3$  м,  $D_{ш3} = 0,35$  м.

Крок гвинта шнека при горизонтальному бурінні приймається рівний діаметру шнека  $t_{ш} = D_{ш} = 0,2$  м [14].

Діаметр валу шнека можна знайти з співвідношення:

$$d_{ш} \approx (0,35 - 0,1) D_{ш} = (0,35 - 0,1) 0,15 = 0,038. \quad (2.36)$$

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Приймаємо  $d_{ш} = 34 \text{ мм}$ .

Частота обертання шнека повинна залежить від виду транспортуючого матеріалу та діаметру шнека – рекомендована, або залежить від типу приводу, що використовується. При бурінні важких неабразивних та мало абразивних матеріалів (сира глина, сирий пісок, земля перезволожена) максимальна частота обертання може бути визначена з співвідношення:

$$n_{ш} \leq n_{ш\max}, \quad (2.37)$$

$$\text{де } n_{ш\max} = \frac{30}{D_{ш}} = \frac{30}{0,2} = 150 \text{ об / хв.}$$

Рекомендована частота обертання шнека при бурінні глини, піску, землі згідно з [4, 5, 10] складає 20–100 об/хв. Враховуючи це, приймаємо  $n_{ш} = 70 - 200 \text{ об / хв}$ .

Об'ємна продуктивність шнеку дорівнює,  $\text{м}^3/\text{год}$ :

$$Q_v = 47 \cdot D_{ш}^2 \cdot n_{ш\max} \cdot \xi \cdot \psi \cdot c_{\beta} = 47 \cdot 0,2^2 \cdot 100 \cdot 0,25 \cdot 1 \cdot 0,9 = 42,3 \quad (2.38)$$

де  $\xi$  – емпіричний коефіцієнт, що визначається зі співвідношення:

$$\xi = \frac{t_{ш}}{D_{ш}} = \frac{200}{200} = 1, \quad (2.39)$$

$\psi$  – коефіцієнт заповнення поперечного перерізу шнека, що визначається в залежності від типу ґрунту. Приймаємо для важких мало абразивних ґрунтів  $\psi = 0,25$  [4],

$c_{\beta}$  – коефіцієнт, кута нахилу шнека до горизонту. При куті нахилу шнека  $\beta = 0 - 5^\circ$  приймаємо згідно з [4]  $c_{\beta} = 0,9$ .

Розрахункову масову продуктивність визначимо за формулою:

$$Q_p = Q_v \cdot \rho = 42,3 \cdot 1,6 = 67,9, \quad (2.40)$$

де  $\rho$  – щільність ґрунту. Приймаємо  $\rho = 1,6 \text{ т / м}^3$  [4].

Необхідна потужність на валу шнека визначається за формулою:

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$N_{ш} = k_3 \cdot \frac{Q_p \cdot L}{367} \cdot (\omega + \sin \beta) = 0,25 \cdot \frac{67,9 \cdot 40}{367} (2,5 + \sin 5^\circ) = 4,77, \quad (2.41)$$

де  $\omega$  – коефіцієнт опору руху шнеку, що вибирається в залежності від типу ґрунту. Приймаємо  $\omega = 2,5$  [4],

$k_3$  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність заповнення шнека в процесі буріння. Приймаємо  $k_3 = 0,25$ .

Визначимо крутний момент на валу шнека:

$$M_{кр.ш} = \frac{N}{n_{ш \max}} \cdot 9750 = \frac{4,77}{100} \cdot 9750 = 465. \quad (2.42)$$

Визначаємо діючу осьову силу:

$$P_{ш} = \frac{M_{кр.ш}}{r \cdot \operatorname{tg}(\alpha_{cp} + \rho)} = \frac{465}{0,075 \cdot \operatorname{tg}(23^\circ + 40^\circ)} = 3297, \quad (2.43)$$

де  $r_0$  – радіус прикладання осьової сили,

$$r_0 = (0,7 \dots 0,8) \frac{D_{ш}}{2} = (0,7 \dots 0,8) \cdot \frac{0,2}{2} = 0,08 \dots 0,07. \quad (2.44)$$

Приймаємо  $r_0 = 0,075 \text{ м}$ ,

$\alpha_{cp}$  – середній кут підйому гвинтової лінії;

$\rho$  – приведений кут тертя переміщуваного ґрунту по поверхні гвинта,

$\rho = 40^\circ$ ;

$$\alpha_{cp} = \operatorname{arctg} \frac{t_{ш}}{2 \cdot \pi \cdot r_0} = \frac{0,20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,075} = 23^\circ, \operatorname{tg} \alpha = 0,425, \quad (2.45)$$

Визначимо горизонтальну складову швидкості частки ґрунту при русі по шнеку:

$$v_z = v \cdot \frac{R \cdot \sin \alpha_R \cdot \sin \rho}{\sin(\alpha_R + \rho)} = \frac{100 \cdot 3,14}{30} \cdot \frac{0,1 \cdot \sin 23^\circ \cdot \sin 40^\circ}{\sin 63^\circ} = 0,295. \quad (2.46)$$

Визначимо максимально допустиму швидкість буріння:

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_{\max} = \frac{(R^2 - r^2)k_3 \cdot v_z}{K_1 \cdot K_2 \cdot R^2} = \frac{(0,1^2 - 0,017^2) \cdot 0,25 \cdot 0,295}{1,1 \cdot 1,2 \cdot 0,1^2} \cdot 60 = 3,26, \quad (2.47)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт розбурювання свердловини,  $K_1 = 1,1 \dots 1,2$ ;

$K_2$  – коефіцієнт розпушування ґрунту  $K_2 = 1,2 \dots 1,6$ . Враховуючи те, що буріння шнеком відбувається по ущільненому ґрунту після утворення пілотної свердловини приймаємо  $K_2 = 1,2$ .

Проведемо розрахунки для розширюючих частин шнеків розміром 250 мм, 300 мм та 350 мм які є в наявності шнекової бурової машини в арсеналі ТОВ «МБК»Сінергія». Транспортування відбувається шнеком розміром 200 мм.

Підставивши значення в формули (2.30)...(2.47) отримаємо потужність, що витрачається на роботу розширюючих конусів.

$$N_{n.p.250} = 252,7 \text{ Вт}; \quad N_{n.p.300} = 334,4 \text{ Вт}; \quad N_{n.p.350} = 426,3 \text{ Вт}.$$

$$\text{Сумарна потужність приводу } N_{n.p.0,2-40} = 4770 \text{ Вт}.$$

З отриманих значень бачимо, що сумарна потужність транспортування та копання ґрунту шнеками на довжину до 40 м не перевищить потужності приводу, що складає 12 к.с. або 8,8 кВт з урахуванням ККД приводу.

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

### 3. ВПЛИВ ЧАСТКОВОЇ ЕКСКАВАЦІЇ ҐРУНТУ З ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОРОЖНИНИ НА СИЛУ СТАТИЧНОГО РОЗШИРЕННЯ КОНУСНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

#### 3.1. Розширення горизонтальних порожнин

Окремо відмітимо використання в далекому минулому (5-7 років тому) горизонтального шнекового буріння у фірми ТОВ «МБК»СІНЕРГІЯ» для спорудження переходів методом забивання сталевих футлярів відкритим кінцем з наступним видаленням ґрунту з футляра. Такий спосіб дає можливість виконання робіт за допомогою пневмопробійників і пневмомолотів для труб діаметром до 500 мм та довжиною переходу до 40 м.

Оскільки таке обладнання є в наявності то періодично при виникненні труднощів зі статичним проколюванням або горизонтально спрямованим бурінням використовується комбінований метод статичного проколювання та видаленням частини ущільненого ґрунту з порожнини і подальшого розширення його конусним робочим органом та затягування футлярів. Такий спосіб дає можливість зменшити вплив робочих органів на сусідні комунікації та поверхню ґрунту (розтріскування або руйнування) від переущільнення рис. 3.1. Минулого року було застосовано такий комбінований метод при спорудженні переходом на вулиці Калинова, м. Дніпро, оскільки глибина залягання комунікації була невелика до 1200 мм над майбутнім переходом знаходилися трубопроводи та асфальтне покриття, а під – знаходився дощовий колектор, обхід якого по низу був неможливий через проєкт та глибину залягання. Використання горизонтально спрямованого буріння ГСБ було обмежено територією та обмеженням зволоження ґрунту, що могло привести до просідання асфальтного покриття.

Аналізуючи варіанти статичного проколювання описаний у розділі 2.1 ми бачимо структурну зміну ґрунту після впровадження в нього конусного ро-

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бочого органу, а саме збільшення щільності від  $\rho_{np}$  природного, до  $\rho_{тв}$  твердого (щільність твердої фази – без пор). Важливо, що подальше ущільнення ґрунту не відбувається, а лишень переміщення його на певну відстань таким чином збільшуючи умовний діаметр робочого органу. Частково це питання вирішується застосуванням кільцевого робочого органу (розділ 2.3), що забезпечує вирізання переущільненої частини стінок отвору, таким чином збільшує пористість і дає можливість подальшого ущільнення стінок. Однак зазначимо, що такий спосіб в деякій мірі також впливає на поверхні стінок отвору ущільнюючи їх, особливо це спостерігається в процесі екскавації ґрунту з отвору шляхом видавлювання його поршнем. Ця недосконалість і значні робочі зусилля та витрати часу, обмежують використання даного способу при спорудженні міських комунікацій. Іншим варіантом екскавації переущільнення шару з порожнини отвору є використання бурових шнеків. Бурошнекове обладнання дає можливість інтенсивного викопування і одночасного транспортування породи з отвору без додаткового ущільнення його в стінки. Окрім того ріжуча частина шнекового робочого органу може бути більшого діаметра чим тіло шнека, що дасть можливість зруйнувати стінки і транспортувати їх на денну поверхню. Таким чином знизивши щільність ґрунту в зоні пружно-пластичної деформації ми можемо виконати подальше ущільнення.

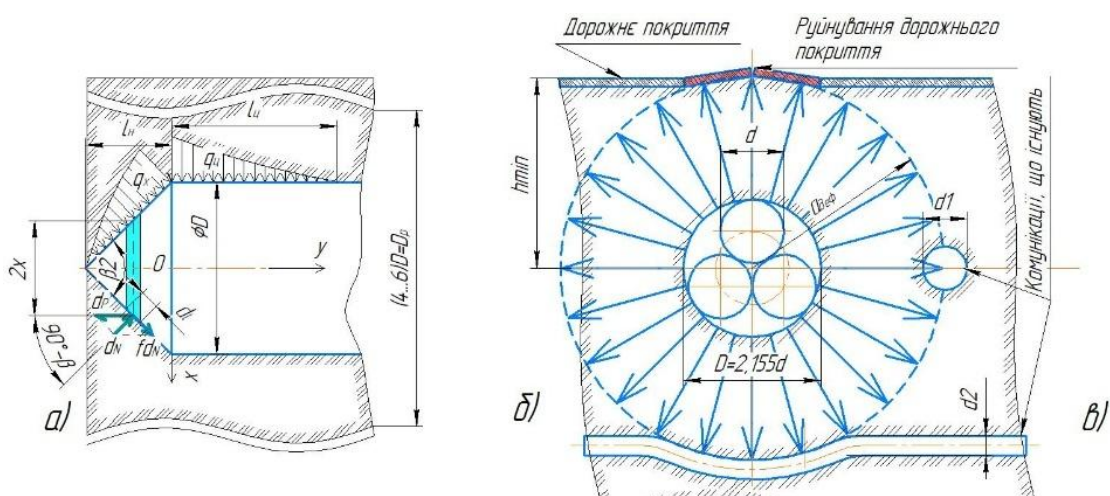


Рис. 3.1. розповсюдження зони структурних змін ґрунту в процесі спорудження підземної комунікації для групи футлярів.

						ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			49

Змінюючи вологість ґрунту за методиками описаними в роботі [18], змінюючи кут внутрішнього тертя ґрунту і коефіцієнт тертя робочого органу по ньому, що суттєво знизить зусилля проколювання, а також знизить вплив робочого органу на денну поверхню. Даний метод не працює у піщаних ґрунтах.

Характеристики розповсюджених типів ґрунтів приведені в таблиці 3.1. В складних випадках отримання великих отворів при невеликій глибині залягання процедуру можна повторити декілька разів послідовно розширюючи шнековим робочим органом технологічної порожнини до необхідних розмірів. Попередньо ущільнені стінки отвору збільшити його стійкість до обсіпання і дадуть можливість вільного прокладання футлярів.

Таблиця 3.1

Характеристика найбільш ймовірних типів ґрунтів

Тип ґрунту/ параметр	Твердий супісок	Напівтвердий суглинок	Тугопластична глина
Природна вологість, $\omega$ , %	10...14	17...20	25...30
Щільність твердої фази ґрунту, $\rho_{тв}$ , т/м <sup>3</sup>	2,7	2,7	2,73
Щільність ґрунту в природному стані, $\rho_{пр}$ , т/м <sup>3</sup>	2,05	2,1	2
Коефіцієнт зчеплення, $c$ , МПа	0,02	0,04	0,04
Кут внутрішнього тертя, $\varphi_0$ , град.	28	23	18
Кут зовнішнього тертя $\varphi$ , град	25	21	22
Коефіцієнт тертя ґрунту по РО (сталі) $f$	0,532	0,424	0,325
Питома вага у природному стані ґрунту $\gamma_{гр}$ , кН/м <sup>3</sup>	20,5	21,0	20,5
Несуча спроможність ґрунту, $q_{кр}$ , МПа	0,37	0,55	0,48
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,344	0,365	0,388
Коефіцієнт компресії, $c_k$ , МПа <sup>-1</sup>	1,08	1,73	2,81
Компресійний модуль, $E_{зр}$ , МПа	1,39	0,892	0,631
Модуль загальної деформації, $E$ , МПа	1,0	0,508	0,247
Модуль об'ємної деформації, $E_V$ , МПа	0,95	0,64	0,477

Сумарний опір заглибленню конусно-циліндричного наконечника дорівнює сумі сили лобового опору проколюванню та сили тертя на циліндричній частини наконечника

$$P_{\Sigma} = P_{\text{лоб}} + P_{\text{тр}} = \frac{\pi E_{\text{сп}} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1 \pi \lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_u - 0,2) q_3, \quad (3.1)$$

де  $\lambda = \frac{D_p}{D}$  – відношення діаметра зони пружно-пластичних деформацій до діаметра конусного наконечника рис. 3.1 та 3.2.

Для випадку конічного наконечника для  $n$ -футлярів, що прокладаються одночасно

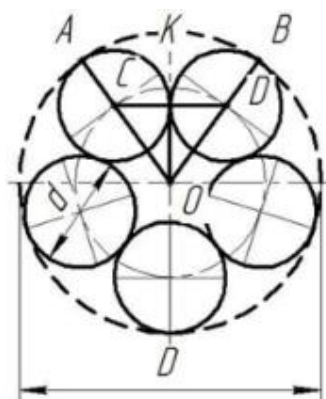


Рис. 3.2. Визначення діаметра отвору від кількості  $n$ -футлярів, що прокладаються одночасно

$$D = \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n}} \right) d. \quad (3.2)$$

Більш перспективними є процеси з використанням пілотного проколювання ґрунту та подальшого поступового розширення, а використання при цьому засобів керування траєкторією пілотного отвору сильно спрощує процес та знижує його вартість. Опір послідовного розширення технологічних порожнин після пілотного отвору  $d_n$  - форма отвору кругла, з урахуванням пружних (зворотних) деформацій ґрунту, можна визначити як різницю між повним і пілотним опорами проколювання ґрунту.

Для конусно-циліндричного РО

$$P_{пр.кон.} = \left[ \frac{\pi D_{рш.}^2}{8} E_{зр} (1 + fctg\beta_{кон}) \right] - \left[ \frac{\pi \left( d_{л}^2 - \frac{\sigma_1}{E_v} d_{л}^2 \right)}{8} E_{зр} (1 + fctg\beta) \right], \quad (3.3)$$

де  $d_{л}$  – діаметр пілотної свердловини, мм;

$\beta$  – половина кута при вершині пілотного конуса;

$D_{рш.}$  – діаметр розширюючого конуса, мм.

Для побудови прийемо [3, 5, 9-11, 18]:  $2\beta = 40^\circ$  – подвійний кут при вершині конуса; – розмір пілотного РО  $d_{л} = 0,08$  м; – довжина РО  $l_{ц} = b_{н} = 0,3$  м; – кількість однакових футлярів, що прокладаються одночасно  $n=1\dots 5$  шт.; – глибина прокладання комунікацій  $h=1.5$  м; – діаметр футлярів 100 мм; – характеристики твердого супіску –  $\omega=10\%$ ,  $c=0,020$  МПа,  $\lambda=5,611$ ,  $E_{зр}=2,363$  МПа,  $a_q=0,05$ ,  $a_{def}=15,241d$ ; – характеристики напівтвердого суглинку -  $\omega=17\%$ ,  $c=0,04$  МПа,  $\lambda=4,174$ ,  $E_{зр}=1,071$  МПа,  $a_q=0,044$ ,  $a_{def}=8,21d$ ; – характеристики тугопластичної глини -  $\omega=23\%$ ,  $c=0,04$  МПа,  $\lambda=4,539$   $E_{зр}=0,818$  МПа,  $a_q=0,044$ ,  $a_{def}=9,80d$ ; – характеристики піску -  $\omega=6\%$ ,  $c=0,0$  МПа,  $\lambda=15,961$ ,  $E_{зр}=7,293$  МПа,  $a_q=0,075$ ,  $a_{def}=86,8d$ .

Побудуємо графіки  $P_{\Sigma прк.}$  сумарної сили проколювання ґрунту РО конусно-циліндричного РО в залежності від кількості футлярів, що прокладаються одночасно та типу ґрунту (рис. 3.3.). без екскавації ґрунту.

Суттєве збільшення сили проколювання наконечником традиційної конусно-циліндричної форми при отриманні технологічної порожнини для 2 футлярів пояснюється збільшенням розміру отвору в два рази.

									ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
										52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Якщо розширення не можливо провести за один перехід то його повторюють декілька разів для отримання мінімальної сили проколювання (яку може забезпечити робоче обладнання або з умов не руйнування опорних стінок приямків), при цьому в формули послідовно підставляємо відповідні значення, або послідовно підставляємо їх значення замість параметрів пілотного робочого органу.

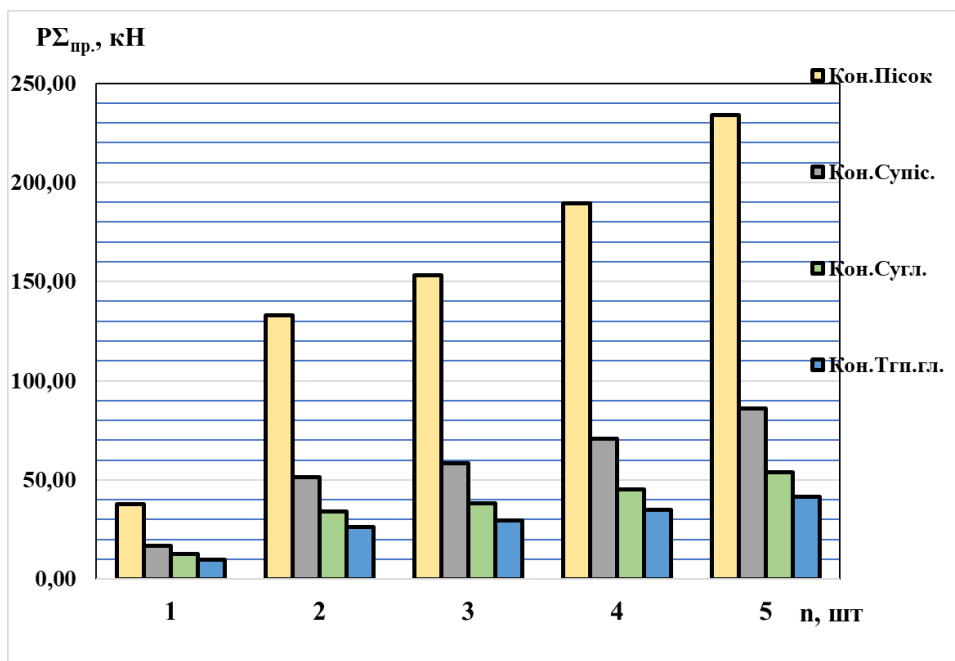


Рис. 3.3. Вплив кількості футлярів на сумарну силу **проколювання** технологічної порожнини, при діаметрі футлярів 100 мм та кількості –  $n=1 \dots 5$  шт, довжина РО – 300 мм, діаметр пілотного РО  $d_{\pi} = 0,08$  м, глибина прокладання комунікацій  $h=1.5$  м: Кон.Супіс. – конусно-циліндричний РО, твердий супісок; Кон.Сугл. – конусно-циліндричний РО, напівтвердий суглинок; Кон.Тп.гл. – конусно-циліндричний РО, тугопластична глина; Кон.Пісок. – конусно-циліндричний РО, пісок.

Для порівняння побудуємо графіки  $R_{\Sigma рши.}$  зусилля проколювання та поступового розширенні технологічної порожнини наконечником, що послідовно збільшує свої розміри на один футляр (рис. 3.4).

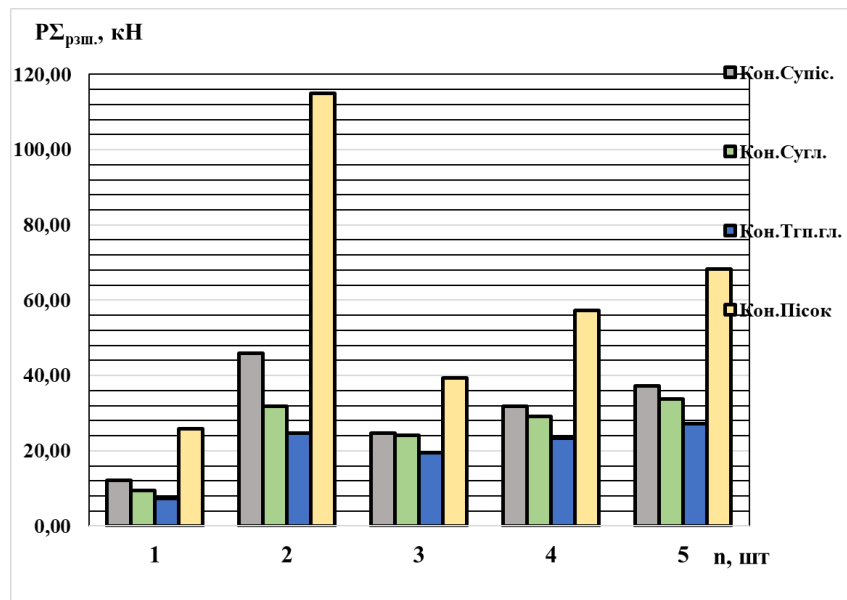


Рис. 3.4. Вплив кількості футлярів на сумарну силу розширення технологічної порожнини, при діаметрі футлярів 100 мм та кількості –  $n=1\dots5$  шт, довжина РО – 300 мм, діаметр пілотного РО  $d_{л} = 0,08$  м, глибина прокладання комунікацій  $h=1.5$  м: Кон.Супіс. – конусно-циліндричний РО, твердий супісок; Кон.Сугл. – конусно-циліндричний РО, напівтвердий суглинок; Кон.Тп.гл. – конусно-циліндричний РО, тугопластична глина; Кон.Пісок. – конусно-циліндричний РО, пісок.

### 3.2. Розширення горизонтальних порожнин з частковою екскавцією ґрунту шнеком

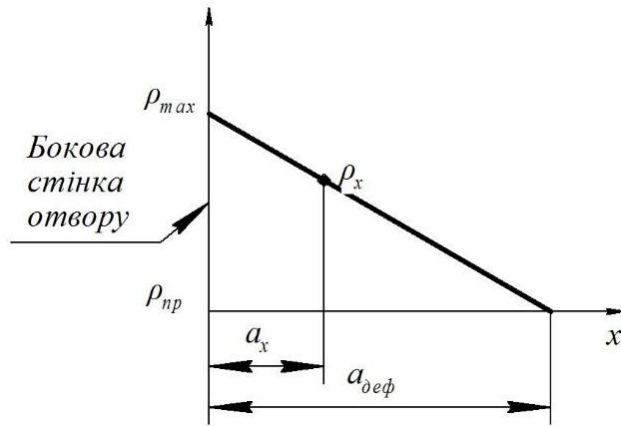
Для забезпечення потреб міста в прокладанні комунікації великих габаритних розмірів при мінімальній глибині прокладання та високий насиченості сусідніми комунікаціями, а також у стіснених умовах виникає необхідність розробки нових технологій спорудження підземних переходів. Перспективним напрямком є поєднання уже існуючих технологій, що дасть можливість знизити робочі зусилля та вплив на ґрунт і сусідні комунікації. Проведені практичні дослідження по поєднанню статичного проколювання з частковим розширенням порожнини та подальшим шнековим вибурюванням частини об'єму



Прийнята закономірність зміни щільності показана на рис. 3.6:

$$\rho_x = \rho_{np} + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}}\right) (\rho_{max} - \rho_{np}), \quad (3.5)$$

де  $\rho_{max}$  – максимальна щільність ґрунту в боковій стінці отвору.



**Рис. 3.6.** Прийнята закономірність зміни щільності ґрунту

З урахуванням (3.4) рівність (3.5) перепишеться у вигляді:

$$\left(a_{деф} + \frac{d}{2}\right) \rho_{np} = \int_0^{a_{деф}} \left[\rho_{np} + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}}\right) (\rho_{max} - \rho_{np})\right] dx = \frac{\rho_{max} + \rho_{np}}{2} a_{деф}. \quad (3.6)$$

Величину середньої щільності  $\frac{\rho_{max} + \rho_{np}}{2} = \rho_{сер}$  після ущільнення ґрунту визначено в роботі [18]:

$$\rho_{сер} = \frac{\rho_{np}}{1 - 1/\lambda^2}, \quad (3.7)$$

де  $\lambda$  – характеризує величину зони пружно-пластичних деформацій ґрунту і залежить від типу ґрунту і глибини, на якій здійснюється деформування:

$$\lambda = \frac{\left(\gamma_{зр} h + \frac{c}{tg\varphi_0}\right) tg^4\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\sigma_1}. \quad (3.8)$$

Тоді

$$a_{def} = (\lambda^2 - 1) \frac{d}{2} = \left[ \frac{\left( \gamma_{np} h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right)^2 \operatorname{tg}^8 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (3.9)$$

Для невагомого зв'язного середовища ( $\gamma h = 0$ ,  $c \neq 0$ ):

$$a_{def} = \left[ \frac{\frac{c^2}{\operatorname{tg}^2 \varphi_0} \operatorname{tg}^8 \left( \frac{\pi}{4} + \varphi_0 \right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (3.10)$$

Якщо прийняти, що  $\lambda = 5,4 \dots 6,0$  – для твердого супіску;  $\lambda = 4,3 \dots 4,8$  – для напівтвердого суглинку;  $\lambda = 4,0 \dots 4,3$  – для тугопластичної глини [1], тоді середня щільність ґрунту в пружно-пластичній зоні дорівнює: для твердого супіску –  $\rho_{сер} = (1,03 \dots 1,04) \rho_{np}$ ; для напівтвердого суглинку –  $\rho_{сер} = (1,05 \dots 1,06) \rho_{np}$ ; для тугопластичної глини –  $\rho_{сер} = (1,06 \dots 1,07) \rho_{np}$ .

За експериментальними даними виробничих випробувань безтраншейних дреноукладачів, які працюють з утворенням закритичної зони  $\rho_{сер} = (1,05 \dots 1,08) \rho_{np}$  [18, 20, 21].

Для приведеної середньої щільності ґрунтів величина зони їх деформування складає:

для твердого супіску –  $a_{def} = (14,0 \dots 17,5) d$ ;

для напівтвердого суглинку –  $a_{def} = (8,7 \dots 11,0) d$ ;

для тугопластичної глини –  $a_{def} = (7,5 \dots 8,7) d$ .

Визначимо тиск ґрунту на підземні комунікації, які потрапляють у зону дії пружно-пластичних деформацій:

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

$$q_x = \frac{1 + \omega}{c_k} \rho_{me} \left( \frac{1}{\rho_{np}} - \frac{1}{\rho_x} \right) = \frac{(1 + \omega) \rho_{me}}{c_k \rho_{np}} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left( 1 - \frac{x}{a_{деф}} \right) \frac{\rho_{max} - \rho_{np}}{\rho_{np}}} \right] =$$

$$= E_{zp} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left( 1 - \frac{x}{a_{деф}} \right) \left( \frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2 - 1} \right)} \right], \quad (3.11)$$

Побудовано графіки  $q_x$  в залежності від відстані  $x$  від бокової грані конусу для твердого супіску, напівтвердого суглинку та тугопластичної глини (рис. 3.7).

Проаналізувавши результати отримані в розділах залежності 2.1-2.4 та 3.1, підставивши в формули (2.3), (2.5), (2.10), (2.12), (2.22), (3.1), (3.2) отримаємо графіки (рис. 3.7) залежності питомого нормального тиску на поверхні

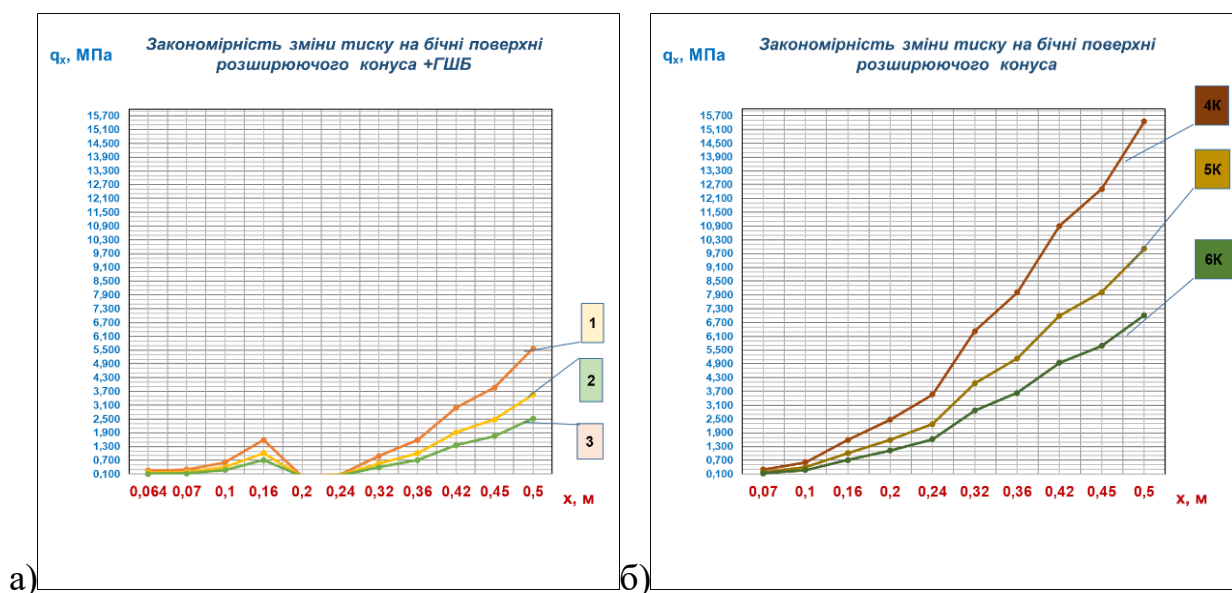


Рис. 3.7. Закономірність зміни тиску на бічній поверхні розширюючих конусів в різних видах ґрунтів: а) – з використанням ГШБ з160 до 240 мм; б) – поступове розширення конусами до 500 мм; 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

розширюючого конуса з урахуванням ГШБ шнекового вибурювання ґрунту з розміру 160 мм до 200-240 мм. В отриманому графіку видно суттєвий стрибок сили в районі 200 мм - осьова сила загалом відсутня тому, що ґрунт був викопаний шнеком. Для подальшого розширення протягується конус більшого розміру і бачимо що максимальний питомий тиск нижчий майже вдвічі в порівнянні з розширенням без екскавації частини ґрунту. Аналогічні графіки отримуємо для лобового зусилля проштовхування конусів, суттєве зниження осьового зусилля також пов'язане з екскавацією певного об'єму ґрунту рис. 3.8. Якщо додати до лобового опору третя ґрунту по поверхні робочого органу отримуємо сумарний опір переміщення.

Відмітимо, що відповідно до формул (3.2) (3.5) вплив деформації ґрунту на сусідні комунікації і денну поверхню також зменшиться, що дуже часто являється більш вагомою причиною використання горизонтального шнекового буріння чим зростання осьових зусиль. Осьові зусилля суттєво можна зменшити використанням бурових розчинів які дають змогу змінити вологість ґрунту і коефіцієнт тертя його по сталі, але зміна вологості мало впливає на деформацію поверхні ґрунту при неглибокому заляганні технологічної порожнини.

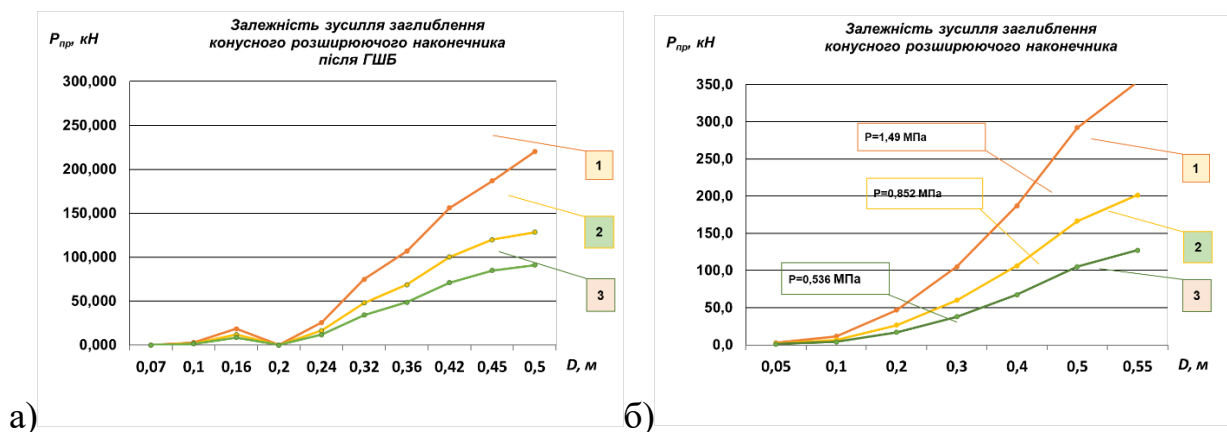


Рис. 3.8. Зміна лобового опору конуса на бічній поверхні розширюючих конусів в різних видах ґрунтів: а) – з використанням ГШБ з 160 до 200 мм; б) – поступове розширення конусами до 500 мм; 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відмітити отримання теоретичного визначення зони ущільнення ґрунту та впливу на підземні комунікації при його деформації конусним наконечником. Завдяки цьому була отримана можливість всебічної оцінки нової технології прокладання підземних комунікацій з застосуванням статичного проколу ґрунту та шнекової екскавації його з забою. Критерієм порівняння запропонованого способу з традиційним є сила опору ґрунту просуванню. Саме таке порівняння дає можливість отримати докази на користь комбінованого способу. Отримані розрахунки сил опору ґрунту проколу також дають можливість визначитися з силовими параметрами установки та її конструктивними особливостями. Визначення тиску від пружно-пластичних деформацій на прилеглі комунікації в залежності від параметрів робочого органу та властивостей ґрунту дають можливість оцінити, наскільки близько до прилеглих комунікацій можна виконати прокол.

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## ВИСНОВОК

В роботі було розглянуто різні варіанти безтраншейних технологій, що використовуються для прокладання підземних комунікацій під перешкодами, надані короткі відомості про них, представлені переваги та недоліки кожного способу в умовах міста при суттєвому навантаженні від руху автомобілів та людей.

Проведено огляд можливо впливу робочих органів на ґрунт при безтраншейному спорудженні переходів найбільш використовуваними способами отримання технологічних порожнин в місті Дніпро. Проаналізовано сили статичного проколювання та впливу робочих органів на ґрунт і сусідні підземні комунікації, розглянуто варіанти ступінчатого розширення порожнини конусними робочими органами та частковою екскавацією ґрунту за допомогою кільцевих ножів та штовхаючого поршня, де було вказано на безперспективність використання такого способу на великих відстанях через повторне ущільнення вирізаного ґрунту в стінки отвору. Розглянуто вплив глибини прокладання та розміру робочих органів на сусідній комунікації та поверхню ґрунту або дороги, що показало суттєве обмеження статичного проколювання при мінімальній глибині залягання.

Визначення потужність приводу бурошнекового робочого органу для часткової екскавації частини переущільненого ґрунту з отвору на поверхню та подальшим розширенням стінок отвору конусним робочим органом. Комбінація статичного проколювання та вибурювання частини переущільнення у ґрунту показало суттєве зниження питомого тиску ґрунту на робочий орган, а як результат зниження впливу на комунікації та поверхню ґрунту.

Відмітимо, що дане дослідження ґрунтувались на результатах практичного використання такої комбінації бригадою безтраншейних технологій фірми ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ» влітку 2024 року.

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Anna Pridmore, Jim Geisbush, Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. Pipelines 2017: Planning and Design (553 - 563) Book set: Pipelines 2017.
2. Деркач, І. Л. Міські інженерні мережі: Навч. посібник / І. Л. Деркач. – Харків: ХНАМГ, 2006. – 97 с.
3. Кравець, С. В. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземно рухомих пристроїв: Монографія / С. В. Кравець, В. В. Кованько, О. П. Лук'яничук. – Рівне: НУВГП, 2015. – 319 с.
4. Машина для земляних робіт / підручник. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П. [та ін.]; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н., проф. С.В. Кравця. – Харків: ХНАДУ, 2014. – 548 с.
5. Наукові основи та практика створення мінімальноенергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті: монографія / С. В. Кравець, В. М. Супонев, О. П. Посмітюха, С. П. Балесний – Харків: – ХНАДУ, 2021. 304 с.
6. The advantages of the NO-DIG systems from TRACTO-TECHNIK. Electronic resource / (Germany) – 2021. – Access mode: <https://tracto.com/en/Products/grundodrill-the-new-generation>.
7. Najafi M. and Sanjiv Gokhale. (2021) Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal, Second Edition Hardcover. McGraw-Hill Education, – 544 p.
8. Vermeer. Pipeline Directional Drills. Electronic resource / (USA) – 2024. – Access mode: <https://www.vermeer.com/em>.
9. VERMEER. Електронний ресурс / (Україна) – 2024. – Режим доступу: <https://effis.com.ua/ustanovka-napravlenogo-bureniya-dlya-prokladki-inzhenerykh-kommunikatsiy/>

									ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						62

10. Poltavtsev, I. S. Integrated mechanization of construction of communication lines. / I. S. Poltavtsev, I. F. Lyakhovich, V. V. Orlov. - Kyiv: "Budivelnik", 1973. - 156 p.

11. Посмітюха, О. П. Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт / С. В. Кравець, О. П. Посмітюха, В. Н. Супонєв // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъёмно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование. – 2017. – Вып. 97. – С. 91–98. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmpm\\_2017\\_97\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmpm_2017_97_14)

12. Пат. 109838 Україна, МПК E21B10/44 (2006.01). Пристрій для безтраншейної прокладки інженерних комунікацій / Супонєв В.М., Балєсний С.П., Вівчар С.М. (Україна). Опубл. 12.09.2016. Бюл. № 17.

13. Установка МП-250. НВП «Газтехніка ЛТД» Електронний ресурс / (Україна) – 2024. – Режим доступу: [https://gaztehnika.prom.ua/ua/about\\_us](https://gaztehnika.prom.ua/ua/about_us)

14. Установка керованого проколу ґрунту МПК- 30- 100, ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ». Електронний ресурс / (Україна) – 2024. – Режим доступу: <https://msks.com.ua/ua/services/prokladka-inzhenernih-komunikatsiy-metodom-gsb/>.

15. HDD technology and methods of horizontal drilling rigs PERFORATOR. Electronic resource / (USA) – 2021: Access mode: <https://www.perforator.de/en/products/augerboring>.

16. Haupteinsatzgebiet BM 600 LS [Electronic resource]. – Режим доступу: <http://www.bohrtec.de>.

17. Пневмопробійник СО-144, СО-144А. Одеський завод "Будівельно-оздоблювальних машин" Електронний ресурс / (Україна) – 2024. – Режим доступу: <https://ukrbudova.biz/odesskiy-zavod-som/filter/parent=1076/>.

18. Посмітюха О. П. Створення та обґрунтування параметрів робочого органу для сумісного безтраншейного прокладання лінійнопротяжних об'єктів : Кандидатська дисертація, 05.05.04, Машина для земляних, дорожніх

									ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						63

і лісотехнічних робіт. м. Дніпро, 2023. 201 с. URL: [https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/Spec\\_VR\\_\\_d.64.059.05/2023/Posmitiukha/dis\\_Posmityukha\\_2023\\_v.pdf](https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/Spec_VR__d.64.059.05/2023/Posmitiukha/dis_Posmityukha_2023_v.pdf) (дата звернення: 10.01.2025).

19. Suponev, V. N. Study of the process of changing the state of the soil around a horizontal well after its formation by the method of static soil puncturing /V. N. Suponev, S. L. Khachatryan, V. I. Oleksin. // Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University. - Kharkov, KhNADU - 2016. - Issue No. 73, - P. 202-205.

20. Кравець, С. В. Теорія руйнування робочих середовищ: навчальний посібник / С. В. Кравець. – Рівне: НУВГП, 2008. – 124 с.

21. Terzaghi, K. Soil Mechanics in Engineering Practice / KARL TERZAGHI/ Germany – John Wiley & Sons, 1960. 507 с. ISBN-13: 978-0471853381

22. Posmituha, A. Determination of the size of the seal zone and the pressure of the soil on underground communications in the process of deformation of the soil by the wedge tip. Alexander Posmituha, Svyatoslav Kravets, Vladimir Suponyev, Yevhenii Kulazhenko // INDUSTRIAL AND TECHNOLOGY SYSTEMS. Published online: VOL 5, NO 1(43) (2018) p.11–16 DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146626> URL: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/146626/146478> (дата звернення: 09.01.2025).

23. Посмітюха, О. (2023). Теоретичне визначення сил розширення технологічної порожнини у ґрунті клиново-призматичними та конусно-циліндричними робочими органами. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. (2 (101)). DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.80.

24. Rudnev V.K., Suponev V.N., Oleksin V.I. Expansion of horizontal wells with annular knives. Energy saving. Energy. Energy audit.: Kharkiv. 2014 No. 4 (110). P. 72-77.

										ДІТ. 630000. 301. МРІЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							64

25. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V. A. Penchuk, V. K. Rudnev, N. V. Saenko, at all.// Magazine of Civil Engineering, 2015. №2. С. 100–107. Access Mode: doi: 10.5862/MCE.54.11.

26. Пат. 72790 Україна, МПК E02F5/18 (2006.01). Спосіб розширення горизонтальної свердловини / Олексин В. І., Супонев В. М., Каслін М. Д., Руднев В. К., заявник та патентовласник Олексин В. І., Супонев В. М., Каслін М. Д., Руднев В. К (Україна). № u201202507; заявл. 02.03.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. №16. – 4с.

27. Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену на напругу від 6 до 35 кВ. ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ». 2024. – 133 с.

28. Супонев В. М., Рагулін В. М., Кравець С. В. Визначення максимально допустимого діаметра свердловини за умови заданої глибини проходки методом статичного проколювання ґрунту. Вісник ХНАДУ, вип. 101, т. 2.: Харків, 2023, С.59-66. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.59

29. Державний будівельні норми України. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення (ДБН В.2.1-10-2009, СНиП 2.02.01-83). Затв. та введ в дію наказ від 02.08.2018 № 200 / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – Київ: Мінрегіону України, 2018. – 42 с.

30. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво: затв. та введ в дію наказом від 21.09.2015 № 234 / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України – Київ: Укрархбудінформ, 2015. – 112 с.

31. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.3-18:2007. Трамвайні та тролейбусні лінії. Загальні вимоги до проектування. Затв. та введ в дію наказом від 28.12.2007 № 401 / Мінрегіонбуд України – Київ: Укрархбудінформ, 2008. – 58 с.

					ДПТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

32. Супонев, В. М. Створення обладнання для розробки горизонтальних свердловин комбінованими способами статичної дії: монографія / Супонев В. М. Харків, ХНАДУ, 2018. 196 с.

33. Супонев В.Н. Визначення сили опору ґрунту при очищенні свердловини після її розширення кільцевим ножом. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 7 (248), Северодонецьк, 2018, С.82-87.

34. Rudnev V.K., Suponev V.N., Oleksin V.I. Minimum depth of horizontal wells for utility lines. Energy saving. Power engineering. Energy audit. 2013. No. 2. P. 34–40.

					ДІТ. 630000. 301. МРПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66