

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій  
Факультет «Транспортна інженерія»  
Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

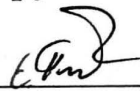
Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу

за освітньою програмою «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання»

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування

Виконав: студент групи: ПМ2221

  
\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

/ Єгор Плітка /

Керівник:

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

/Олександр ПОСМІТЮХА /

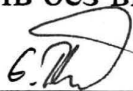
Нормоконтролер:

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

/Олександр ПОСМІТЮХА /

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

Студент

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дніпро – 2024

**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:

**Determination of the zone of influence of soil deformation on neighboring communications depending on the shape of the working body**

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

in the Speciality: 133 Industrial Engineering

Done by the student of the group: IIM2221 / Egor Plitka /



Scientific Supervisor:  / Oleksandr POSMITIUKHA /

Normative controller:  / Oleksandr POSMITIUKHA /

Dnipro – 2024

**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»  
(ступінь вищої освіти)

на тему: **Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу**

за освітньою програмою «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання»

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування

Виконав: студент групи: ПМ2221

\_\_\_\_\_ / Єгор Плітка /  
(підпис студента)

Керівник:

\_\_\_\_\_ /Олександр ПОСМІТЮХА /  
(підпис)

Нормоконтролер:

\_\_\_\_\_ /Олександр ПОСМІТЮХА /  
(підпис)

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

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Дніпро – 2024

**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:

**Determination of the zone of influence of soil deformation on neighboring communications depending on the shape of the working body**

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

in the Speciality: 133 Industrial Engineering

Done by the student of the group: IIM2221 / Egor Plitka /

Scientific Supervisor: / Oleksandr POSMITIUKHA /

Normative controller: / Oleksandr POSMITIUKHA /

Dnipro – 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Сергій РАКША  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»  
студенту Плітка Єгору Ігоровичу

1. Тема роботи: **Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу**

Керівник роботи: ПОСМІТЮХА Олександр Петрович, ст. викл.

затверджені наказом від \_\_\_\_\_ "02" грудня 2022\_ р. №1193ст \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи: 20.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Спосіб безтраншейного прокладання комунікацій – статичне проколювання, ґрунти – супіски, суглинки, глини, форма робочих органів – конусні, клинові

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

4.1 Огляд сучасних безтраншейних технологій для прокладання лінійно протяжних об'єктів 4.2 Теоретичні дослідження впливу робочих органів на ґрунт. 4.3 Експериментальні дослідження впливу робочих органів на підземні комунікації

5. Перелік графічного матеріалу: Графіки залежності сили проколювання від форми РО, Графіки тиску РО на ґрунт від форми РО, Графіки тиску РО на комунікації від форми РО, Графіки тиску РО на комунікації від вологості

6. Консультанти розділів роботи:

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

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд сучасних безтраншейних технологій для прокладання лінійно протяжних об'єктів	27.11-03.12.23	30%
2	Теоретичні дослідження впливу робочих органів на ґрунт	18-24.12.23	60%
3	Експериментальні дослідження впливу робочих органів на підземні комунікації	08-14.01.24	100%
4			
5			
6			

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Єгор ПЛІТКА

\_\_\_\_\_

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ПОСМІТЮХА

\_\_\_\_\_

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Кількість томів: 1

В записці всього 76 сторінок

---

---

Найменування роботи: **Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу.**

Ілюстрації: схем \_\_\_\_\_; рисунків 36;

графіків \_\_\_\_\_;

таблиць 10.

**Ключові слова:** ґрунт, статичний прокол, робочий орган, клин, конус, комунікації, тиск ґрунту, ущільнення, футляри.

### **Текст реферату:**

Метою кваліфікаційної роботи є проведення дослідження впливу форми робочого органу для статичного проколювання ґрунту, при прокладанні групи футлярів, на поверхню ґрунту та сусідні комунікації прокладені у масиві поряд.

Для досягнення поставленої задачі я скористався теорією описаною в роботах Кравця С.В., Супонєва В.М та Посмітюхи О.П. Використавши теоретичні викладки та лабораторний стенд провели практичне дослідження впливу форми робочого органу на комунікації та визначили величину зміщення щупів при проходженні робочого органу поруч. Дослідження показали, що переміщення контрольного щупа при використанні конічно-циліндричного робочого органу на 30% більша чим при клиново-призматичному наконечнику. Додатково спостерігається подальше зміщення контрольного щупа при збільшенні розміру конічно-циліндричного наконечника для прокладання більшої кількості футлярів, а з клиново-призматичними наконечниками - щуп не зміщується.

<b>ЗМІСТ</b>	
<b>ВСТУП</b>	<b>7</b>
<b>1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ БЕЗТРАНШЕЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОКЛАДАННЯ ЛІНІЙНО ПРОТЯЖНИХ ОБ’ЄКТІВ</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Безтраншейні технології - класифікація</b>	<b>8</b>
<b>1.1.1 Технологія горизонтально спрямованого буріння</b>	<b>11</b>
<b>1.1.2 Технологія горизонтально-шнекового буріння</b>	<b>14</b>
<b>1.1.3 Технологія статичного продавлювання ґрунту трубою</b>	<b>16</b>
<b>1.1.4 Технологія динамічного проколювання ґрунту</b>	<b>18</b>
<b>1.1.5 Технологія розкочування ґрунту</b>	<b>19</b>
<b>1.1.6 Технологія статичного проколювання ґрунту</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Особливості прокладання декількох футлярів</b>	<b>24</b>
<b>1.3 Аналіз теорій по дослідженню статичного проколу ґрунту</b>	<b>26</b>
<b>2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З ҐРУНТОМ</b>	<b>31</b>
<b>2.1 Обґрунтування форми та конструкції РО</b>	<b>31</b>
<b>2.2 Вихідні дані про ґрунтове середовище для дослідження РО</b>	<b>32</b>
<b>2.3 Визначення теоретичних сил проколювання ґрунту робочим органом</b>	<b>37</b>
<b>2.4 Визначення зони ущільнення та тиску ґрунту на сусідні підземні комунікації</b>	<b>48</b>
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ НА ПІДЗЕМНІ КОМУНІКАЦІЇ</b>	<b>56</b>
<b>ВИСНОВОК</b>	<b>69</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>70</b>

					<b>ДІТ. 630000. 309. КРПЗ</b>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		Плітка						
<i>Перевір.</i>		Посмітюха					6	77
<i>Реценз.</i>						УДУНТ, гр. ПМ2221		
<i>Н. Контр.</i>		Посмітюха						
<i>Затверд.</i>		Ракша						

## ВСТУП

В умовах сьогодення безтраншейні технології ремонту та спорудження підземних комунікацій є актуальні та перспективні, адже розкопування вулиць міст спричиняють затори та незручності для мешканців та вимагаю дорого вартісних робіт по відновленню дорожнього полотна та тротуарів. Окремо відмітимо – безтраншейні технології є безальтернативними при переході під водними перешкодами, та в охоронних зонах. При цьому враховуючи обмеження в території прокладання комунікацій слід приймати до уваги способи виконання робіт та їх вплив на сусідні комунікації, оскільки значна частина їх вже розміщена по траєкторії будівництва.

Зростання обсягів робіт з будівництва та реконструкції підземних комунікацій в Україні (особливо в міських умовах) вимагає вдосконалення технологій і відповідних їм засобів механізації. Одним з найбільш ефективних напрямків при цьому є безтраншейні технології – статичне проколювання ґрунту. Мінімальні габаритні розміри установки та мінімальний вплив робочих органів на масив сприяє швидкому розповсюдженню технології.

В роботі розглянуті питання впливу робочих органів статичного проколювання ґрунту на сусідні комунікації в залежності від типу ґрунту, його фізико механічних характеристик та форми наконечника робочого органу. Проведені дослідження тиск ґрунту на робочі органи та впливу форми на значення цих сил. Через тиск ґрунту визначимо силу з якою робочі органи впливають на денну поверхню, та комунікації, що розташовані поруч.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ БЕЗТРАНШЕЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОКЛАДАННЯ ЛІНІЙНО ПРОТЯЖНИХ ОБ'ЄКТІВ

## 1.1 Безтраншейні технології - класифікація

Останнім часом в містах відбувається інтенсивне будівництво будинків, парків, мостів і тощо, водночас з цим проводять модернізацію ремонт або будівництво нових підземних комунікацій, що забезпечують розвиток та розростання міст.

Основною проблемою будівництва підземних комунікацій є потреба розкопування ґрунту для подальшого розміщення там комунікацій, що викликає суттєві проблеми у містян. За для розв'язання цих проблем були прийняті державні науково-технічних «Енергетична стратегія розвитку України на період до 2030 року» (Постанова Кабінету Міністрів України №145-р від 15 березня 2008 р.) та «Концепція розвитку, модернізації та переоснащення газотранспортної системи України на 2009–2015 роки» (Постанова Кабінету Міністрів України №1417-р від 21 жовтня 2009 р.), а також правилами благоустрою території міст України.

Згідно з цими постановами, а також рішеннями прийнятими місцевими радами на території міста заборонено проводити прокладання підземних лінійно-протяжних об'єктів під дорогами та перешкодами відкритим або траншейним способом. Дана заборона сприяла стрімкому розвитку безтраншейних технологій, створення нових компаній та фірм які надають такі послуги.

Безтраншейні технології відомі у світі як TRENCHLESS TECHNOLOGIES, або NO-DIG, передбачають собою варіант виконання будівельних робіт для спорудження підземних комунікацій без розкопування доріг, парків, трамвайних та залізничних колій. Окремо слід зазначити використання безтраншейних технологій при переході річок та озер. Додатковою зазначу, що для виконання безтраншейних робіт часто маємо обмежений простір між перешкодами, та мінімальні території робочих майданчиків, в

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

місці прокладання комунікацій, що вимагає мінімальних габаритних розмірів машин, а це є позитивною рисою технології.

Найбільш часто в містах прокладають нові кабельні лінії оскільки водопровідні, каналізаційні та газові мережі вони вже існують і максимум - це вимагають ремонту, що також можна виконати безтраншейним способом і є окремим питанням безтраншейних технологій.

При спорудженні нових ліній зв'язку та електромереж ми стикаємося зі специфічною проблемою відсутності місця в підземному просторі оскільки всі комунікації електромереж проходять приблизно по одних і тих же маршрутах, тому, що живлення відбувається від одних і тих же електропідстанцій, що своєю чергою породжує додаткове питання сусідства комунікацій. Ці та інші проблеми спорудження, ремонту та модернізації ліній намагаються вирішити вчені в багатьох країнах світу тому придумано багато способів та методів безтраншейного прокладання лінійно-протяжних об'єктів.

Відмітимо, що особливістю прокладання електромереж та лінії зв'язку є наявність декількох лінійно-протяжних об'єктів (кабелів у футлярах) розташованих паралельно один біля одного і для зручності та захисту кабель розміщується у персональних трубах футлярах, інколи футлярів буває декілька - один спільний, в якому розміщується декілька персональних футлярів від двох мінімум до максимум зазвичай чотири або до 16 в лініях зв'язку. В якості футляру використовуються пластикові або сталеві труби з гладенькою або гофрованою стінкою зовнішній діаметр яких стандартизований. Особливо відмітимо, що прокладання сталевих футлярів докорінно відрізняється від прокладання пластикових - високими вимогами до прямолінійності отриманого отвору, що обумовлене високою жорсткістю сталеві труби й неможливістю зігнути її по необхідній траєкторії, а також необхідність витрати великої кількості часу на зварювання сталеві футляра з кусків, що збільшує час прокладання та висуває додаткові вимоги до отриманого отвору.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наші дослідження проведемо в напрямку можливості сусідства двох комунікацій з точки зору впливу робочого органу на ґрунт та комунікації які в ньому розташовані, що дасть змогу визначити наскільки близько можна розташувати ці комунікації.

В правилах улаштування електроустановок ПУЕ [2] прописано можливість сусідства кабельних ліній різної напруги та силу струму яку вони передають, а також типу кабелю який прокладається де вказана глибина прокладання, тип захисту кабельної лінії, розташування кабелів один відносно одного та відносно сусідніх комунікацій, варіант укладання кабельної лінії. При виконанні цих робіт траншейним або відкритим методом також чітко прописані правила розташування та захисту причому видно, що розташуватись ці комунікації можуть набагато ближче чим при безтраншейному способі. Окрім того ДСТУ який регламентує перетин комунікації з автомобільними, трамвайними та залізничними коліями передбачає мінімальну та максимальну глибину прокладання ліній. Окремо відмітимо порядок перетину електричних мереж з наявними газовими, водопровідними та каналізаційними мережами де вказано на якій глибині під яким кутом яким матеріалом футляра можна влаштувати перетин відповідних комунікацій.

В основному безтраншейні технології діляться на три великих групи: з екскавацією ґрунту; без екскавації ґрунту та комбінований метод.

До безтраншейних методів з екскавацією ґрунту відносяться: шнекове буріння - екскавація ґрунту шнековим робочим органом, горизонтально спрямоване буріння - розмивання ґрунту та ущільнення стінок буровим розчином з подальшим виносом на денну поверхню, мікротунелювання та продавлювання ґрунту сталюю трубою з відкритим кінцем при подальшій екскавації ґрунтового керна з труби желонками або конвеєрами.

До безтраншейних методів без екскавації ґрунту відноситься: статичне та динамічне проколювання й розкочування ґрунту, що передбачає утрамбовування ґрунту в стінки отвору з частковим переміщенням його від центру

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

отвору до периферії. В деяких випадках статичне проколювання може комбінуватися з вібраційною голівкою для інтенсифікації процесу ущільнення ґрунту.

Комбіновані методи вони поєднують в собі переваги перших двох методів, а саме переваги горизонтально спрямованого буріння - керованість процесу та статичного проколювання яке дозволяє за малих габаритних розмірів обладнання та робочої зони при мінімальному впливі на ґрунт отримати необхідний результат.

Використання футлярів передбачає отримання отвору, для їхнього прокладання, на 15-30% більшого за зовнішній діаметр труби-футляра. Футляр може бути виконаний зі сталевих труби, покритої захисним ізоляційним шаром або пластикової труби з гладенькою або гофрованою поверхнею, інколи використовують азбестоцементні або бетонні труби для захисту кабельних ліній, але вони отримали мінімальне розповсюдження через складність монтажу та крихкість під час експлуатації.

### **1.1.1 Технологія горизонтально спрямованого буріння**

Горизонтально спрямоване буріння (далі ГНБ) виникло в 60-х роках минулого сторіччя Сполучених Штатах Америки та призначалось для безтраншейного прокладання підземних комунікацій під річками, що суттєво спрощувало подолання труднощів, що виникали при спорудженні водогонів та кабельних ліній [3]. Спершу це були технології які передбачали отримання горизонтальної свердловини некерованим способом на невеликій відстані потім, з розвитком технологій, з'явилися локаційні системи які дозволили контролювати процес на глибині до 30 м та передавати сигнал на відстань до 3 км. ГНБ технології передбачають використання бурової машини, що складається з рами, що спрямовує, механізму обертання бурових штанг, подачу бурового розчину, закручування відкручування бурових штанг, контейнери для зберігання бурових штанг, пілотного бура, локаційної системи, механізму

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

приготування бурового розчину, механізму реновації бурового розчину та, за необхідності, механізму підтягування труб у футлярі. Через широку номенклатуру потреб установки горизонтально спрямованого буріння діляться на mini, midi, maxi, mega які дозволяють виконати отвори діаметром від 80 до 300 мм, від 100 до 600 мм, від 200 до 1200 мм аж до 2500 мм з довжиною переходу від 20 до 3500 м без виходу на денну поверхню, сила протяжки від 50 кН до 2500 кН (рис. 1.1-1.2, табл. 1,1) [4-6].



Рисунок 1.1. Установка ГНБ Vermeer класу midi

Перевагами даного способу є швидкість, надійність, якість виконання робіт, можливість керування траєкторіями, протягування футляра після останнього проходу робочих органів. Мобільність установки наявність ходового устаткування дає можливість швидкого переміщення вздовж робочого майданчика до наступного об'єкта швидкість виконання робіт з буріння може коливатися від п'яти до 150 м/год, використання бентонітових та полімерних сумішей дає можливість знизити сили тертя робочого органу по ґрунту як результат зниження енерговитрат на виконання буріння.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.2. Метод горизонтально спрямованого буріння: а) – пілотне буріння; б) – Розширення та затяжка футлярів; в) – Вузол приготування бурового розчину; г) – локаційна система.

Недоліком даного способу являється необхідність використання додаткового робочого обладнання у вигляді бурових pomp, місткостей для приготування бурових розчинів, використання бентонітових та полімерних матеріалів сильно здорожує метод, одним із суттєвих недоліків є використання великої кількості води, що збільшує вологість ґрунту під дорогою, а це своєю чергою міняє характеристики насипу в сторону зменшення навантажувальної здатності.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таблиця 1.1.

## Характеристики ГНБ установок по класах

Типорозмір	mini	midі	maxі	mega
Вага, т	до 7	до 7-25	до 25-60	більше 60
Момент на РО, кНм	7-13	15-30	30-100	більше 100
Сила тяги, кН	до 10	10-40	40-250	більше 250
Розмір комунікації				
діаметр, мм	до 250	600-800	800-1250	1250-2500
довжина, м	до 150	до 350	до 1200	до 3500
Штанги				
довжина, м	0,6-1,5	3,0-6,0	6,0-12,0	більше 12,0
діаметр, мм	45-63	63-90	90-200	більше 250
Подача бурового розчину, л/хв	25-100	100-300	300-1200	Більше 1500

З технологією горизонтально спрямованого буріння працює багато українських фірм, а саме в Дніпрі, Києві, Одесі, Харкові, Кропивницькому, Львові тощо [7-9].

### 1.1.2 Технологія горизонтально-шнекового буріння

Горизонтально-шнекове буріння ГШБ призначене для отримання горизонтальних отворів у ґрунті I-IV категорії, з твердими включеннями, під перешкодами на відстань від 10 до 100 м з екскавацією ґрунту в робочі приямки. Перевагами такого способу є можливість отримання отворів в переущільнених ґрунтах діаметром від 200 до 500 або ( 800-1800 мм) рис. 1.3-1.4, таблиця 1.2 [10].

Горизонтально-шнекове буріння - це безтраншейна технологія прокладання труб за допомогою гідравлічної домкратної установки, яка обладнана ріжучим інструментом, що обертається, запускається з робочого котловану з екскавацією розробленого ґрунту шнеком. Бурова шнекова установка дозволяє виконувати прокладання сталевих футлярів, бетонних та поліетиленових труб.

Для реалізації прокладання комунікацій методом ГШБ, необхідно два котловани: стартовий та приймальний, глибина яких нижча за глибину

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

прокладки футляру на 0,5-1,0 метра. У стартовому – монтується потужна домкратна станція, на яку розміщуються буровий механізм із трубами продавлювання рис. 1.3, [11-12]



Рисунок 1.3. Установка ГШБ в робочому напрямку з трубою

На першому етапі здійснюється підготовка робочого та приймального котлованів. На другому – проводиться спуск та монтаж ГШБ установки на направляючих в котловані. На третьому – йде прокладка трубопроводу, точний напрямок якого контролюється лазером. Далі завершення робіт. Шнек виводиться у приймальний котлован, а потім витягується у зворотній послідовності. Після чого зі стартового котловану витягують установку та шнеки рис. 1.4.

Завдяки спеціальній лазерній системі керування технологія горизонтального шнекового буріння дозволяє прокладати труби із заданим ухилом із високим ступенем точності, що особливо важливо при будівництві мереж самопливної каналізації.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

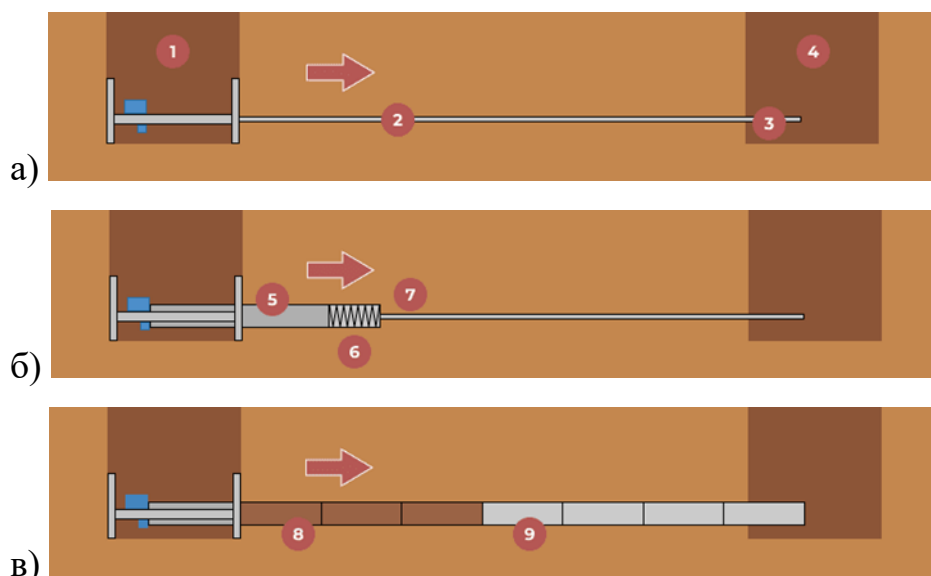


Рисунок 1.4. Технологія горизонтально-шнекового буріння: а) – Керуване пілотне буріння; б) – Продавлювання обсадної труби; в) – Продавлювання робочої труби із вилученням обсадної труби. 1 – стартовий котлован; 2 – пілотні штанги; 3 – керуюча головка; 4 – кінцевий котлован; 5 – сталева труба багаторазового використання; 6 – шнек; 7 – бурова головка; 8 – робоча труба, що прокладається; 9 – сталева труба багаторазового використання

### 1.1.3 Технологія статичного продавлювання ґрунту трубою

До групи технологій розробки горизонтальних свердловин з видаленням ґрунту на зовні, згідно з рис. 1.5, належать статичне продавлювання трубою з відкритим кінцем.

Статичне продавлювання, яке здійснюється шляхом заглиблення в ґрунт сталеві труби з відкритим кінцем та наконечником циліндричної форми з загостреними кромками, є одним з найпростіших та поширених методів з цієї групи, схема якого приведена на рис. 1.6, [12]. Завдяки тому, що радіальне ущільнення навколо свердловини виникає незначне, то безпечна відстань до поверхні дорожнього покриття та прилеглих комунікацій може бути значно меншою. Для створення процесу необхідні осьові зусилля, які повинні бути витрачені на подолання опору різання ґрунту загостреною кромкою наконечника, сил тертя ґрунту по зовнішній поверхні від переміщення труби та по

внутрішній від переміщення ґрунту. В певний час труба по мірі переміщення забивається ґрунтовим керном. Тоді її витягують та чистять по аналогії з роботою желонки та продовжують процес. Для видалення ґрунту також використовують шнеки.

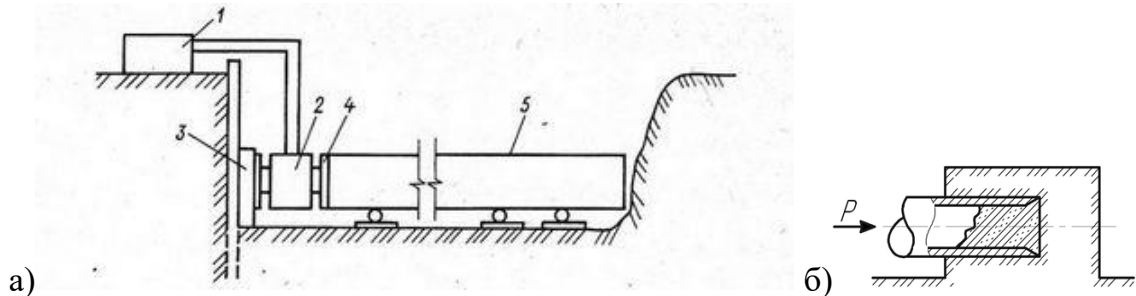


Рисунок 1.5. Статичне продавлювання ґрунту трубою: Загальний вигляд установки, б) – Взаємодія труби з ґрунтом. 1 – гідростанція; 2 – домкратний пристрій; 3 – Опорна площадка; 4 – перехідний стакан; 5 – труба.



Рисунок 1.6. Домкратні пристрої для продавлювання труб

Установки для протискування ґрунту використовують для прокладки труб діаметром від 0,5 до 2,0 м довжиною до 80 м. Протискуватися можуть різні за формою і матеріалом труби. Для прокладання залізобетонних труб на кінець труби закріплюється металеве різальне кільце. Установки для протискування мають більш потужні силові агрегати і пристрої, які дозволяють створювати зусилля подачі до 10 МН.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

### 1.1.4 Технологія динамічного проколювання ґрунту

Пневмопробійник складається з корпусу, ударника і шланга. Працює прилад в такий спосіб: стиснене повітря під тиском подається по шлангу в корпус, що призводить до зворотно-поступального переміщенню ударника. Він впливає на торець приладу, тим самим вганяючи його в землю. Діаметр необхідного отвори дорівнює діаметру корпусу рис. 1.7, [13-14].



Рисунок 1.7. Процес динамічного проколювання ґрунту: а) – пневмопробійник – «кріт»; б) – пневмопробійник з трубою в направляючій; в) – пневмопробійник з перехідними кільцями.

Для проходки свердловин у ґрунтах I–III категорій діаметром до 200 мм і забивання труб діаметром до 1600 мм призначені пневматичні саморушійні машини ударної дії – пневмопробійники (рис. 1.7-1.8), [15-16]. Незалежно від призначення пневмопробійники мають однакові принципи дії і систему повіторозподілення, однотипні реверсивні пристрої і розрізняються між собою розмірами і масою, енергією і частотою ударів, складом оснащення і пристроями.

При подачі стисненого повітря від компресора через рукав 6, клапан 5 і повітророзподільний пристрій 4, ударник 3 переміщається щодо корпусу 1 вліво. Потім відбувається зворотний хід ударника 3, наприкінці якого перекриваються отвори 4 повітророзподільного пристрою і ударник 3 за рахунок стиснутого повітря в камері, що утворилося між ударником 3 і клапаном 5, гальмується і потім розганяється вліво щодо корпусу 1. Відбувається робочий хід ударника 3 і створюється запас кінетичної енергії пропорційний масі ударника 3 і квадрату його швидкості. По закінченні робочого ходу ударник 3 ударяється об коваadlo 2 корпусу 1 і передає йому кінетичну енергію. Це дає можливість пневмопробійнику перебороти сили лобового і бічного опору і проникнути в ґрунт на деяку величину. Далі цикл повторюється [15].

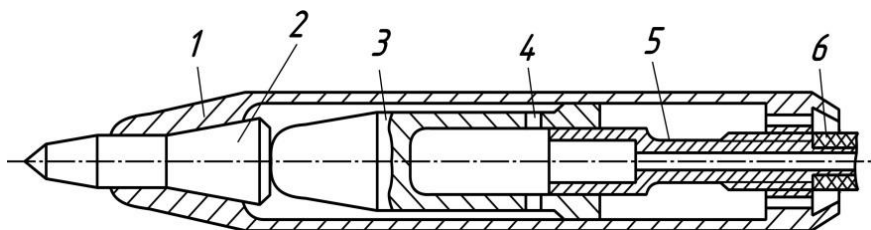


Рисунок 1.8. Конструктивна схема пневмопробійника: 1 – корпус; 2 – коваadlo; 3 – ударник; 4 – повітророзподільний пристрій; 5 – клапан; 6 – рукав для стисненого повітря

### 1.1.5 Технологія розкочування ґрунту

Метод розкочування – це процес формування циліндричної порожнини в ґрунті його деформацією за рахунок утрамбовування його в стінки розкатчиком (рис. 1.9) [15] в ґрунтах I–III категорій міцності. Таким методом можливе прокладання комунікацій діаметром до 400 мм на відстань до 10-100 м.

Розкочування свердловин 1 (рис. 1.9) забезпечується поєднанням обертання 2 (мотор-редуктор) і робочого органу 2, який жорстко з'єднаний з валом. Останній є консольний ексцентриковий 3, на шийках якого встановлені конічні котки 4, які повільно обертаються. Шийки валу і осі котків розвернуті під кутом  $\phi$  до повздовжньої осі валу. При обертанні котки валу перекочуються

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

по спіралі, центром якої є вісь робочого органу і загвинчуються у ґрунт та формують свердловину 1 з ущільненими стінками. Кут  $\varphi$  визначає крок загвинчування котка, тобто подачу робочого органу за один оберт ексцентрикового валу.

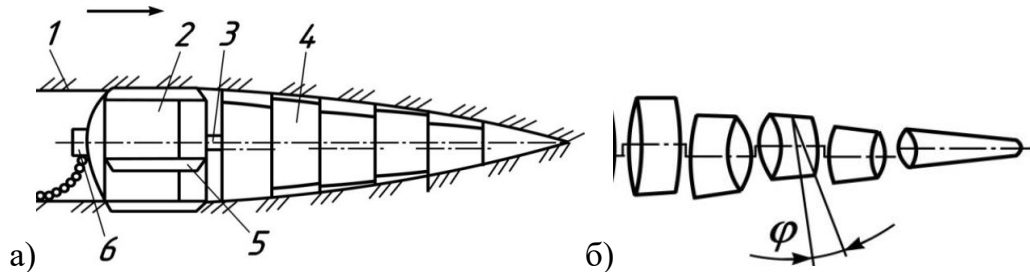


Рис. 1.9. Формування свердловин розкочуванням ґрунту: а – принципова схема; б – схема розвороту котків; 1 – свердловина; 2 – привод; 3 – ексцентриковий вал; 4 – конічні котки; 5 – ребра-ґрунтозачепа; 6 – кабель або гідравлічний шланг

Число котків на валу РО залежить від технології виконання робіт та довжини проходки. Привідний редуктор обладнаний ребрами 5 для сприйняття реактивного крутного моменту при обертанні валу робочого органу. Живлення приводу розкатчика здійснюється кабелем 6 або гідрошлангом високого тиску. Частота обертання валу розкатчика безступінчаста, регулюється у широкому діапазоні. Середня швидкість проходки свердловини у різних ґрунтах 1–10 м/год. Машини для розкочування екологічно безпечні, безшумні в роботі, не створюють динамічного навантаження на будівельні та комунікації, не шкідливі для здоров'я людини при обслуговуванні.

Установка забезпечує проходку горизонтальних свердловин діаметром 50–300 мм на відстань до 100 м. Комплектується набором розкатів, діаметром 50 ...300 м. Розглядаються напрями їх використання при створюванні вертикальних свердловин для наступного прокладання в них залізобетонних паль.

До недоліків методу відноситься наступне:

- розкатчик не слід використовувати поблизу інші комунікації, оскільки від ущільнення ґрунту може деформувати та пошкодити їх;
- складність конструкції вальців збільшує його вартість;

- для різних діаметрів комунікацій потрібні різні розкатчики;
- потрапляння ґрунту у підшипникові вузли крізь зазори призводить до їх зупинки, що викликає інтенсивне зношування;
- велика довжина робочого органу та відповідно маса розката.

### 1.1.6 Технологія статичного проколювання ґрунту

Установки, які працюють по методу статичного проколювання ґрунту, є одними з найпростіших та широко використовуються при прокладанні інженерних комунікацій діаметром до 300 мм на відстань – до 30 м.

Аналіз існуючих установок для проколювання ґрунту статичної дії різних виробників [17-19], що наведені на рис. 1.10, дозволив узагальнити їхні технічні параметри (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Основні параметри проколюючих установок

№ з/п	Найменування параметру	Од. вим.	Тип установки			
			МПК-30-100	МП-250	МК-ТБ-08	УПКТ-30
1	Керованість пілотного проколювання		Керована	Частково керована	Не керована	Не керована
2	Зовнішній діаметр штанги	мм	63,5	63,5	50	45
3	Довжина	мм	900	540	650	500
4	Кількість штанг в комплекті	шт	150	50	80	100
5	Діаметри конічних розширювачів	мм	80; 120; 150; 200; 280; 350	70; 108; 159; 190; 273	80; 108; 159; 190; 273; 350	80; 125; 190; 275; 350
6	Довжина ОТВОРИ У ґРУНТІ, до	м	100	25	50	50
7	Зусилля на штоках ГЦ: – при проколі; – при розширенні	кН кН	150 350	100 250	200 320	160 -200
8	Тиск гідростанції: ном тах	МПа	20 25	16 20	16 20	16 20
9	Швидкість проколу	м/хв	1	0,6	0,45	0,50
10	Маса установки	т	0,180	0,123	0,120	0,110



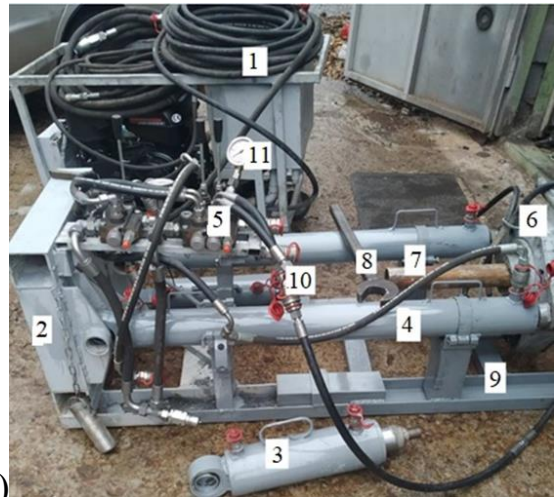
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.10. Установки для статичного проколу ґрунту провідних виробників: а) – УПКТ-30 установка прокольна котлованного типу; б) – установка для спрямованого проколу ґрунту МК-ТБ-08, (м. Кам'янка); в) – Установка МП-250 виробництва НВП «Газтехніка», (м. Харків); г) – Установки для керованого статичного проколу ґрунту МПК- 30- 100, ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ» (м. Дніпро). 1 – гідростанція; 2 – Рама; 3 – гідроциліндри 110; 4 – гідроциліндри 90; 5 – розподільники; 6 – редуктор обертання штанг; 7 – штанга; 8 – ключ 9 – подовжувач рами; 10 – швидкороз'єми; 11 – манометри.

Як видно з даних табл. 1.2 установки для статичного протоколу ґрунту мають відносно незначні габарити та вагу. Найбільш часто проколюючий став складається із штанг довжиною 500-800 мм та діаметром 42-63 мм. Виготовлюються штанги із сталюї труби або прутка. Швидкість проколу та осьове натисне зусилля визначається типом насосу та параметрами гідроциліндрів.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Для роботи установок необхідна пересувна гідравлічна станція, яка працює на базі гідравлічних насосів з витратами від 4 м<sup>3</sup>/хв до 32 м<sup>3</sup>/хв. Тиск робочої рідини складає до 12-20 МПа.

Аналіз технічних даних установок виявив тенденцію їх розвитку в напрямку зменшення габаритів і маси, що дозволяє використовувати їх без спеціальних вантажопідйомних та транспортних засобів, однієї з таких установок МП-250, виробництва науково-виробничого підприємства «Газтехніка ЛТД» наведена на рис. 1.11 [18]. Маса складає 123 кг, а сила тяги на РО сягає 25 т.



Рисунок 1.11. Установка МП-250 виробництва НВП «Газтехніка ЛТД»

Для роботи установок необхідна мобільна гідравлічна станція (рис. 1.10. в), яка працює на базі двигуна внутрішнього згорання та гідравлічних насосів з витратами від 4 л/хв до 45 л/хв. Тиск робочої рідини складає до 25 МПа. Аналіз технічних даних виявив тенденцію зменшення габаритів і маси, що дозволяє використовувати їх без спеціальних вантажопіднімальних та транспортних засобів. Наприклад, однієї з таких установок МПК-30-100, виробництва ТОВ «МБК СІНЕРГІЯ», м. Дніпро наведена на табл.1.2.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 1.2 Особливості прокладання декількох футлярів

Згідно з ДБН В.2.5 – 74: 2013. «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування» [20], ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012. «Настанова з будівництва, монтажу та контролю якості трубопроводів зовнішніх мереж водопостачання та каналізації» [21] та ДБН Б.2.2-12:2019. "Планування і забудова територій" [22], трубопроводи, що транспортують питну воду рекомендується розміщувати вище каналізаційних та технологічних трубопроводів на відстані не менше ніж 0,4 м.

При перетині мереж з іншими мережами та спорудами відстані по вертикалі (у просвіті) слід приймати не менше ніж [23 - 24]:

– між трубопроводами та автодорогами, залізничними або трамвайними лініями відстань між верхом трубопроводу та верхом дороги або підшовою рейок - 1,0 м при траншейному способі прокладання; 1,5 м - при безтраншейному методі виконання робіт; 2,5 м – окремо при проколюванні;

– між трубопроводами та силовими кабелями напругою до 35 кВ - 0,5 м згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) [2], між трубопроводами та силовими кабелями напругою 110 кВ – 330 кВ -1 м згідно з ПУЕ,

- між трубопроводами різного призначення (крім каналізаційних та технологічних трубопроводів з рідинами з неприємним запахом або отруйними) - 0,2 м.

В одному футлярі або тунелі допускається прокладання декількох трубопроводів, а також спільне розміщення трубопроводів та інших інженерних комунікацій (електрокабелів, кабелів зв'язку тощо).

Матеріал та товщина стінок футляра визначаються виходячи із забезпечення несучої здатності та безпеки експлуатації трубопроводів. Використання розтрубних труб допускається за умови фіксації поздовжніх переміщень. Трубопровід у футлярі необхідно об'ємно фіксувати, крок фіксації встановлюється проектом [21].

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Внутрішній діаметр футляра слід приймати в залежності від зовнішнього розміру комунікації, технології виконання робіт, довжини та траєкторії переходу.

Прокладання електричного кабелю та захисних елементів в ґрунті. Пучки одножильних кабелів повинні розміщуватися в землі на глибинах згідно з вимогами [2], вказаних в ПУЕ.

Траси кабельних ліній розміщуються уздовж автодоріг, або в межах смуги відводу, на землях несільськогосподарського призначення, на землях лісового фонду за узгодженням із власниками земель. У виборі траси необхідно дотримуватись вимог земельного законодавства України [24 - 30].

Внутрішній діаметр  $D_{труб}$  труби стосовно зовнішнього діаметра  $d_{каб}$  кабелю має бути (рис. 1.12) [31]:

- у разі прокладання в трубі одного кабелю.  $D_{труб} \geq 1,5 \cdot d_{каб} .;$
- у разі прокладання в трубі трьох кабелів  $D_{труб} = 3,0 \cdot d_{каб} .$

Глибина залягання, взаємне перетинання та розташування кабельних ліній регламентується в залежності від типу кабелю [2, 32], напруги, об'єктів з якими перетинається лінія та стану ґрунту в межах прокладання ліній і узгоджується з відповідними організаціями на етапі проектування лінії.

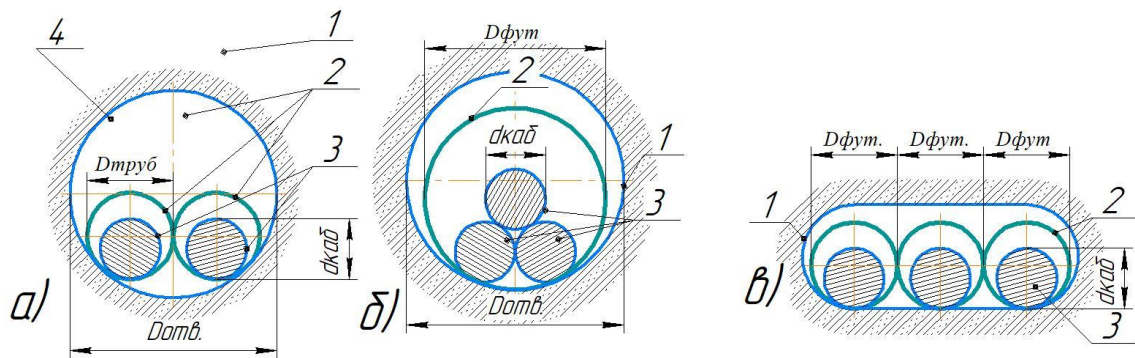


Рисунок 1.12 – Приклад прокладання кабелів у футлярах: а) – розташування одного кабелю в одному футлярі; б) – розташування трьох кабелів в одному футлярі; в) – розташування трьох окремих кабелів в окремих одинарних футлярах при напрузі до 35 кВ; 1 – ОТВОРУ порожнина отримана безтраншейним способом; 2 – футляри; 3 – кабелі; 4 – резервний футляр

### 1.3 Аналіз теорій по дослідженню статичного проколу ґрунту

Для розуміння процесів необхідно мати уявлення про теорії механіки та руйнування ґрунтів [33-35]. Проаналізовані дослідження відомих вчених в цій галузі, роботами [36-45] О.М. Зеленіна, М.Г. Домбровського, В.Л. Баладінського, В.І. Баловнєва, Ю.В. Вєтрова, А.М. Холодова, В.К. Руднєва, В.В. Нічке, Л.В. Назарова, Д.І. Федорова, Л.А. Хмари, С.В. Кравця тощо створені основи теорії різання та копання ґрунтів, використання яких вирішить питання щодо встановлення параметрів ріжучого та проколюючого обладнання.

Дослідженнями процесу проколу ґрунту конічними робочими органами статистичної дії займалися А.С. Вазетдінов, І.С. Полтавцев, В.К. Тимошенко, Н.І. Наумець, Ю.П. Кальнін, В.І. Конопльов, Н.К. Іпатов, В.В. Чижов, С.Г. Васильєв, В.Б. Орлов, С.Л. Хачатурян, Н.Є. Ромакін, В.М. Земсков і інші [42- 43, 45-48]. Нижче наведені деякі результати отримані цими вченими.

Існує часткова аналогія між процесами різання ґрунту і втисненням клиновидного робочого органу, яка підтверджується утворенням тіл ковзання [49]. При переміщенні в ґрунті перед робочим органом утворюється стабільне ядро ущільнення. Хоча середня щільність ядра приблизно рівна щільності ґрунту при гідростатичному зважуванні, розподіл її по висоті нерівномірний, про що свідчать різні швидкості поширення пружної поздовжньої хвилі при ультразвуковому дослідженні ядра [43]. Робота, що витрачається на створення ущільненого ядра, пропорційна його об'єму [57]. Ущільнене ядро утворюється як на поверхні клину, зверненої до відкритої сторони забою, так і на протилежній поверхні.

Фізичні основи утворення ґрунтових ядер ущільнення на ножах, штампах пал' й інших взаємодіючих з ґрунтом РО та їх вплив на процес проникнення описані в багатьох працях [40, 43, 48]. Характер розподілу епюр на підошві круглого штампа не залежить ні від глибини занурення, ні швидкості його переміщення (від 0,1 до 4,5 м/с) і відрізняється за формою розподілу (по

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

типу ґрунту): параболічна (незв'язні) і сідлоподібна (зв'язні). Ущільнене ядро утворюється не тільки під підшовою штампа, а й на бічних його поверхнях.

Головним недоліком існуючого обладнання, що реалізує метод статичного проколу – складність керування траєкторією руху РО, особливо в ґрунтах з різною щільністю.

Одним з перших фізику процесу проколу ґрунту досліджено А.С. Вазетдіновим [43], який вважав, що формування свердловини конічним РО відбувається деформацією кристалічної решітки, тобто твердих часток ґрунту ущільненням за рахунок зменшення пористості масиву. Максимальні напруження стиснення виникають в основі поверхні конуса, де утворюється зона найбільших структурних деформацій. Зона структурних деформацій буде збільшуватися до тих пір, поки всі тверді частинки з перетину свердловини не будуть витіснені в обсяг навколо свердловини. За зоною структурних деформацій слідує друга зона – зона пружних деформацій, що викликає звуження діаметра свердловини після проходження конусного робочого наконечника. А.С. Вазетдінов пропонує формулу для визначення зусилля, що виникає при проколі ґрунту

$$P = \frac{\sigma_r \pi R^2}{0,01n_0}, \text{ (Н)}, \quad (1.1)$$

де  $\sigma_r$  – середнє радіальне напруження, Па;

$R$  – радіус свердловини, м;

$n_0$  – первісна пористість ґрунту, %.

Тоді маємо, що зі збільшенням пористості ґрунту зусилля впровадження конусного робочого наконечника зменшується, однак, з практики відомо, що зусилля проколу в піщаних ґрунтах більші, ніж в глинистих ґрунтах. Крім цього, дана залежність не враховує вплив кута загострення конусного робочого наконечника, а також його тертя об ґрунт. Невідомим є також середнє радіальне напруження.

В.К. Тимошенко вивчав вплив форми і кута наконечника РО на силу проколу в різних ґрунтових умовах [37]. Було встановлено, що оптимальною

формою наконечника, є конус з кутом загострення 45–60°. Для визначення зусилля проколу ґрунту В.К. Тимошенко запропонована формула, яка враховує геометричні параметри конуса і кут зовнішнього тертя ґрунту

$$P = \pi R^2 \sigma_r \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_k}{2} + \varphi\right)}{\sin \frac{\alpha_k}{2}}, \quad (\text{Н}), \quad (1.2)$$

де  $\alpha_k$  – кут загострення конуса, град;

$\varphi$  – кут зовнішнього тертя ґрунту, град.

Слід зазначити, що в разі, коли  $\left(\frac{\alpha_k}{2} + \varphi\right) = 90^\circ$  визначити зусилля про-

колу за цією формулою стає неможливим і невідомо як у кожному випадку визначати  $\sigma_r$ .

Експериментальні дослідження по виявленню впливу кута загострення конусного снаряду на енергоємність при пробиванні свердловин в ґрунті проводили Гене В. М., Тимошенко В. К. [37, 39, 57]. У зв'язку з розробкою способу розробки свердловин під набивні палі в льосових ґрунтах були проведені експериментальні роботи з визначення оптимального кута загострення конуса з умови мінімальної витрати енергії при впровадженні його в ґрунт. Ними встановлено, що мінімальна енергоємність занурення конусних снарядів приходилась на кути загострення 60–90°. Найбільше питоме зусилля проколу при впровадженні конуса на всю його висоту зафіксовано при кутах 30° і 75°.

Опір впровадженню конічного наконечника в ґрунт І.С. Полтавцев [48] пропонує визначати з геометричних параметрів наконечника і зовнішнього кута тертя ґрунту  $\varphi$ , а контактні напруги, отримані дослідним шляхом, виражені через кут загострення наконечника  $\alpha_k$  і радіус основи робочого органу  $R$ , а тому ця формула може бути застосована тільки для тих ґрунтів, в яких проводилися експерименти. Отримана емпірична залежність для визначення опору ґрунту проколу має вигляд:

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P = \frac{25,2 \sin\left(\frac{\alpha_K}{2} + \varphi\right) \sqrt{R}}{\cos \varphi \cdot \sin \frac{\alpha_K}{2} \cdot \sqrt{\sin \frac{\alpha_K}{2}}} \pi R^2, \text{ (Н)}. \quad (1.3)$$

Для порівняльного аналізу викладених теорій щодо визначення зусилля проколу ґрунту можна порівняти їх розрахункові значення сил опору ґрунту проколу від діаметра свердловини з експериментальними даними, отриманими В.М. Земсковим [40, 43, 48, 57] при статичному проколі в глинистих ґрунтах загостреним конусним наконечником. Результати даного аналізу представлені у вигляді графіка, зображеного на рис. 1.13.

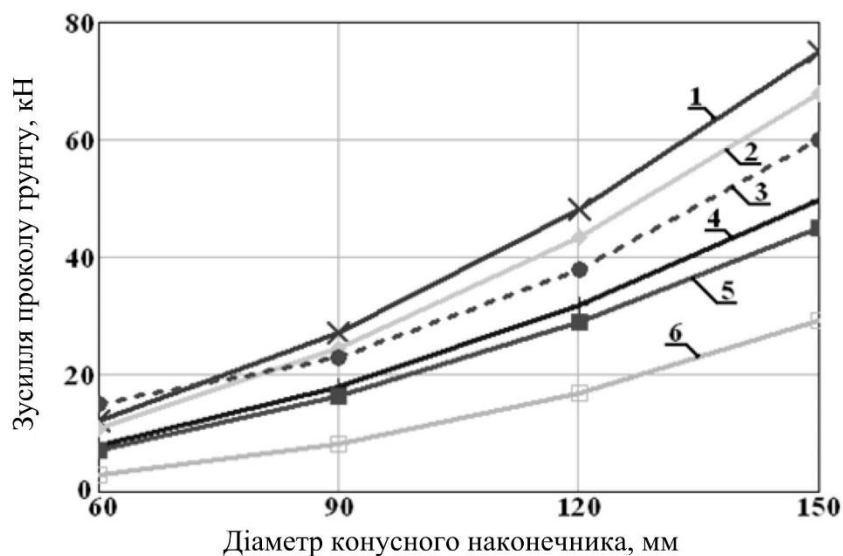


Рис. 1.13. Залежність зусилля проколу ґрунту від діаметра конусного наконечника: 1 – за формулою А.С. Вазетдінова; 2 – за формулою Н.Є. Ромакіна; 3 – експериментальні дані, отримані В.М. Земсковим; 4 – за формулою В.К. Тимошенко; 5 – за формулою С.Л. Хачатуряна; 6 – за формулою В.Б. Орлова

Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що залежності запропоновані А.С. Вазетдіновим, В.К. Тимошенко, Н.Є. Ромакіним і С.Л. Хачатуряном дозволяють з достатнім ступенем точності визначити зусилля, що виникають при проколі глинистих ґрунтів.

Визначенню руйнівального впливу на підземні споруди від ущільнення ґрунту навколо стержня, який занурюється у ґрунт займалися С.В. Кравець, Супонєв В.М., Посмітюхо О.П. та М. Asperger, В. Jeremic [55, 58]. Було встановлено, що навколо свердловин під час проколу ґрунту утворюються зони структурного деформування ґрунту. Потрапляння в ці зони фундаментів або прилеглих комунікацій може призвести до їх зміщення та пошкодження.

Для визначення пасивного тиску була застосована наступна залежність (1.4):

$$\sigma_{\text{пас}} = \gamma H \text{tg}^2 \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \text{tg} \left( 45 + \frac{\varphi}{2} \right) + \tau, \quad (1.4)$$

де  $H$  – глибина закладання труби;

$\gamma$  – питома сила тяжіння ґрунту;

$\varphi$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$c$  – коефіцієнт зчеплення;

$\tau$  – опір зсуву ґрунту:

$$\tau = (\gamma H \text{tg} \varphi + c) \text{ctg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right) H^2. \quad (1.5)$$

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З ҐРУНТОМ

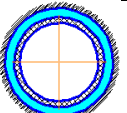
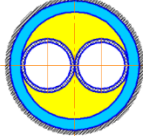
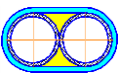
### 2.1 Обґрунтування форми та конструкції РО

Розглянемо фізичну модель процесу взаємодії робочого органу з ґрунтовим масивом при статичному проколі отворів [39, 42, 45, 48, 57]. Як показав аналіз теорій, горизонтальний прокол споріднений з процесом вертикального заглиблення паль, коли на нижньому кінці палі, утворюється ґрунтове ядро ущільнення, що створює додатковий лобовий опір. Джерела базуються на уявленні про зміну приведенного тиску ґрунту на поверхню конусної частини наконечника [48, 59] та базуються на прийнятій фізиці процесу й мають своє логічне обґрунтування. Очевидно змінивши форму поперечного перерізу отвору зміниться площа перетину, а відповідно і робота по його отриманню рис. 2.1.

Розглянемо варіант спорудження кабельної мережі для двох футлярів прокладених паралельно. Очевидно, що площа пустот (жовтим кольором) нічим не зайнята, але суттєво збільшує енерговитрати на спорудження.

Таблиця 2.1

Варіанти розташування комунікацій в ОТВОРИ У ҐРУНТІ

№ п/п	Схеми розташування футлярів в отворі	Площа отриманого отвору у ґрунті, см <sup>2</sup> , блакитний колір	Площа необхідного отвору, см <sup>2</sup> , круг по дотичній	Площа, що пустує, см <sup>2</sup> , жовтий колір
1		$S_{\Sigma III} = 5,98 \text{ см}^2$	$S_{nom} = 5,16 \text{ см}^2$	$S_n = 0 \text{ см}^2$
2		$S_{\Sigma III} = 24,03 \text{ см}^2$	$S_{nom} = 16,62 \text{ см}^2$	$S_n = 8,31 \text{ см}^2$
3		$S_{\Sigma III} = 12,33 \text{ см}^2$ Зменшення на $\Delta = 48,7\%$	$S_{nom} = 9,45 \text{ см}^2$ Зменшення на $\Delta = 43,2\%$	$S_n = 1,14 \text{ см}^2$ Зменшення на $\Delta = 86,3\%$

## 2.2 Вихідні дані про ґрунтове середовище для дослідження РО

Конструктивні та режимні параметри наконечників РО для формування отвори у ґрунті значною мірою визначається фізико-механічними властивостями, а отже для створення нових конструкцій або технологічних процесів, необхідно знати властивості ґрунтів і вичленити фактори, що підвищують ефективність взаємодії.

Ґрунтуючись на теоріях [31, 42, 45, 47, 48] опишемо та проаналізуємо теорію взаємодії РО з ґрунтом в процесі впровадження та проходження його по масиву. Процес статичного проколу ґрунту при формуванні отворів полягає в ущільненні ґрунту з природнього стану до переущільненого безпустотного, при незмінній масі, що вимагає додаткового розгляду фізико-механічних особливостей ґрунтів, в яких утворюється порожнини. Згідно з [31, 45, 47, 48, 50] раціональною областю використання методів проколу є малозв'язні ґрунти I-III категорії, з кам'янистим включенням не більше 50 мм та природною вологістю. В роботі [34, 35] проведені дослідження ґрунтів в різних регіонах України, що показали, що 80–85% складають такі ґрунти, які класифікуються по числу  $C_{y0}$  ударів щільноміра ДорНДІ, числу пластичності, вологості, відсотку глинистої фракції.

Ґрунт – це система, що складається з мінеральних частин, простір між якими певною мірою заповнено водою та повітрям [34-36, 38], їх властивості залежать від співвідношення твердої фази часток та діляться на: піщані, пилуві й глинисті. Суттєвий вплив на механічні властивості ґрунтів має відсоток глинистої фракції та води.

Зв'язність ґрунту показує результат взаємодії частин один з одним та водою, що підвищує силу їхнього деформування чи руйнування. Вологість та гранулометричний склад головним чином впливають на зв'язність ґрунтів. Піски належать до незв'язних, супіски - до малозв'язних ґрунтів. Суглинки та глини мають значну зв'язність мають тому вони належатимуть до зв'язних

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

[34-35, 38], це є зручним при розгляданні робочих процесів, пов'язаних з їх подальшою розробкою.

При проколі відбувається ущільнення ґрунту під навантаженням, яке значно перевищує структурну міцність ґрунту [16, 36, 43, 48 ], при дослідженні процесу приймається припущення, що ґрунт ізотропний та однорідний. При формуванні отворів напруження в ґрунті змінюється від нуля до максимального значення, тому стисливість характеризують компресійними кривими, які побудовані у вигляді залежності коефіцієнта пористості  $\epsilon$  від тиску  $p$  та запропонована К. Терцагі [34], С. В. Кравець та В. В. Кованько [45, 47].

Це стисливість ґрунту – зменшення коефіцієнта пористості  $\epsilon$  або здатність змінювати свою будову під дією зовнішніх. Опір зв'язних ґрунтів стискуванню в багато разів перевищує опір зсуву або розриву, при цьому зміна об'єму від стиснення є нелінійна функція. При лабораторних дослідженнях в компресійних приладах дає компресійну криву, що показує сумарну зміну об'єму пор внаслідок всіх навантажень, а об'єм ґрунту при зменшенні навантаження зростає, але не до початкового значення.

Основним показником (на думку С. В. Кравець та В. В. Кованько) стисливості ґрунтів є: коефіцієнт компресії  $c_k$ , модулі загальної  $E$  та об'ємної  $E_V$  деформацій, а також компресійний модуль  $E_{zp}$ , [16, 31, 45, 47, 48].

Коефіцієнт компресії ( $c_k$ ) – визначаємо через вологість ґрунту в природному стані  $\omega$  або границю текучості ґрунту  $\omega_T$  у відсотках [48, 50, 60, 66].

$$c_k = 0,1\omega, \text{ або } c_k = 0,07...0,09(\omega_T - 10). \quad (2.1)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу прямої до горизонтальної осі, тангенс ( $tg\alpha$ ), яка проведена через дві точки компресійної кривої

Компресійний модуль ( $E_{zp}$ ) визначається в лабораторних умовах, за результатами компресійних випробувань зразків ґрунту, та обчислюють за формулою [45, 47]:

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{zp} = \frac{(1 + \omega)\rho_{m\epsilon}}{c_k \cdot \rho_{np}}, \quad (2.2)$$

де  $\rho_{m\epsilon}$  – щільність твердої фази;

$\rho_{np}$  – щільність в природному стані.

Модуль загальної деформації ( $E$ ) визначається по кривій навантаження.

$$E = E_{zp} \cdot \beta_{\mu}, \quad (2.3)$$

де  $\beta_{\mu}$  – коефіцієнт, відсутності поперечного розширення ґрунту в компресійному приладі.

$$\beta_{\mu} = 1 - \frac{2\mu^2}{1 - \mu}, \quad (2.4)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Модуль об'ємної деформації ( $E_V$ ) характеризує всестороннє ізотропне у всіх напрямках (однакове та об'ємне) стиснення однорідного зразка ґрунту [45, 48].

$$E_V = \frac{1 + 2\xi}{3} E_{zp}, \quad (2.5)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт бічного тиску визначається за формулою Г. І. Покровського [45, 48].

$$\xi = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi_0 - \frac{1,52c}{q_{кр}}, \quad (2.6)$$

де  $\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя ґрунту;

$c$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

$q_{кр}$  – критичний тиск ґрунту за несучою спроможністю в основі штамп, що руйнує ґрунт шляхом зсуву та відділення від масиву при створенні отвору.

$$q_{кр} = \left( \gamma_{zp} h_3 + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left( 45^\circ + \frac{\varphi_0}{2} \right), \quad (2.7)$$

де  $\gamma_{2p}$  – питома сила тяжіння ґрунту;

$h_3$  – глибина прокладання отвору.

Коефіцієнти Пуассона та бічного тиску

$$\mu = \frac{\xi}{1 + \xi}. \quad (2.8)$$

Вибір числових значень фізико-механічних характеристик ґрунтів, що впливають на сили їх руйнування [34, 45, 47]:

перше - визначається природна вологість ґрунту;

друге - число пластичності;

третє - межа текучості та розкочування;

четверте - показник консистенції.

П'яте – тип ґрунту і його стан визначають за числом пластичності і показником консистенції.

Якщо вони відомі, то вибирають із таблиці значень ДБН коефіцієнт зчеплення  $c$ , кут внутрішнього тертя  $\varphi_0$  та щільність ґрунту  $\gamma_{2p}$  [47, 60].

Розроблена в НУВГП методика, що (Національний університет водного господарства та природокористування) [45, 47], дозволяє визначити необхідні показники, якщо відома тільки природна вологість ґрунту. Тоді тип ґрунту наближено визначаємо за природною вологістю ґрунту, яка знаходиться в межах: для глин –  $\omega = 25...35$  %; для суглинків –  $\omega = 15...25$  %; для супісків –  $\omega = 10...15$  %; для пісків –  $\omega = 7...10$  % [45, 47, 60].

Границі текучості і розкочування визначаємо за кореляційними залежностями А. М. Зеленіна [49]:

$$\omega_n = \omega_T - \omega_p, \quad (2.9)$$

$$\omega_n = \omega - 8, \quad (2.10)$$

$$\omega_T = 14,8 + 1,2\omega_n = 1,2\omega + 5,2, \quad (2.11)$$

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$B'_k = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_T - \omega_p} = \frac{0,8\omega - 13,2}{\omega - 8}. \quad (2.12)$$

За числом пластичності: глина –  $\omega_n > 17$ ; суглинок –  $\omega_n = 7...17$ ; супісок –  $\omega_n = 1...7$ .

Число ударів щільноміра ДорНДІ  $C_{y\delta}$  і вологість  $\omega$  ґрунту має залежність:

$$C_{y\delta} = ae^{-b\omega}, \quad (2.13)$$

де  $a$  і  $b$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від типу ґрунту: для глини  $a = 118,6$  і  $b = 0,11$ ; для суглинка –  $a = 50,2$  і  $b = 0,12$ ; для супіску –  $a = 28,6$  і  $b = 0,13$ .

Вихідні дані для найбільш ймовірних типів ґрунтів, що визначені за вище наведеною методикою, приведені в табл. 2.2 [60].

Таблиця 2.2

Характеристика найбільш ймовірних типів ґрунтів

Тип ґрунту/ параметр	Твердий супісок	Напівтвердий суглинок	Тугопластична глина	Ґрунт в лабораторії
Природна вологість, $\omega$ , %	10...14	17...20	25...30	6...12
Щільність твердої фази ґрунту, $\rho_{тв}$ , т/м <sup>3</sup>	2,7	2,7	2,73	2,66
Щільність в природному стані, $\rho_{пр}$ , т/м <sup>3</sup>	2,05	2,1	2	1,79
Коефіцієнт зчеплення, $c$ , МПа	0,02	0,04	0,04	0
Кут внутрішнього тертя, $\varphi_0$ , град.	28	23	18	39
Кут зовнішнього тертя $\varphi$ , град	25	21	22	42
Коефіцієнт тертя ґрунту по РО (сталі) $f$	0,532	0,424	0,325	0,582
Питома вага у природному стані $\gamma_{зр}$ , кН/м <sup>3</sup>	20,5	21,0	20,5	17,9
Несуча спроможність ґрунту, $q_{кр}$ , МПа	0,37	0,55	0,48	-
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,344	0,365	0,388	0,3
Коефіцієнт компресії, $c_k$ , МПа <sup>-1</sup>	1,08	1,73	2,81	0,082
Компресійний модуль, $E_{зр}$ , МПа	1,39	0,892	0,631	14,519
Модуль загальної деформації, $E$ , МПа	1,0	0,508	0,247	-
Модуль об'ємної деформації, $E_V$ , МПа	0,95	0,64	0,477	-

Під час заглиблення клиново-призматичного наконечника в ґрунт відбувається ущільнення в стінки отвору та його стиснення, яке обумовлюється змінною пористістю, або загальним об'ємом пор в ґрунті під дією напірної сили на РО. Зміна пористості в зоні заглиблення клиново-призматичного наконечника можлива тільки при зміні структури ґрунту, тобто при структурних деформаціях твердих частинок, їх переміщенні в радіальних напрямках від осі руху наконечника. Структурні деформації визначаються крайнім пружним станом, при якому порушується рівновага, що існує в структурі ґрунту.

### 2.3 Визначення теоретичних сил проколювання ґрунту робочим органом

Лобовий та сумарний опір клиново-призматичного наконечника, визначаємо виходячи з форми наконечника робочого органу (рис. 2.2), що складається з двох півконусів, які закінчуються півциліндрами та клина, в середній частині РО, що закінчується плоскою частиною та обрамлений з боків півциліндрами. Тоді для спрощення процесу визначення сили вдавлювання РО в ґрунт розділимо все на елементарні фігури: клин та конус.

Для визначення сили деформування ґрунту необхідно знати закон зміни нормального тиску на наконечник клиново-призматичної форми [31, 45, 47, 50-55] у залежності від деформації  $x$  та закон зміни його нормального тиску  $q_x^{кон}$  на конічний наконечник (рис. 2.1.) від  $x$ . Визначаємо його на основі компресійних кривих для ґрунтів, які можна наближено представити у вигляді лінійних залежностей [31, 45, 47].

$$e_x = e_0 - c_k q_x, \quad (2.14)$$

де  $e_x$  – змінний коефіцієнт пористості ґрунту в залежно від деформації;  
 $e_0$  – початковий коефіцієнт пористості ґрунту у природному стані;  
 $c_k$  – коефіцієнт компресії ґрунту.  
 Коефіцієнти пористості  $e_x$  і  $e_0$  [34, 35]

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$e_x = \frac{(1 + \omega) \rho_{m\epsilon}}{\rho_x} - 1, \quad e_0 = \frac{(1 + \omega) \rho_{m\epsilon}}{\rho_{np}} - 1, \quad (2.15)$$

$\rho_x$  – щільність ґрунту, що змінюється по висоті конуса.

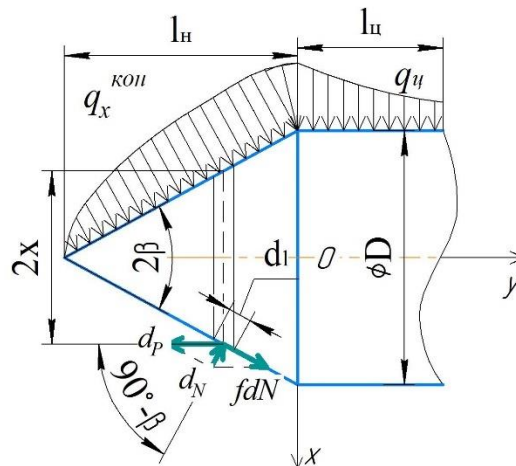


Рис. 2.1 – Взаємодія конічно-циліндричного наконечника з ґрунтом

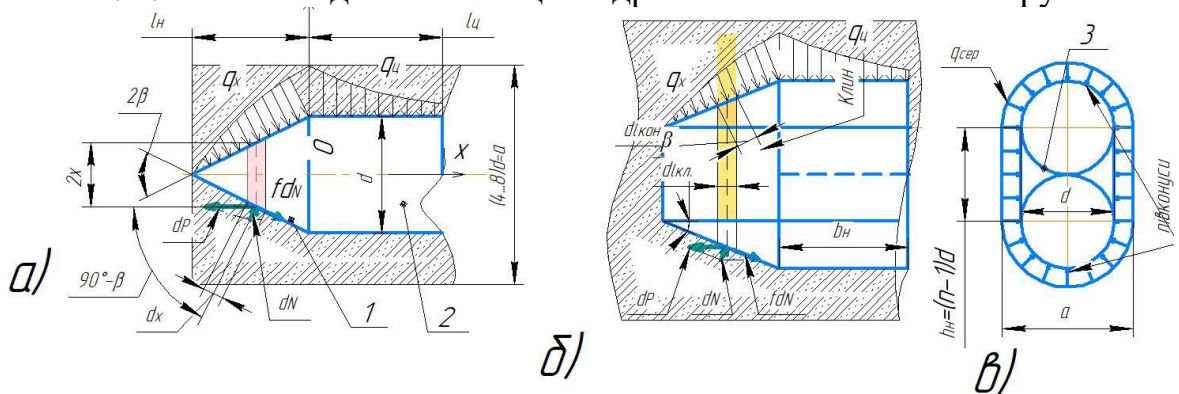


Рис. 2.2 – Взаємодія клиново-призматичного наконечника з ґрунтом: а) – наконечник РО клиново-призматичний - вигляд збоку; б) – наконечник РО - вигляд зверху; в) – розташування футлярів в робочому органі при протягуванні: 1 – проколююча – клинова частина з півконусами; 2 – частина, що калібрує; 3 – футляри

Опір впровадження клиново-призматичного наконечника (рис. 2.2.) в ґрунтове середовище складається з опору клину шириною  $h_{кл}$  та висотою  $d$  й опорів двох крайніх півконусів еквівалентних опорів одного конуса діаметром  $d$  [31, 50, 54-55].

Визначимо нормальний тиск ґрунту в кожному поперечному перерізі клиново-призматичного наконечника:

$$q_x^{кл} = \frac{(1 + \omega) \rho_{тв}}{c_k} \left( \frac{1}{\rho_{np}} - \frac{1}{\rho_x} \right). \quad (2.16)$$

Визначимо закон зміни щільності ґрунту по висоті клина, на основі закону рівності мас ґрунту до та після його деформації:

$$(n-1)d^2 \rho_{np} = (n-1)d(d-2x) \rho_x^{кл}, \quad (2.17)$$

Звідки

$$\rho_x^{кл} = \frac{\rho_{np}}{1 - \frac{2x}{d}}. \quad (2.18)$$

де  $d$  – діаметр лінійно-протяжного об'єкту (ЛПО);

$n$  – кількість ЛПО, які одночасно прокладаються;

$\rho_x^{кл}$  – змінна щільність ґрунту по висоті клинової поверхні, пропорційна зміні площі поперечного перетину робочого органу;

$x$  – деформація ґрунту лобовою поверхнею наконечника.

Тоді закон зміни нормального тиску ґрунту на лобову поверхню клиново-призматичного наконечника [31, 53] урахуванням (2.2) запишеться у вигляді:

$$q_x^{кл} = E_{zp} \frac{2x}{d}, \quad (2.19)$$

Визначимо закон зміни щільності ґрунту по висоті конуса (рис. 2.3.) на основі закону рівності мас:

$$\frac{\pi d^2}{4} \rho_{np} = \frac{\pi}{4} (d^2 - 4x^2) \rho_x^{кон}, \quad (2.20)$$

звідки

$$\rho_x^{кон} = \frac{\rho_{np}}{1 - (2x/d)^2}. \quad (2.21)$$

Знайдемо значення  $x$  із залежності (2.20), при якому ґрунт максимально ущільнюється до  $\rho_{тв}$ .

$$x^{кон} = \frac{d}{2} \sqrt{1 - \frac{\rho_{пр}}{\rho_{тв}}}. \quad (2.22)$$

Надалі ґрунт буде витіснятися за межі отвору. Для піщаних ґрунтів, що є сипучим середовищем зона максимального ущільнення розповсюджується навколо осі отвору ( $\rho_{зр} = \rho_{тв}$ ) на відстань  $d_{\rho_{тв}}^{кон}$ :

$$\frac{\pi d^2}{4} \rho_{пр} = \frac{\pi}{4} \left( \left( d_{\rho_{тв}}^{кон} \right)^2 - d^2 \right) \rho_{тв}. \quad (2.23)$$

Звідки

$$d_{\rho_{тв}}^{кон} = d \sqrt{1 + \frac{\rho_{пр}}{\rho_{тв}}}. \quad (2.24)$$

Відповідно до залежності (2.16 та 2.20) закон зміни нормального тиску на бічну поверхню конусної частини наконечника запишеться у вигляді

$$q_x^{кон} = E_{зр} \left( \frac{2x}{d} \right)^2. \quad (2.25)$$

Лобовий опір занурення клиново-призматичного РО, рівний опору від клину та двох півконусів, розмір двох крайніх півконусів еквівалентний опору одного конуса, а опір конусних РО відмінно описано в роботі В.М. Супонєва [42].

$$P_{кл.}^{лоб.} = P_{кл.} + P_{кон.}. \quad (2.26)$$

Визначимо опір клину:

$$dP_{кл.} = 2q_x^{кл.} \partial F \sin \beta (1 + f \cdot ctg \beta), \quad (2.27)$$

де  $\partial F$  – елементарна площа лобової поверхні клину ( $\partial F = \partial h \cdot \frac{\partial x}{\sin \beta}$ );

$2\beta$  – кут при вершині клинового наконечника;

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по РО.

Тоді

$$\partial P_{кл.} = E_{зр} \frac{4x}{d} \partial h \frac{\partial x}{\sin \beta} \sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta), \quad (2.28)$$

$$P_{кл.} = E_{зр} \frac{4h_{кл.}}{d} (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \beta) \int_0^{d/2} x \partial x = \frac{d \cdot h_{кл.}}{2} E_{зр} (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \beta). \quad (2.29)$$

Підставивши параметри РО, що можна виміряти ( $d$ ,  $n$ ,  $\beta$ ), отримаємо:

$$P_{кл.} = \frac{(n-1)d^2}{2} E_{зр} (1 + f \operatorname{ctg} \beta). \quad (2.30)$$

Очевидно, що сумарний опір проколюванню складається з опорів клинової і конічної частин клиново-призматичного наконечника. Згідно з роботами [51, 52] теоретично визначений опір заглибленню конічного наконечника в ґрунт дорівнює:

$$P_{пр.кл.}^{лоб.} = P_{кл.} + P_{пр.кон.}, \quad (2.31)$$

Опір проколу конусних РО за [42, 45, 51-52] (Кравць С. В. та Супонев В. М.), для клиново-призматичного РО [53-54],

$$P_{пр.кон.} = \frac{\pi d^2}{8} E_{зр} (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \beta), \quad (2.32)$$

Остаточний опір для клиново-призматичного РО при  $n$  – футлярів, що прокладаються одночасно

$$\begin{aligned} P_{пр.кл.}^{лоб.} &= \frac{(n-1)d^2}{2} E_{зр} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + \frac{\pi}{8} d^2 E_{зр} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) = \\ &= d^2 E_{зр} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) \left( \frac{\pi + 4(n-1)}{8} \right). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Графік лобового опору клиново-призматичного РО від розміру футляру приведений на рис. 2.3.

Для побудови графіка залежності (рис. 2.3.) зусилля заглиблення клиново-призматичного наконечника вихідними даними для розрахунку були значення (табл. 2.2).

По всьому периметру корпусу клиново-призматичного наконечника РО діє бічний тиск ґрунту, який створює додатковий опір від сил тертя ґрунту по бокових стінках і заокруглених краях наконечника. Визначимо цей опір.

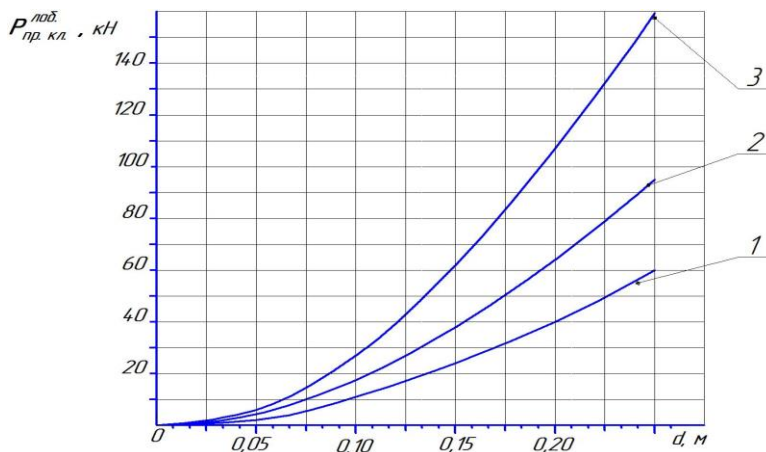


Рис. 2.3 – Залежність лобового опору клиново-призматичного наконечника від діаметра комунікацій, які прокладаються: 1 – тугопластична глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок

Середній тиск ґрунту на бокові стінки і краї клиново-призматичного РО, для одночасного прокладання об'єктів з урахуванням (2.6), дорівнює [15, 16, 45].

$$q_{сер} = 2c \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right) + \frac{a_q}{2} h. \quad (2.34)$$

де  $a_q$  – коефіцієнт пропорційності ( $a_q = \gamma_{зр} tg^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)$  МПа/м) [45];

$h$  – глибина розміщення наконечника (глибина укладання комунікацій).

Довжина периметра корпусу наконечника дорівнює

$$L_{пер} = 2(n-1)d + \pi d = d(\pi + 2n - 2). \quad (2.35)$$

Опір від сил тертя визначається через площу бокової поверхні наконечника та середній тиск дорівнює:

$$F_{тр.} = [\pi d + 2(n-1)d] b_H f \left[ 2c \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{a_q}{2} h \right]. \quad (2.36)$$

де  $b_H$  – довжина бокової поверхні наконечника.

Тоді сумарний опір від конусної та клинової частини наконечника буде мати вигляд:

$$P_{\Sigma кл.} = \frac{\pi + 4(n-1)}{8} d^2 E_{зр} (1 + f c \operatorname{tg} \beta) + [\pi d + 2(n-1)d] b_H f \left[ 2c \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{a_q}{2} h \right]. \quad (2.37)$$

Визначення лобового та сумарного опору наконечника традиційної конічно-циліндричної форми. Для виконання порівняння робочих зусиль визначимо зусилля приведеного лобового опору РО традиційної конічної форми, роботи Кравця С. В., Кованько В. В. та Супонєва В. М. [15, 45].

Для випадку конічного наконечника для  $n$  – футлярів, що прокладаються одночасно, формула (2.31) прийме вигляд

$$P_{пр.кон.}^{лоб.} = \frac{\pi}{8} \left( \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n}} \right) d \right)^2 E_{зр} (1 + f \cdot c \cdot \operatorname{tg} \beta). \quad (2.38)$$

де  $D$  – діаметр умовного кола яке описане навколо  $n$  – футлярів [45, 51, 52] рис. 2.4.

Розглянемо трикутники  $\triangle AOB$ ,  $\triangle COD$  та  $\triangle KOD$  (рис. 2.4). Кут  $\angle KOD = \frac{\pi}{n}$ , звідки

$$\sin \frac{\pi}{n} = \frac{KD}{OD}, \quad OD = \frac{KD}{\sin(\pi/n)} = \frac{d}{2 \sin(\pi/n)},$$

$$OB = OD + DB = \frac{d}{2 \sin(\pi/n)} + \frac{d}{2} = \left(1 + \frac{1}{\sin \pi/n}\right) d = D. \quad (2.39)$$

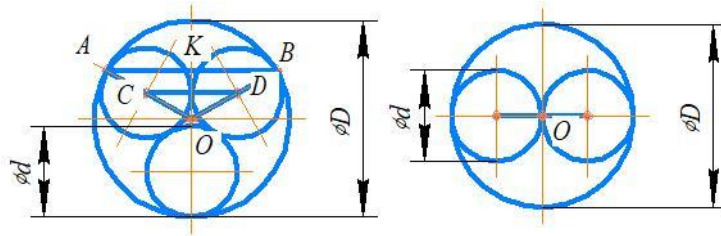


Рис. 2.4 – Визначення діаметра круглого отвору при груповому прокладанні  $n$ -футлярів

Тоді для будь-якої кількості футлярів:

$$D = \left(1 + \frac{1}{\sin \pi/n}\right) d. \quad (2.40)$$

Для побудови графіка залежності (рис. 2.5.) зусилля заглиблення конічної частини наконечника у тугопластичну глину, напівтвердий суглинок і твердий супісок від діаметра проколу вихідні дані аналогічні (даних див. рис. 2.3).

Визначимо силу тертя на циліндричній поверхні РО, для цього розглянемо процес проколювання в цілком. На першому етапі відбувається заглиблення конічної частини робочого наконечника до його основи, що переходить в циліндричну ґрунт перестає стискатись в радіальному напрямку, тоді при ( $t = 0$ ,  $y = 0$ ) в напруженому масиві встановлюється статична рівновага – це коли спостерігається не збільшення, а зменшення тиску з часом в результаті початку релаксації ґрунту. Такий стан описується в роботах [31, 45, 47]

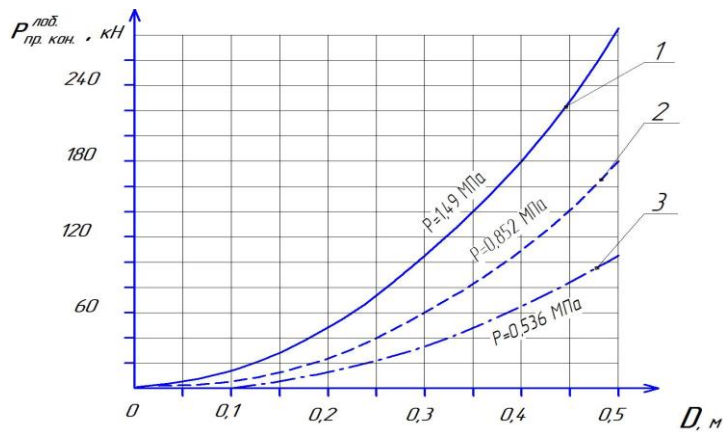


Рис. 2.5 – Залежність зусилля заглиблення конусної частини наконечника від діаметра: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

$$q_{\text{ц}} = q_{\text{ц}}^{\text{max}} \cdot e^{-\frac{E_V t_{\text{ц}}}{k_g}}, \quad (2.41)$$

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

$k_g$  – коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунту;

$t_{\text{ц}}$  – час контакту з ґрунтом циліндричної частини РО наконечника (

$$t_{\text{ц}} = \frac{y}{v});$$

$v$  – швидкість пересування наконечника.

$$q_{\text{ц}}^{\text{max}} = \frac{D_p}{D} \sigma_1, \quad (2.42)$$

де  $D_p$  – діаметр зони руйнування;

$\sigma_1$  – напруження на межі пружної і пластичної зон визначили Кравець С. В. і Кованько В. В. [45, 47]

$$\sigma_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} = \left| \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \right|, \quad (2.43)$$

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

В початковий момент часу  $t = 0$  в основі конуса наконечника діє максимальний контактний тиск (2.42). Якщо  $t > 0$ , то при  $E_V \gg k_g$  [45], тиск на циліндричній частині наконечника на довжині 10...20 см зменшується, за даними робіт Д. Н. Єшуткіна [16] до стабільної величини 0,016 ... 0,035 МПа, для розмірів циліндричної частини від 0,1 до 0,35 м, та зі збільшенням розміру залишковий тиск зростає. Тому якщо  $l_y \leq 0,2$  м,  $q_u^{cep} = \frac{D_p}{2D} \sigma_1$  – для лабораторних ґрунтів, а якщо  $l_y > 0,2$  м, то тиск у залежності від діаметра знаходиться у межах 0,016...0,035 МПа.

Результуюча сила тертя на циліндричній частині наконечника дорівнює

$$F_{тр.кон.} = 0,1\pi\lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_y - 0,2) q_3, \quad (2.44)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{\left( \gamma_{zp} h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\sigma_1} - \text{відношення діаметра зони пружно-}$$

пластичних деформацій до діаметра конусного наконечника РО [45].

Тоді сумарний опір заглибленню конічно-циліндричного наконечника дорівнює силі лобового опору та силі тертя по поверхні РО

$$P_{\Sigma кон.} = \frac{\pi}{8} \left( \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n}} \right) d \right)^2 E_{zp} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) +$$

$$+ 0,1\pi \left[ \frac{\left( \gamma_{zp} h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\sigma_1} \right] f D \sigma_1 + \pi f D (l_y - 0,2) q_3. \quad (2.45)$$

Залежність  $P_{\Sigma}$  у функції від  $d$  для  $n=2$  приведена на рис. 2.7.

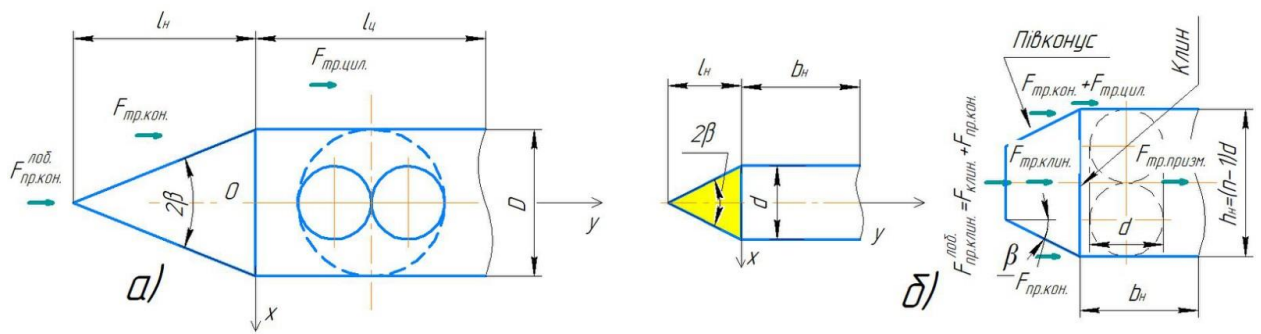


Рис. 2.6 – Сили опору переміщення, що діють на РО в ґрунтовому середовищі: а) – робочий орган традиційної конусно-циліндричної форми з розташованими в ньому  $n$ -футлярами; б) – клиново-призматичний РО розташованими в ньому  $n$ -футлярами

Згідно з графіком на рис. 2.7 сумарний опір проколу ґрунту РО залежить від розміру футлярів. Суттєво зусилля до 2-х разів також відрізняється від типу ґрунту.

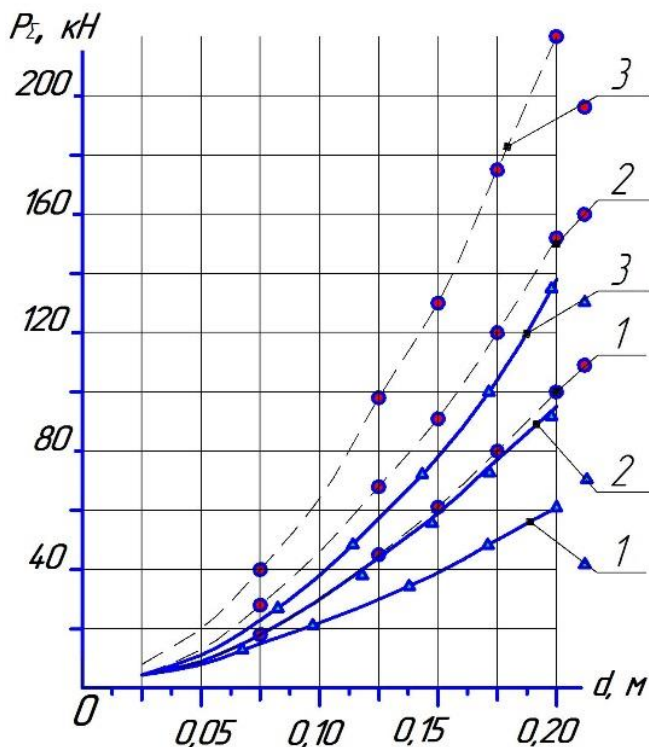


Рис. 2.7 – Залежність загального опору клинового та конічного наконечників від діаметра комунікацій, що прокладаються ( $n=2$ ): 1 – тугопластична глина; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – твердий супісок.

∇ – ∇ – для клиново-призматичних наконечників робочого органу,

○ – ○ – для конічно-циліндричних наконечників робочого органу

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

## 2.4 Визначення зони ущільнення та тиску ґрунту на сусідні підземні комунікації

Зони ущільнення та тиску ґрунту на сусідні підземні комунікації при деформації його клиново-призматичним наконечником.

Сучасні ремонти в місті показують необхідність одночасного прокладання декількох захисних футлярів до 8. Традиційно отвори для групового прокладання футлярів формується круглого перетину РО. Футляри у цьому випадку сформують в пучок з кількох окремих елементів протягнутих в один отвір. Відповідно, чим більший діаметр отвору, тим більша ймовірність пошкодження дорожньої основи або прилеглих комунікацій, що вимагає значно збільшувати глибину прокладання. Однорядне прокладання труб клиновим наконечником, дозволяє змінити та контролювати зону ущільнення і вплив на об'єкти, що розташовані поблизу.

Удосконалення технології отримання отвору статичним проколом для прокладання ЛПО є значимою задачею. При розробці технічних рішень необхідно враховувати потребу одночасного прокладання декількох футлярів та тиск деформованого ґрунту на прилеглі комунікації. Вивчення зони впливу РО на масив ґрунту та комунікації дасть можливість більш раціонально використовувати підземний простір, знизить ризики руйнування комунікацій та вартість робіт.

Проведення дослідів завжди матеріалоемне та вимагає значних ресурсів та часу, тому теоретичне обґрунтування занурення клиноподібного ножа та уявлення про закономірності процесу проколу запропонованим РО дозволить визначитись з подальшими плануванням експериментального дослідження [45, 55].

Опір руху РО визначається розмірами та кількістю футлярів, що необхідно прокласти й властивостями ґрунту, і глибиною прокладання комунікації.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Параметри наконечників та їх вплив на підземні об'єкти показані на (рис. 2.10) і визначаються діаметром та кількістю футлярів які повинні вільно затягуватись в утворену порожнину.

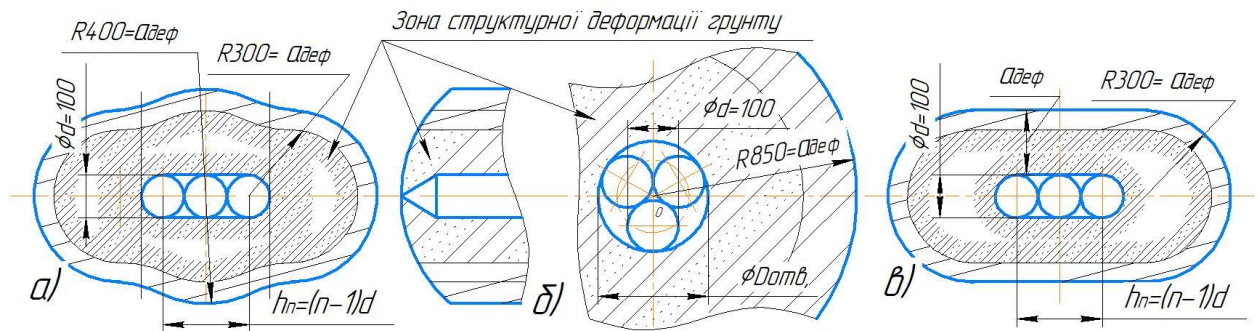


Рис. 2.8 – Робочі органи та зони деформації й надмірного тиску на сусідні комунікації при проколі (отвір для 3 футлярів): а) – клиново-призматичний РО проходка за 1 раз; б) – конусний РО; в) – клиново-призматичний РО, 3 послідовні проходи футляри

На основі закону збереження маси ґрунту до і після ущільнення клиновим наконечником маємо (рис. 2.8) [45, 51-55]:

$$\left(a_{деф} + \frac{d}{2}\right)(n-1)d\rho_{np} = (n-1)d \int_0^{a_y} \rho_x dx, \quad (2.46)$$

де  $a_{деф}$  – відстань, на яку деформується ґрунт клиновим наконечником;

Наближено закономірність зміни щільності  $\rho_x$  приймемо лінійною в залежності від відстані до бокової стінки отвору (Д. Н. Єшуткін) (рис. 2.8).

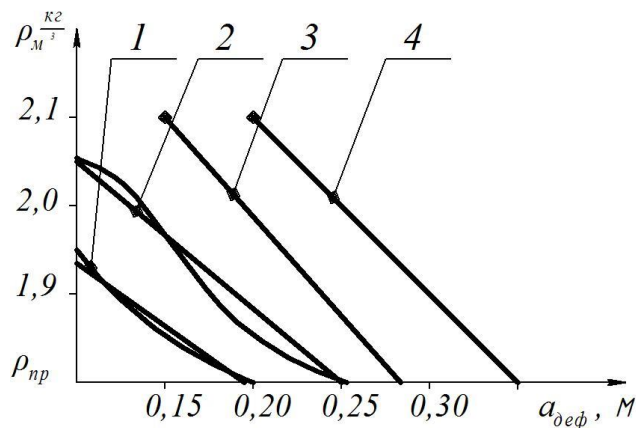


Рис. 2.9 – Закономірність зміни щільності ґрунту в деформованій (клиново-призматичним наконечником) зоні в залежності від розмірів ОТВОРИ У ГРУНТІ: 1 – футляр 0,13 м; 2 – розміром 0,19 м; 3 – футляр 0,245 м; 4 – футляр 0,325 м

Прийнята закономірність зміни щільності показана на рис. 2.12:

$$\rho_x = \rho_{np} + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}}\right) (\rho_{max} - \rho_{np}), \quad (2.47)$$

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

З урахуванням (2.47) рівність (2.48) переписеться у вигляді:

$$\left(a_{деф} + \frac{d}{2}\right) \rho_{np} = \rho_{np} a_{деф} + (\rho_{max} - \rho_{np}) a_{деф} - (\rho_{max} - \rho_{np}) \frac{a_{деф}}{2} \quad (2.48)$$

Середня щільність ґрунту  $\frac{\rho_{max} + \rho_{np}}{2} = \rho_{сер}$  після проходження РО визначено в роботі [45, 51-55]:

$$\rho_{сер} = \frac{\rho_{np}}{1 - 1/\lambda^2}, \quad (2.49)$$

де  $\lambda$  – характеризує розповсюдження зони пружно-пластичних деформацій ґрунту і залежить від типу ґрунту та глибини проходки:

$$\lambda = \frac{\left(\gamma_{zp} h + \frac{c}{tg \varphi_0}\right) tg^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\sigma_1}, \quad (2.50)$$

де  $\sigma_1$  – напруження за (2.43) [44, 47, 66].

Якщо підставити залежності (2.50) і (2.51) у рівняння (2.49) отримаємо:

$$a_{деф} = (\lambda^2 - 1) \frac{d}{2} = \left[ \frac{\left(\gamma_{np} h + \frac{c}{tg \varphi_0}\right)^2 tg^8 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (2.51)$$

Для ідеального сипучого середовища, в якого зчеплення відсутнє ( $c = 0$  – пісок):

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$$a_{def} = \left[ \frac{tg^8 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{(1 + \sin \varphi_0)^2} \cdot \sin^2 \varphi_0 (3 - \sin \varphi_0)^2 - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (2.52)$$

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

$$a_{def} = \left[ \frac{\frac{c^2}{tg^2 \varphi_0} tg^8 \left( \frac{\pi}{4} + \varphi_0 \right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (2.53)$$

Якщо прийняти, що коефіцієнт  $\lambda = 5,4 \dots 6,0$  – для супіску твердого;  $\lambda = 4,3 \dots 4,8$  – для суглинку напівтвердого;  $\lambda = 4,0 \dots 4,3$  – для глини тугопластичної [45], тоді щільність ґрунту в пружно-пластичній зоні: для тугопластичної глини –  $\rho_{сер} = (1,06 \dots 1,07) \rho_{np}$ ; для напівтвердого суглинку –  $\rho_{сер} = (1,05 \dots 1,06) \rho_{np}$ ; для твердого супіску –  $\rho_{сер} = (1,03 \dots 1,04) \rho_{np}$ . Для приведеної середньої щільності ґрунтів величина зони їх деформування складає: для тугопластичної глини –  $a_{def} = (7,5 \dots 8,7) d$ ; для напівтвердого суглинку –  $a_{def} = (8,7 \dots 11,0) d$ ; для твердого супіску –  $a_{def} = (14,0 \dots 17,5) d$ .

Визначимо тиск ґрунту на комунікації, що розташовані під землею та потрапили у зону дії пружно-пластичних деформацій:

$$q_x = \frac{1 + \omega}{c_k} \rho_{mv} \left( \frac{1}{\rho_{np}} - \frac{1}{\rho_x} \right) = E_{zp} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left( 1 - \frac{x}{a_{def}} \right) \left( \frac{2}{\lambda^2 - 1} \right)} \right]. \quad (2.54)$$

Отримано графіки  $q_x$  в залежності від відстані  $x$  до бокової поверхні (грані) клину для найбільш розповсюджених типів ґрунтів (рис. 2.9).

Для побудови графіків прийmemo для обох робочих органів [45, 51-55]:

– кількість одночасно протягнутих футлярів  $n=2$  шт.;

- глибина  $h=1.5$  м;
- розмір футлярів 100 мм, 200 мм, 300 мм;
- характеристики твердого супіску  $-\lambda = 5.6$ ,  $a_{def} = 15.2d$  ;
- характеристики напівтвердого суглинку  $-\lambda = 4.5$ ,  $a_{def} = 9.63d$  ;
- характеристики тугопластичної глини  $-\lambda = 4.2$ ,  $a_{def} = 8.32d$  .

З рисунок 2.9. чітко видно, що використання досліджуваного РО суттєво залежить від розміру футлярів та обмежується глибиною прокладання. Мала глибина приведе до випчування денної поверхні ґрунту.

Якщо процес проколювання розбити на декілька етапів та поступово збільшувати ширину (кількість футлярів, що одночасно прокладається), то всі деформації будуть мінімальними та розповсюджуються лише в сторону конусних країв РО.

Необхідно зазначити отримання теоретичного визначення зони ущільнення ґрунту та впливу на комунікації при деформації клиновим РО [55], отримана можливість всебічної оцінки використання нових клинових РО для прокладання підземних комунікацій з застосуванням статичного проколу ґрунту. Критерієм порівняння запропонованого клинового та традиційного конусного наконечників РО є сила приколювання ґрунту ними. Отримані розрахунки сил опору ґрунту проколу також пов'язують конструктивні і силові можливості малогабаритної установки при виконанні робіт. Оцінити, близькість виконання робіт (проходу РО) до прилеглих комунікацій можна виконати визначенням тиску від пружно пластичних деформацій на прилеглі комунікації наконечником з запропонованими геометричними параметрами, залежно від та характеристик ґрунту та параметрів РО.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

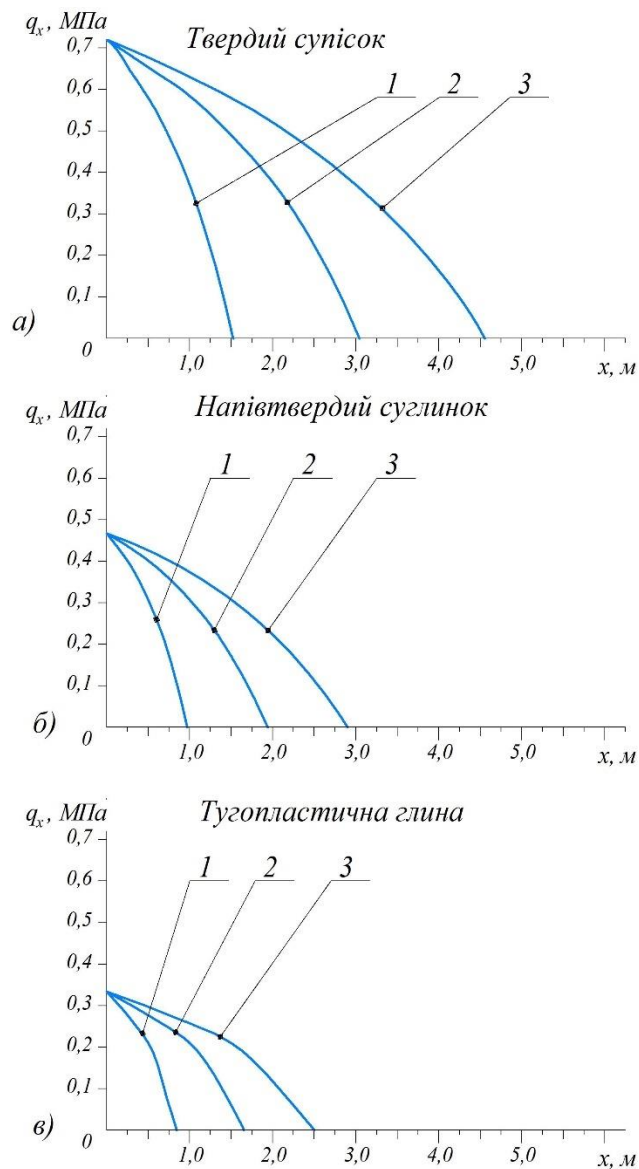


Рисунок 2.10 – Залежність тиску ґрунту на підземні комунікації від відстані, діаметра, кількості футлярів та форми робочого органу  $n=5$  шт.,  $h=1.5$  м: а – твердий супісок; б – напівтвердий суглинок; в – тугопластична глина: 1, 2, 3, 4, 5 – клиново-призматичний робочий орган для діаметрів футляра, відповідно, 100 мм, 200 мм та 300 мм

Необхідність проведення досліджень по можливості зниження собівартості виконання робіт за безтраншейними технологіями обумовлено постійністю ущільнення ґрунту навколо РО, незалежно від кількості футлярів. Зміна форми РО дає можливість перерозподілити напруження в ґрунтовому масиві,

що дасть можливість наблизитись до прилеглих комунікацій. Запропоновані клиново-циліндричні наконечники дають можливість зменшити сили проколювання за рахунок зменшення робіт по ущільненню певного об'єму ґрунту, що пустує при традиційних РО.

Для побудови графіків приймемо [31, 41, 66]:

- $2\beta = 40^\circ$  – подвійний кут при вершині клину та півконусу;
- розмір пілотного проходу  $d_n = 0,08$  м;
- довжина наконечника  $l_y = b_n = 0,3$  м;
- кількість однакових футлярів  $n=1\dots 5$  шт.;
- глибина прокладання  $h=1.5$  м;
- діаметр футлярів 100 мм;
- характеристики тугопластичної глини –  $\omega=23\%$ ,  $c=0,04$  МПа,  $\lambda = 4,539$ ,  $E_{zp} = 0,818$  МПа,  $a_q = 0,044$ ,  $a_{def} = 9,80d$ ;
- характеристики напівтвердого суглинку –  $\omega=17\%$ ,  $c=0,04$  МПа,  $\lambda = 4,174$ ,  $E_{zp} = 1,071$  МПа,  $a_q = 0,044$ ,  $a_{def} = 8,21d$ ;
- характеристики твердого супіску –  $\omega=10\%$ ,  $c=0,020$  МПа,  $\lambda = 5,611$ ,  $E_{zp} = 2,363$  МПа,  $a_q = 0,05$ ,  $a_{def} = 15,241d$ ;
- характеристики піску –  $\omega=6\%$ ,  $c=0,0$  МПа,  $\lambda = 15,961$ ,  $E_{zp} = 7,293$  МПа,  $a_q = 0,075$ ,  $a_{def} = 86,8d$ .

Графіки  $R_{\Sigma прк.}$  сили сумарного проколювання ґрунту порівнюваними РО отримаємо підставивши відповідні значення в формули (2.37) та (2.45) (рис. 2.10).

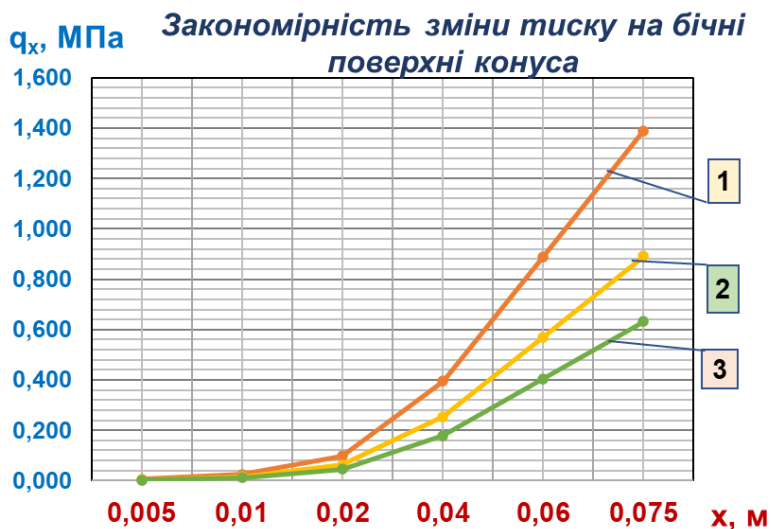


Рис. 2.11 – Закономірність зміни тиску на бічні поверхні конуса:

Подвійне збільшення сили проходки конічно-циліндричної РО для 2 футлярів пояснюється збільшенням розміру отвору в два рази. Будуємо графіки  $P_{\Sigma pзи}$ . при поступовому розширенні отвору наконечником, що послідовно збільшує свої розміри на один футляр формули (2.56) та (2.57) (рис. 2.11).

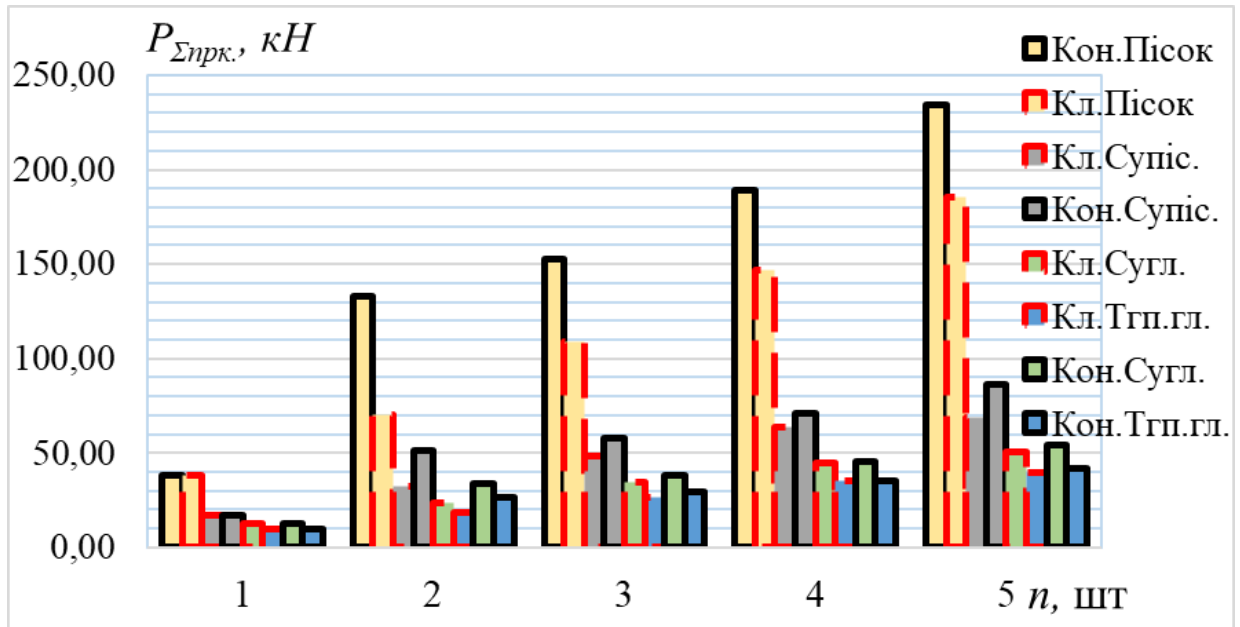


Рис. 2.12 – Вплив форми робочого органу на сумарну силу проколювання отвору: Кл.Супіс. – клиново-призматичний РО, твердий супісок; Кл.Сугл. – клиново-призматичний РО, напівтвердий суглинок; Кл.Тгп.гл. – клиново-призматичний РО, тугопластична глина; Кл.Пісок. – клиново-призматичний РО, пісок; Кон.Супіс. – конічно-циліндричний РО, твердий супісок; Кон.Сугл. – конічно-циліндричний РО, напівтвердий суглинок; Кон.Тгп.гл. – конічно-циліндричний РО, тугопластична глина; Кон.Пісок. – конічно-циліндричний РО, пісок

### 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ НА ПІДЗЕМНІ КОМУНІКАЦІЇ

Для проведення експериментальних досліджень використаємо моделі РО, розміри яких визначимо шляхом масштабування. За взірець використаємо трубчатий футляр найбільш поширеного розміру 100 мм, при цьому кількість одночасно монтованих футлярів варіює від 1 до 4 шт. розмір робочого органу для утворення отвору з рекомендацій збільшимо на 20% по відношенню до футляру. Масштаб моделювання 1:5. Результати розміщені в таблиці 3.1., зображення робочих органів рис. 3.1.

Прийнявши для клиново-призматичних та конічно-циліндричних робочих органів однакові умови маємо (рис. 3.1): кут при вершині конуса або клину дорівнює  $2\beta = 46^\circ$ , ґрунт – лабораторний (суміш піску з супіском (табл. 3.2) (близький до вологого піску).

Таблиця 3.1

Геометричні параметри РО для проведення експерименту.

	Типи РО та отвори, які ними тримаємо, розташування в них футлярів	Габарити лабораторного РО, мм		
		Діаметр, висота, ширина, мм	Кут загострення, $\beta$ , град	Довжина РО, мм
1		$D_{po} = 25$ мм	$\beta = 23^\circ$	85
2		$b = 25, h_{кл} = 25$	$\beta = 23^\circ$	85
4		$D_{po} = 50$ мм	$\beta = 23^\circ$	55

Моделі РО, які сформовані для проколювання отвору в лабораторних умовах (табл. 3.2). Вірогідність математичної моделі процесу утворення отвору ущільнювальним робочим органом запропонованої конструкції у випадку відсутності точного аналога підтверджує якісно виконане фізичне моделювання експериментальних досліджень, результати фізичного моделювання можуть бути підставою для уточнення початкової математичної моделі.

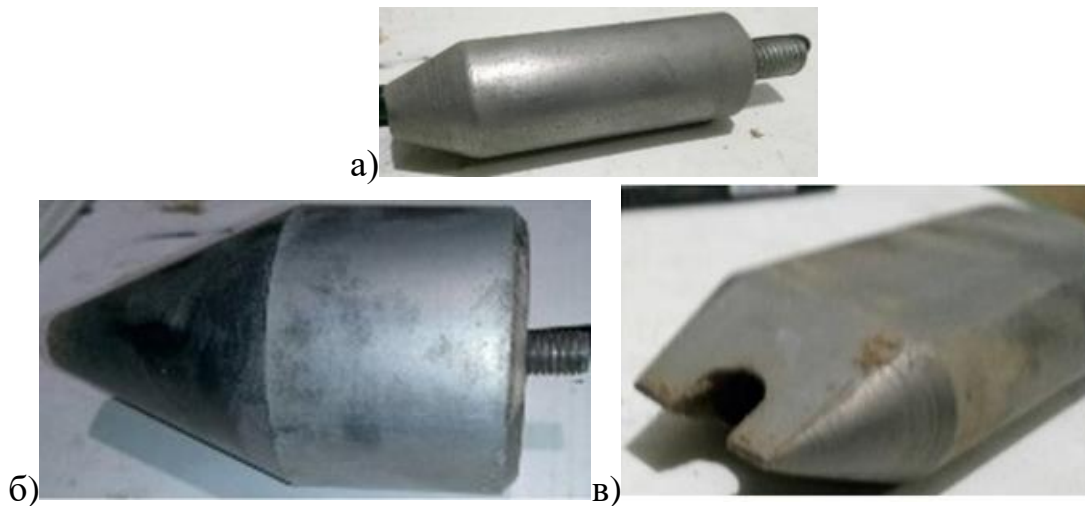


Рис. 3.1 – Робочі органи для лабораторних досліджень:

а) – пілотний конусний РО; б) – традиційні конічно-циліндричні РО;  
в) – клиново-призматичні РО

Об'єктами експериментальних досліджень були наконечники РО для утворення отвору методами статичного проколу, шляхом поступового розширення отвору до потрібного розміру, а також ґрунтове середовище, яке визначає умови експлуатації ґрунтопроколюючих установок.

Для проведення лабораторних експериментів ґрунтовий фон був змодельований та складався з 8 частин річкового піску та 2 частин супіску.

В процесі проведення експериментів, ґрунт був зданий на дослідження, для визначення його фізико-механічних характеристик, до лабораторії ТОВ "ДНІПРОГЕОАЛЬЯНС", яка займається питаннями інжинірингу, геології та геодезії, надання послуг технічного консультування. Результати проведеного аналізу ґрунтів приведені в табл. 3,2 .

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

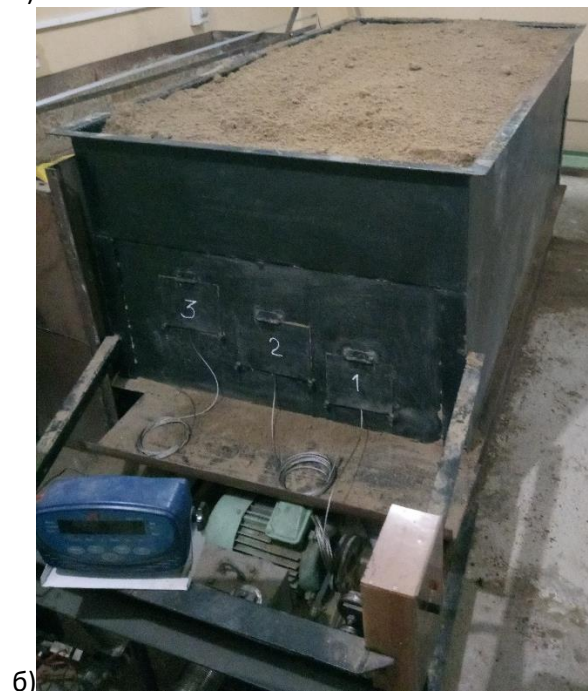
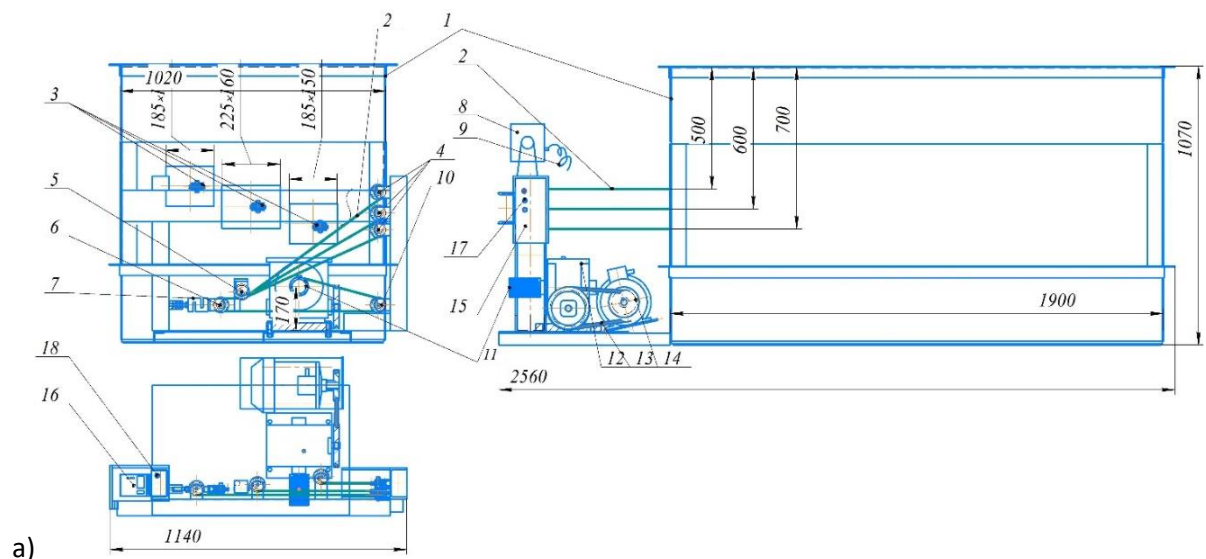


Рис. 3.2 – лабораторний стенд: а) – Схема стенду; б) – фото стенду; в) – заглиблення клинового РО: 1 – короб; 2 – робочі канати; 3, 4, 5, 6, 10 – блоки, що відхиляють; 7 – силовий тензометричний датчик; 8 – ваговий термінал; 9 – лінія числового зв'язку з ПК; 11 – канатний барабан; 12 – редуктор; 13 – клинопасова передача; 14 – електродвигун; 15 – магнітний пускач; 16 – частотний перетворювач; 17 – резистор керування частотним перетворювачем; 18 – розетка живлення вагового терміналу та ПК

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 3.2

Протоколи дослідження ґрунту. Лабораторний ґрунт - пісок. Інтервал тисків від 0,20 до 0,25 МПа

№ зразка	Позн.	Одиниці виміру	1	2	3	4	5	6
Вологість	$W$	%	7,5	9	10,5	12	13,5	15
вологість min	$\omega_{min}$	%	6	6	6	6	6	6
вологість max	$\omega_{max}$	%	12	12	12	12	12	12
Щільність ґрунту в природному стані	$r$	г/см <sup>3</sup>	1,782	1,801	1,809	1,803	1,871	1,921
Щільність ґрунту в сухому стані	$r_d$	г/см <sup>3</sup>	1,658	1,652	1,637	1,61	1,648	1,67
Щільність твердої фази ґрунту (щільність часток)	$r_s$	г/см <sup>3</sup>	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Коефіцієнт пористості	$e$		0,377	0,379	0,385	0,395	0,38	0,372
Питоме зчеплення	$C$	кПа	0	0	0	0	0	0
Кут внутрішнього тертя	$f_0$	град.	39	38	37	36	38	40
Коефіцієнт Пуассона	$\mu$		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Коефіцієнт компресії	$c_k$	МПа <sup>-1</sup>	0,093	0,119	0,139	0,059	0,068	0,05
мін	$c_k$	МПа <sup>-1</sup>	0,294	0,42	0,546	0,672	0,798	0,924
max	$c_k$	МПа <sup>-1</sup>	0,378	0,54	0,702	0,864	1,026	1,188
Компресійний модуль $E_{gr}$	$E_{gr}$	МПа	12,97	10,25	8,83	21,22	17,94	24,14
	$E_{gr}$	МПа	5,458	3,833	2,976	2,459	2,022	1,723
	$E_{gr}$	МПа	17,254	13,528	11,689	28,006	23,729	31,848
Щільність твердої фази ґрунту	$\rho_{mv}$	т/м <sup>3</sup>	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66	2,66
Щільність ґрунту в природному стані	$\rho_{np}$	т/м <sup>3</sup>	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

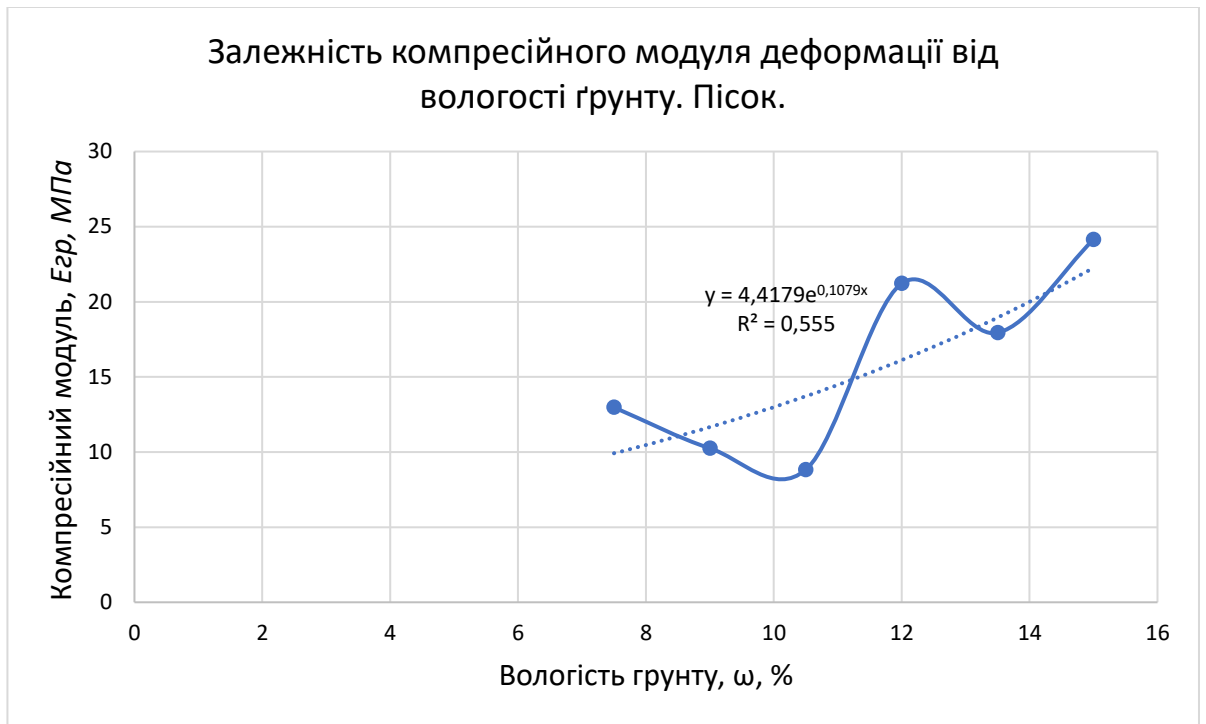


Рис. 3.3 – Залежність компресійного модуля деформації  $E_{gr}$  від вологості ґрунту. Лабораторний ґрунт – пісок. Інтервал тисків від 0,20 до 0,25 МПа

Ознакою технології статичного проколу ґрунту є створення зусилля, яке передається на наконечник РО для взаємодії з ґрунтом при цьому ґрунт, що витіснений РО втрамбується в стінки створеного отвору. Зважаючи на те, що натискні зусилля передати на наконечник РО важко, а у виробничих умовах дуже дорого і майже неможливо, приймаємо рішення отримувати пілотну отвору методом протягування стартового конусно-циліндричного РО.

З урахуванням вимог до розмірів обладнання, для проведення експериментальних досліджень, використано стенд (рис. 3.4), який виконує наступні функції:

- забезпечувати початкове впровадження пілотного РО у масив ґрунту;
- забезпечувати постійне тягове зусилля;
- забезпечувати сталу контрольовану швидкість проколювання, з можливістю її зміни.

Таблиця 3.3

Характеристика моделі ґрунту сформованого для лабораторних дослідів

Фізико-механічні характеристики ґрунту	Ґрунт в лабораторії
Параметр / одиниця	
Тип	піщаний ґрунт
Природна вологість, $\omega$ , %	6,3
Щільність твердої фази ґрунту, $\rho_{тв}$ , т/м <sup>3</sup>	2,66
Щільність ґрунту в природному стані, $\rho_{пр}$ , т/м <sup>3</sup>	1,79
Коефіцієнт питомого зчеплення, $c$ , МПа	0,0
Кут внутрішнього тертя, $\varphi_0$ , град.	39
Кут зовнішнього тертя $\varphi$ , град	42
Коефіцієнт тертя ґрунту по РО (сталі) $f$	0,607
Питома вага у природному стані ґрунту, $\gamma_{зр}$ кН/м <sup>3</sup>	17,9
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$	0,3
Коефіцієнт компресії, $c_k$ , МПа <sup>-1</sup>	0,082
Компресійний модуль, $E_{зр}$ , МПа	14,519
Кількість ударів щільноміра, $C_{уд}$ ,	1-3

Розроблено і створено стенд для дослідження процесу проколювання (рис. 3.2). Вона складається з короба 1, в якому виконано по три люки симетрично розташовані розміром 150-200 мм. Короб заповнений ґрунтовою сумішшю (таблиця 3.4.). Перед коробом розташовано механізм приводу, що складається з редуктора 2, барабану, електроприводу 3, на барабані закріплений канат 5, який через систему блоків, що відхиляють, 4 зв'язаний з робочими органами. Швидкість переміщення контролюється за допомогою частотного перетворювача з векторним керуванням ПЧ CFM310- 4 кВт.

Ваговий термінал (рис. 3.4) типу ХК3118Т1 призначений для перетворення сигналу від аналогових тензодатчиків (рис. 3.5) і перетворення в одиниці ваги (кг або фунти) та аналоговий сигнал на цифровий перетворювач RS-232. Індикація ваги здійснюється на 6-ти розрядному світлодіодному дисплеї. Термінал призначений для роботи з промисловими вагами різних типів.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Сигнал з цифрового перетворювача записується на персональний комп'ютер для подальшої обробки даних.

Основні технічні характеристики лабораторного стенда приведені в таблиці 3.5, фізико-механічні властивості ґрунту приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Технічна характеристика лабораторного стенда

Пор. №	Параметр	Розмірність	Значення
1	Довжина робочого ходу	мм	2000
2	Робоча швидкість каната	мм/с	0-150
3	Сила тяги, максимальна (обмежена міцністю канату)	Н	6500
4	Кількість робочих вікон	шт	3
3	Габарити вікна (висота/ширина)	мм/мм	150/200
5	Ваговий термінал типу ХК3118Т1	-	6-ти розрядний
6	Тензодатчик		Keli DEF 750
7	Діапазон зусиль, що вимірюються	Н	0-6000
8	Потужність приводу	кВт	0,75
9	Редуктор черв'ячний, 1Ч-80		1:40
10	Цифровий вологомір ґрунту Rapitest 1825, (діапазон/ціна поділки)	%/%	0-30/ 0,1
11	Габарити коробка: довжина	мм	2000
	ширина	мм	1000
	висота	мм	1000

Замір та реєстрація сил опору проколювання ґрунту РО стенда здійснювався шляхом вимірювання натягу каната у двох гілках по схемі зображеній на рис. 3.7.. Фіксація сили ваговим комплексом Keli ХК3118Т1. Принцип дії тензOMETричного перетворювача базується на зміні опору тензорезисторів при їх деформації, наклеєних до пружного елемента S-подібного тензодатчика Keli DEF 750 (рис. 3.5), який деформується під навантаженням, що стискає, або розтягує. Зміна опору тензорезисторів пропорційна зміні сили прикладеної до нього.

На рис. 3.8. представлений механізм приводу канатного барабана з електродвигуном, редуктором, рамою, барабаном, блоками, що відхиляють.

Перед початком кожної серії експериментів виконуємо підготовку стенда. Грунт викопується з коробу, розпушується і зволожується до необхідних параметрів. Далі виконується пошарове зворотне засипання ґрунту в короб, з послідовним втрамбовуванням кожного шару та контролем щільності щільноміром ДорНДІ.



Рис. 3.4 – Ваговий термінал типу ХК3118Т1



Рис. 3.5 – Тензодатчик Keli DEF 750



Рис. 3.6 – Механізм приводу канатного барабана лабораторного стенда:  
1 – електродвигун; 2 – редуктор з барабаном тяговим; 3 – пасова передача; 4 – рама зварна; 5 – пульт керування електродвигуном; 6 – блоки, що відхиляють

Дійшовши до осі майбутнього отвору (одне з трьох вікон стенда) закладаємо канат, діаметром 4,5 мм, між двома отворами паралельно боковим стінкам та основі коробка (рис. 3.2 в)), далі засипаємо його ґрунтом по 100-120 мм за один прохід ущільнюємо його ручною трамбівкою. Вологоміром вимірюємо вологість ґрунту поблизу осі майбутнього отвору, міцність ґрунту знаходиться в межах 25-35 ударів, перевіряємо ударником ДорНДІ (масштабна модель, рис. 3.11), міцність перевіряємо на кожному шарі ґрунту де прокладаємо канат. Після операцію повторюємо до цілковитого заповнення коробка.

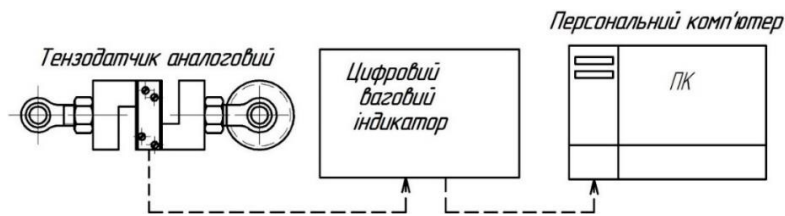


Рис. 3.7 – Принципова схема вимірювального вузла

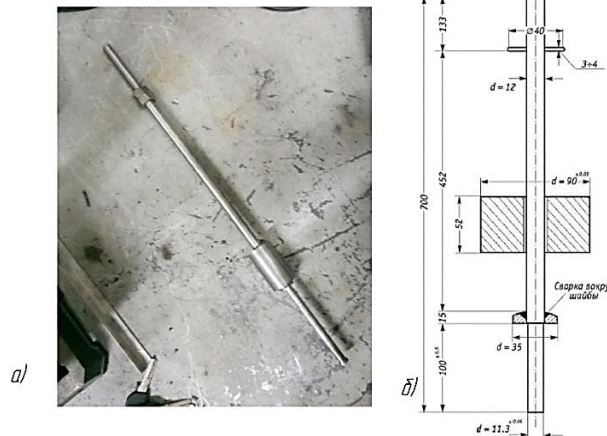


Рис. 3.8 – Ударник ДорНДІ: а) – загальний вигляд; б) – креслення ударника

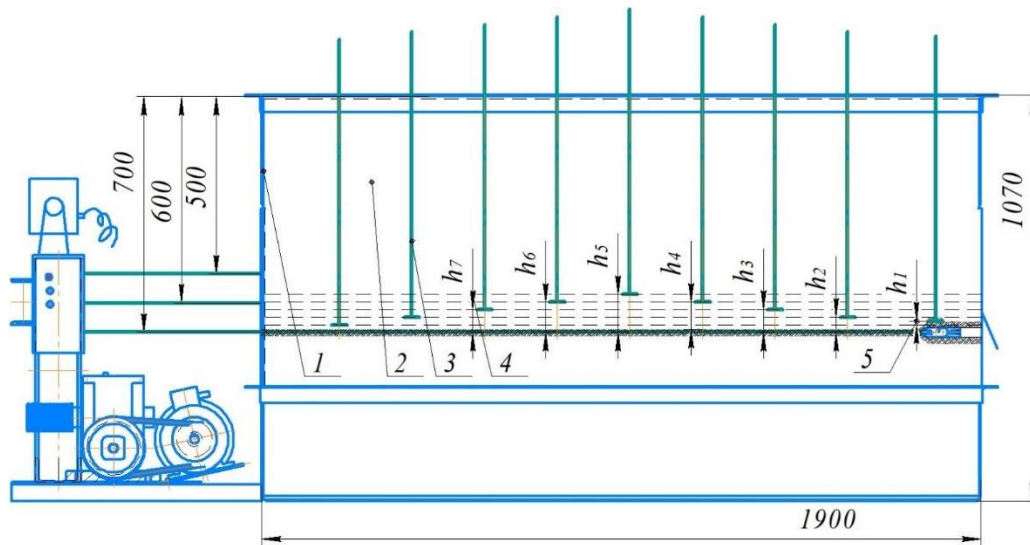


Рис. 3.9 – Розташування щупів вимірювання переміщень деформованого ґрунту: 1 – короб; 2 – лабораторний ґрунт; 3 – контрольний щуп; 4 – максимальна висота розташування щупа відносно привідного каната – 100 мм; 5 – мінімальна висота розташування щупа відносно привідного каната - 10 мм.

Таблиця 3.5

Сила отримання отвору розширенням КЛИНОВИМ РО в лабораторних умовах на глибині 0,7 м, ґрунт пісок

Типи РО, кількість та розташування в них футлярів		Дослід							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Вологість ґрунту, %	Н	8,1	8,2	8,4	8,6	8,8	8,9	9,1	9,1
Пілотний РО, $d_l$	$R_{\Sigma\text{кон.}}^{\text{теор}}$	1320	1300	1262	1227	1195	1180	1152	1152
Пілотний РО, $d_l$	$R_{\Sigma\text{кон.}}^{\text{лаб.}}$	1274	1183	1132	1104	1102	1098	1004	985
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$ ,	20	20	20	20	20	20	20	20
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	28	28	28	28	28	28	28	28
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	36	36	36	36	36	36	36	36
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	44	44	44	44	44	44	44	44
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	60	60	60	60	60	60	60	60
Клиново-призматичний РО, 2 ф.	$R_{\Sigma\text{клин}2.}^{\text{теор}}$	2358	2308	2214	2128	2050	2013	1943	1943
Клиново-призматичний РО, 2 ф.	$R_{\Sigma\text{клин}2.}^{\text{лаб.}}$	2181	2215	2012	2104	1993	1899	1803	1742
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$ ,	28	28	28	28	28	28	28	28
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	36	36	36	36	36	36	36	36
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	44	44	44	44	44	44	44	44
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	48	48	48	48	48	48	48	48
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	62	62	62	62	62	62	62	62
Клиново-призматичний РО, 3 ф.	$R_{\Sigma\text{клин}3.}^{\text{теор}}$	2418	2365	2266	2176	2093	2054	1981	1981
Клиново-призматичний РО, 3 ф.	$R_{\Sigma\text{клин}3.}^{\text{лаб.}}$	2336	2256	2181	2048	2011	1765	2162	2141
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$	28	28	28	28	28	28	28	28
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	38	38	38	38	38	38	38	38
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	45	45	45	45	45	45	45	45
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	50	50	50	50	50	50	50	50
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	63	63	63	63	63	63	63	63

Таблиця 3.6

Сила отримання отвору розширенням КОНІЧНИМ РО в лабораторних умовах на глибині 0,7 м, ґрунт пісок

Типи РО, кількість та розташування в них футлярів		Дослід							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Вологість ґрунту, %	Н	8,1	8,2	8,4	8,6	8,8	8,9	9,1	9,1
Пілотний РО, $d_l$	$R_{\Sigma\text{кон.}}^{\text{теор}}$	1320	1300	1262	1227	1195	1180	1152	1152
Пілотний РО, $d_l$	$R_{\Sigma\text{кон.}}^{\text{лаб.}}$	1204	1195	1135	1104	1103	1081	981	995
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$	20	20	20	20	20	20	20	20
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	27	27	27	27	27	27	27	27
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	36	36	36	36	36	36	36	36
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	45	45	45	45	45	45	45	45
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	60	60	60	60	60	60	60	60
Конічно-циліндричний РО, 2 ф.	$R_{\Sigma\text{кон}2.}^{\text{теор}}$	2586	2537	2445	2362	2286	2250	2183	2183
Конічно-циліндричний РО, 2 ф.	$R_{\Sigma\text{кон}2.}^{\text{лаб.}}$	2464	2425	2337	2304	1971	1944	1960	2026
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$	34	34	34	34	34	34	34	34
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	42	42	42	42	42	42	42	42
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	50	50	50	50	50	50	50	50
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	60	60	60	60	60	60	60	60
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	74	74	74	74	74	74	74	74
Конічно-циліндричний РО, 3 ф.	$R_{\Sigma\text{кон}2.}^{\text{теор}}$	2322	2295	2244	2198	2155	2136	2098	2098
Конічно-циліндричний РО, 3 ф.	$R_{\Sigma\text{кон}2.}^{\text{лаб.}}$	2115	2135	2095	1962	2078	2065	1862	2058
Переміщення щупа, мм	$h_1=10$	42	42	42	42	42	42	42	42
Переміщення щупа, мм	$h_2=20$	48	48	48	48	48	48	48	48
Переміщення щупа, мм	$h_3=30$	56	56	56	56	56	56	56	56
Переміщення щупа, мм	$h_4=40$	64	64	64	64	64	64	64	64
Переміщення щупа, мм	$h_5=60$	76	76	76	76	76	76	76	76



а)



б)

Рис. 3.10 – Вимірювання деформації ґрунту навколо отвору: а) – Короб з ґрунтом, щупами та відліковою планкою: 1 – ґрунт; 2 – планка відлікова; 3 – щуп; б) – Щупи: 1 – шток; 2 – опора.

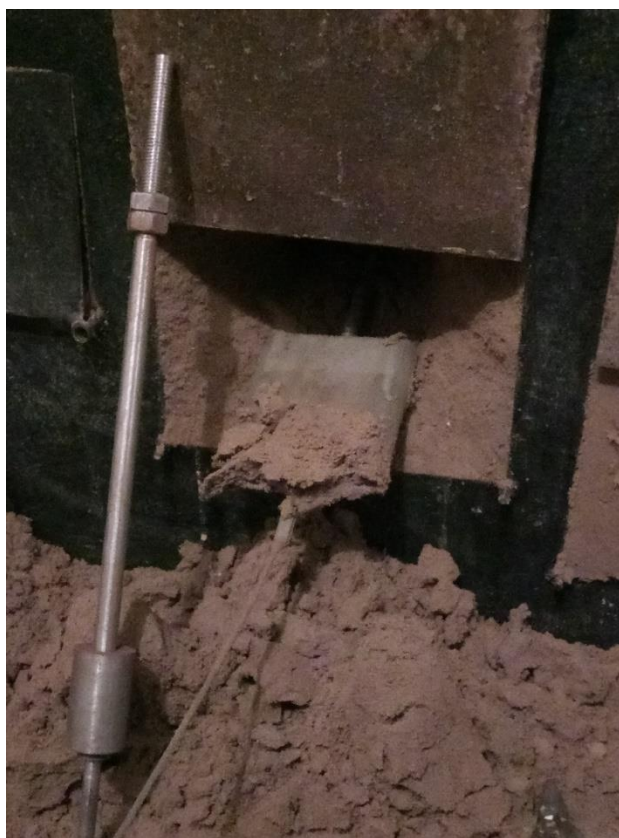
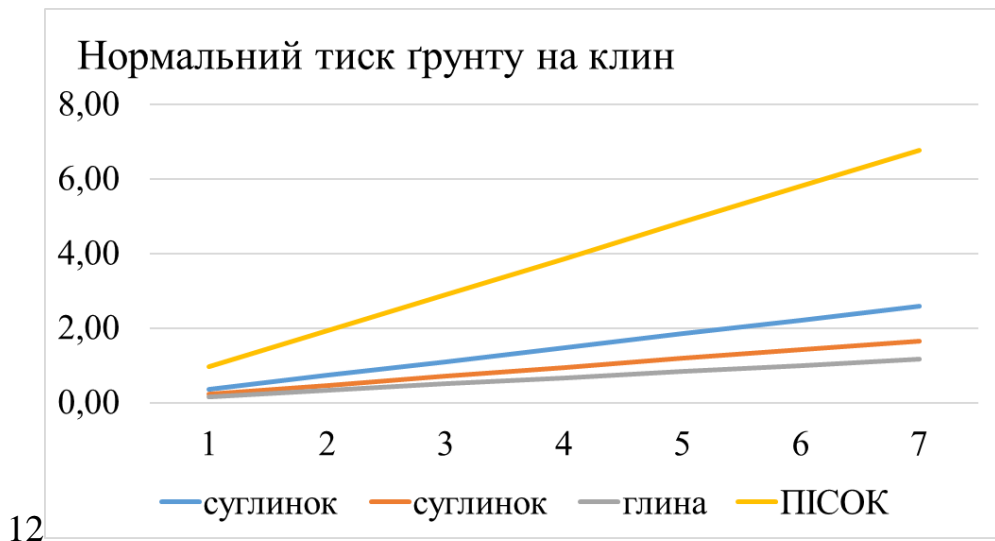
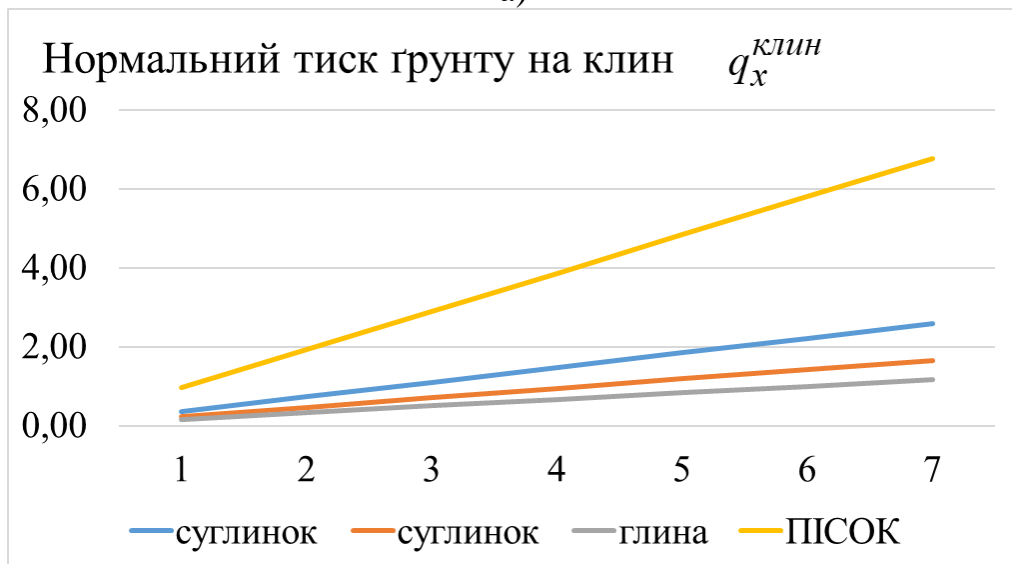


Рис. 3.11 – Вихід клинового робочого органу з елементами ядра ущільнення попереду.

Підставивши параметри розповсюджених ґрунтів у формули (2.19) та (2.25) отримаємо залежність для конусного РО приведену на рис. 3.12 підтверджений експериментальними даними для твердого супіску.



а)



б)

Рис. 3.12. Закономірність зміни тиску на бічній поверхні РО в різних типах ґрунтів: а) – конусно-циліндричного; б) – клиново призматичного: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина 4 – пісок.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## ВИСНОВОК

В роботі розглянуті основні питання «Визначення зони впливу деформації ґрунту на сусідні комунікації в залежності від форми робочого органу».

При опрацюванні теми зробили 3 розділи в яких розглянуто аналіз існуючих методів отримання горизонтальних отворів та методики розрахунків робочих зусиль статичного проколювання, проведено огляд форм робочих органів, наведені теоретичні викладки та проведена підготовка експерименту, під час роботи статичного проколювання, пророблено 60 літературних джерела.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Горизонтально направлене буріння – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Горизонтально\\_направлене\\_буріння#Виробники\\_установок\\_ГНБ](https://uk.wikipedia.org/wiki/Горизонтально_направлене_буріння#Виробники_установок_ГНБ) (дата звернення: 02.01.2024).
- [2] ПУЕ. Правила улаштування електроустановок : довідник. м. Харків : "Форт", 2017. 760 с.
- [3] Возникновение метода ГНБ. Экскурсия в историю. Блог о ГНБ и бестраншейных технологиях. URL: <http://xn----9sbbfd1ckm.com.ua/2012/06/istorija-gnb.html> (дата звернення: 03.01.2024).
- [4] Ditch Witch - Directional Drills, Trenchers, Vacs, & Skid Steers - Ditch Witch. Ditch Witch. URL: <https://www.ditchwitch.com/> (date of access: 03.01.2024).
- [5] Vermeer Corporation - Industrial & Agricultural Equipment. Vermeer Corporation - Industrial & Agricultural Equipment. URL: <https://www.vermeer.com/em> (date of access: 03.01.2024).
- [6] Universal Machinery - Офіційний дистриб'ютор XCMG. XCMG Ukraine. URL: <https://www.xcmg-ukraine.com.ua/> (дата звернення: 03.01.2024).
- [7] Бурові машини для будівництва комунікаційних мереж | БУДИВЕЛЬНИК-3. Якісне проведення робіт з будівництва та реконструкції сучасних комунікацій | БУДИВЕЛЬНИК-3. URL: <https://bud-3.com.ua/technic/burovye-mashiny.html> (дата звернення: 03.01.2024).
- [8] ГНБ - горизонтально направлене буріння в Україні. Про компанію - Компанія "ВіК". URL: <https://vik.com.ua/pages/view/GNB> (дата звернення: 03.01.2024).
- [9] Компанія ГНБ Україна - GNB UKRAINE. GNB UKRAINE. URL: <https://gnbukr.com.ua/> (дата звернення: 03.01.2024).

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

[10] Горизонтальне шнекове буріння. Технологія, етапи, переваги. What – маємо відповідь. URL: <https://what.com.ua/gorizontalne-shnekove-burinnia/> (дата звернення: 03.01.2024).

[11] Бурошнекове буріння – технологія й етапи робіт. ГНБ - прокладка труб методом горизонтально-шнекового буріння, ціни, технологія. URL: <https://gnb-stroy.com/articles/shnekovoe-burenie> (дата звернення: 03.01.2024).

[12] Безтраншейна прокладка труб продавлювання трубопроводів під дорогою, метод проколу, як прокласти. Фірма ООО ремонтна компанія «Веста». URL: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/beztranshejna-prokladka-trub-prodavljuvannja.php> (date of access: 03.01.2024).

[13] Принцип роботи та області застосування пневмопробійників. Безтраншейні технології: Пневмопробійники. URL: <https://jak.bono.odessa.ua/articles/princip-roboti-ta-oblasti-zastosuvannja.php> (дата звернення: 03.01.2024).

[14] Безтраншейні технології в Україні – ТОВ УкрБудова. ТОВ "УКР-БУДОВА". URL: <https://ukrbudova.biz/beztransheini-tekhnohii> (дата звернення: 03.01.2024).

[15] Наукові основи та практика створення мінімально-енергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті.: монографія / С. Кравець та ін. м. Харків: ХНАДУ, 2021. 304 с.

[16] Ешуткин Д.Н., Смирнов Ю.М., Цой В.И., Исаев В.Л. Высокопроизводительные гидropневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций. М.:Стройиздат, 1990. 171 с.

[17] Установка для спрямованого проколу ґрунту МК-ТБ-08, прокол ґрунту, керований прокол ґрунту. ООО "МК "Тясминбурмаш", бурильно-кранові машини, бурильнокранова установка. URL: <http://mktb.com.ua/ua/production/ustanovki-dlya-prokola-grunta/ustanovka-dlya-prokola-grunta-mk-tb-08.html> (дата звернення: 04.01.2024).

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

[18] Установка спрямованого проколу ґрунту МП-250. ТОВ "НВП "ГАЗТЕХНІКА ЛТД" Інтернет-магазин Gaztechnik, Харків (Україна). URL: <https://67425-ua.all.biz/uk/ustanovka-spryamovanogo-prokolu-runtu-mp-250-g613301> (дата звернення: 04.01.2024).

[19] Малогабаритна бурова установка до 75м. ПП «Піка С.В.» Київ. URL: <http://burovaia.com.ua/> (дата звернення: 04.01.2024)

[20] ДБН В.2.5 – 74: 2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проекту-вання. На заміну СНиП 2.04.02-84 ; чинний від 2019-02-01. Вид. офіц. м. Київ : Мінрегіон України, 2019. 301 с.

[21] ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012. Настанова з будівництва, монтажу та контролю якості трубопроводів зовнішніх мереж водопостачання та каналізації. На заміну СНиП 3.05.04-85 ; чинний від 2013-10-01. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. 74 с.

[22] ДБН Б.2.2-12:2019. Планування та забудова територій. На заміну ДБН Б.2.2-12:2018 ; чинний від 2019-10-01. Вид. офіц. м. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2019. 178 с.

[23] ГБН В.2.3-37641918-555:2016. ГБН В.2.3-37641918-555:2016 Автомобільні дороги. Транспортні розв'язки в одному рівні. Проектування. Зі зміною № 1. На заміну ВБН В.2.3-218-192:2005 ; чинний від 2016-07-01. Вид. офіц. м. Київ : М-во інфраструктури України, 2016. 18 с.

[24] ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Зі Зміною № 1. На заміну СНиП 2.04.03-85 ; чинний від 2019-02-01. Вид. офіц. м. Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2018. 13 с.

[25] Закон України. «Про охорону навколишнього природного середовища». Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення: 20.08.2023).

[26] Закон України. «Про оцінку впливу на довкілля». Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення: 20.08.2023).

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

[27] Закон України «Про землеустрій». Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text> (дата звернення: 20.08.2023).

[28] Закон України. «Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів». Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2480-17#Text> (дата звернення: 20.08.2023).

[29] Закон України. «Про охорону земель». Режим доступу <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/962-15#Text> (дата звернення: 20.08.2023).

[30] ДБН В.2.5.16-99. Інженерне обладнання споруд, зовнішніх мереж визначення розмірів земельних ділянок для об'єктів електричних мереж. Режим доступу [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=4692](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4692) (дата звернення: 20.08.2022).

[31] Посмітюха О. П. Створення та обґрунтування параметрів робочого органу для сумісного безтраншейного прокладання лінійно-протяжних об'єктів: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04. м. Дніпро, 2023. 201 с.

[32] Antonets Yu., & Obozny A. L. (2020). Xlpe-insulated power cables for voltages from 6 kV up to 30 kV. PJSC Factory "Yuzhcable". Kharkiv

[33] Якименко О. В. Земляні роботи: навч. посіб. Харків : Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекет., 2018. 158 с.

[34] Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice : підручник. New York : Wiley-Interscience, 1996. 534 p.

[35] Флорин В. А. Основы механики грунтов : підручник. Москва : Госстройиздат, 1961. 448 с.

[36] Руднев В. Результаты по резанию грунтов прямолинейными ножами. Изв ВУЗов Строительство и архитектура. 1964. Т. 1, № 9. С. 112–117.

[37] Тимошенко В. Определение формы наконечника, обеспечивающей минимальное усилие прокола. Строительство трубопроводов. 1969. № 3. С. 18–20.

[38] Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов.: підручник. Москва: Стройиздат, 1971. 368 с.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

[39] Гене В. М., Тимошенко В. К. Влияние угла заострения конического наконечника на усилие прокола. Горные, строительные и дорожные машины. Горные, строительные и дорожные машины. 1970. Т. 9, № 9. С. 50–53.

[40] Руднев В.К. Копание грунтов землеройно-транспортными машинами активного действия. Х.: Вища школа, 1974. 144 с.

[41] Кравец С.В., Руднев В.К., Каслин Н.Д., Супонев В.Н. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учебное пособие. Харьков: ООО «Фавор», 2008. 256 с.

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

[43] Вазетдинов А.С. Прокладка горизонтальных скважин под кабелепроводами вибропроколом и гидромеханизированным способом. М.: Госстройиздат 1961. 97 с.

[44] Кравець С.В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. Рівне: Видавництво РДТУ, 1999. 277 с.

[45] Кравець С.В., Кованько В.В., Лукянчук О.П. Наукові основи створення землеройно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 322 с.

[46] Хмара Л.А., Кравець С.В., Скоблюк М.П. и др. Машины для земляных работ: учебник; за заг. ред. д.т.н., проф. Л.А. Хмари та д.т.н., проф. С.В. Кравця. Х.: ХНАДУ, 2014. 548 с.

[47] Кравець С.В. Теорія руйнування робочих середовищ: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2008. 124 с.

[48] Полтавцев, И., Ляхович, И. & Орлов, В. (1973). Комплексная механизация строительства линий связи. Киев.

[49] Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[50] Посмітюха, О. & Главацький, К. (2012). Методи безтраншейного утво-рення технологічних порожнин у ґрунті для прокладання комунікацій. Вестн. Ха-р'к. нац. автомоб.-дор. ун-та: сб. науч. тр. – Вып. (57), 214-221. <http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/356>.

[51] Кравець С.В., Супонєв В.М., Посмітюха О.П. Аналітичний спосіб визначення опору ґрунту занурення конусного наконечника в ґрунт. Строите-льство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр. Приднепровской академии строительства и архитектуры. 2017. № 97. С.91-98.

[52] Кравець С.В., Супонєв В.М., Посмітюха О.П. Визначення еквіва-лентного та оптимального діаметрів конічно-ціліндричного наконечника з ви-ступами для проколювання ґрунту. Наука та прогрес транспорту Вісник ДНУ-ЖДТ. 2017. №4 (70). С. 89-98.

[53] Posmitiukha, O., Hlavatskyi, K., Kravets, S., Suponyev, V. and Koval, A. (2020). Analytical method of determining the movement resistance of a tip for forming rectangular technological hole in the lower structure tracks. 15th International Scientific and Technical Conference "Problems of the railway transport mechanics" (PRTM 2020), Dnipro, Ukraine, Volume 985. DOI 10.1088/1757-899X/985/1/012033

[54] Posmituha, O., Kravets, S., Suponyev, V. & Hlavatskyi, K. (2018). Determination of equivalent and optimal sizes of wedge tip from flange for the static perforation of soil. 7th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings” (Transbud-2018). Section: Railways, Subways and Industrial Transport. Article Number-01011, 230. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001011>.

[55] Posmituha, A. Kravets, S., Suponyev, V., & Kulazhenko, Y. (2018). 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. INDUSTRIAL AND TECHNOLOGY SYSTEMS. Published online: (5, № 1(43)),

11-16. URL: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/146626/146478>. (Index Copernicus).

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

[57] Тимошенко В.К. Определение формы наконечника, обеспечивающей минимальное усилие прокола. Строительство трубопроводов. 1969. №3. С. 18–20.

[58] Asperger M., Jeremic B. Examination of the Cavity Expansion Model: Predicting Hydrofracture During Horizontal Directional Drilling. ECI 284: Theoretical Geomechanics. Term Project. March 23, 2012, 256-267.

[59] Посмітюха, О. & Главацький, К. (2012). Обґрунтування поперечного перерізу безтраншейно утворених технологічних порожнин у ґрунті для комунікацій. Вестн. Харьк. нац. автомоб.-дор. ун-та: сб. науч. тр. (57), 195-202. <https://crust.ust.edu.ua/items/5fd71740-c095-4d7b-b91c-8772cd7ecef3>.

[60] ДСТУ-Н Б В.2.1-28:2013. Настанова щодо проведення земляних робіт, улаштування основ та спорудження фундаментів. Режим доступу [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=54094](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=54094) (дата звернення: 20.08.2022).

					ДІТ. 630000. 309. КРПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

