

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗОНИ УЩІЛЬНЕННЯ ТА ТИСКУ ҐРУНТУ НА ПІДЗЕМНІ КОМУНІКАЦІЇ ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ ЙОГО КЛИНОВИМ НАКОНЕЧНИКОМ

Посмітюха О. П., Кравець С. В., Супонєв В. М.

1. Вступ

Висока конкуренція у сфері містобудування змушує інженерів створювати нові машини для виконання будівельних робіт, що дасть змогу знизити собівартість виконання робіт, зменшити вартість та тривалість робіт, зменшити вплив на міську інфраструктуру та жителів міста. Використання прогресивних робочих органів дасть можливість конкурувати на ринку послуг. Нова форма робочого органу дасть можливість визначити величину тиску на підземні комунікації, знати напрямок та зону небезпечного сусідства.

Сучасні вимоги диктують необхідність одночасного прокладання декількох захисних футлярів у вигляді труб-футлярів кількістю до 8 та більше. Традиційно свердловина формується круглої форми робочим органом з наконечником конусної форми. Прокладання футлярів у цьому випадку здійснюється у вигляді пучка з кількох окремих елементів протягнутих в один отвір. Відповідно, чим більший діаметр свердловини, тим більша вірогідність пошкодження дорожньої основи або прилеглих комунікацій, що вимагає значно збільшувати відстань до них. Однорядне прокладання труб клиновим наконечником, який повинен бути використаний при цьому, дозволяє змінити та контролювати зону ущільнення та її вплив на об'єкти, що розташовані поблизу в масиві ґрунту.

Таким чином, пошук шляхів удосконалення технології статичного проколу ґрунту для прокладання лінійно протяжних об'єктів (ЛПО) є актуальною задачею. При розробці технічних рішень необхідно враховувати необхідність одночасного прокладання декількох трубопроводів та тиск деформованого ґрунту на прилеглі комунікації

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом даного дослідження є робочий орган з клиновим наконечником для статичного проколу ґрунту з одночасним прокладанням декількох футлярів. Відсутність аналітичних розрахунків сил впливу тиску ґрунту від просування клинового наконечника не дає можливості провести його порівняльний аналіз з традиційним методом отримання свердловини круглої форми.

Опір просуненню робочого органу циліндричної форми визначається параметрами робочого органу та властивостями ущільненого ґрунту, описані авторами в [1–3].

Опір просуненню робочого органу визначається параметрами робочого органу та властивостями ущільненого ґрунту.

Параметри клинового наконечника (рис. 1) визначаються діаметром футлярів (захисних труб, в яких потім протягують комунікації), які повинні вільно затягуватись в утворену порожнину та їх кількістю.

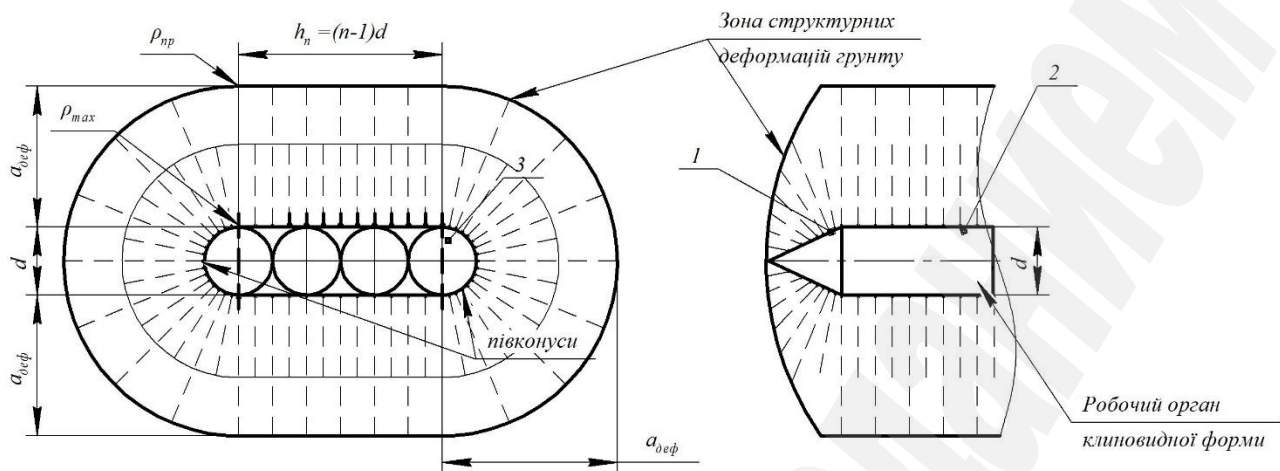


Рис. 1. Розташування робочого органу в ґрунті та зона деформації, а також надмірного тиску: 1 – клиновидна частина робочого органу, 2 – плоска направляюча з півкруглими краями; 3 – футляри

В умовах щільної забудови міст та великої кількості інженерних мереж, що розташовані під поверхнею, використання клинового ножа дозволить в практичних умовах значно підвищити ефективність безтраншейного прокладання підземних комунікацій. Збільшення кількості футлярів, що прокладаються одночасно, не призводить до зростання зони впливу та тиску на прилеглі комунікації від ущільнення ґрунту.

Одними з проблемних місць, що потребують дослідження, є прокладання, розташування та сусідство різних видів підземних комунікацій, прокладених безтраншейним способом. Вивчення зони впливу робочих органів на ґрунт та комунікації дасть можливість більш якісно проектувати використання підземного простору, знизити ризики пошкодження або руйнування комунікацій та знизити вартість робіт.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – удосконалення технології статичного проколу ґрунту шляхом одночасного прокладання інженерних комунікацій робочим органом з клиновидним наконечником. Це дозволить підвищити якість виконання робіт та зменшити енергозатрати процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Отримати теоретичний спосіб визначення тиску ґрунту, при просуванні клинового робочого органу.
2. Визначити закон зміни щільності ґрунту по товщині наконечника та встановити тиск ґрунту на підземні комунікації, які потрапляють у зону дії пружно-пластичних деформацій.
3. Вивчити вплив розмірів робочого органу та властивостей ґрунту, та його тиску на прилеглі комунікації.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Основними напрямками розвитку безтраншейних технологій прокладання комунікацій у світі є горизонтально направлене буріння та мікрононелювання у

вигляді статичного проколу з ексвацією ґрунту. В ресурсах світової наукової періодики, можуть бути виділені роботи [4, 5], де розглянуті активні методи безтраншейних технологій, але в них мало приділено уваги статичному проколу.

Дослідження [5, 6] присвячені вибору та обґрунтуванню вибору способу виконання робіт, з детальним аналізом переваг та недоліків різних технологій. А в роботах [7, 8] особливу увагу приділяють безтраншейним технологіям спорудження та ремонту трубопроводів великої протяжності. Слід відмітити дослідження [6], яке присвячене вибору способу та планування виконання особливо відповідальних робіт, що виконуються безтраншейним способом.

В роботі [9] описані можливості розширення безтраншейних технологій до розмірів мікротонелювання та способи і варіанти робіт.

Цікавою виявилася робота [10], де визначали вплив ґрунту та комунікацій, що розташовані над ними, на самі труби, що прокладені на певній глибині. Але у цій роботі зовсім не відображене питання можливості додаткового прокладання труб поруч, та вплив при цьому робочих органів на них.

Багато уваги польовим випробуванням та розрахунку осьових зусиль прокладання комунікацій безтраншейним способом приділено в роботах [11, 12], але жоден з авторів цих робіт не приділяє достатньої уваги статичному проколу.

Окремо виділимо дослідження можливості впровадження безтраншейних технологій в твердих породах [13] або ґрунтах 4–5 категорії.

Вченими, які займаються вирішенням проблеми безтраншейного прокладання підземних комунікацій з мінімальними енергозатратами, в останні роки присвячено багато досліджень. Так, в роботах [2, 14] велику увагу приділено проколюванню ґрунту на невеликі відстані до 50 м. Вивчення процесу статичного проколу ґрунту та його напружень навколо робочого органу при формуванні свердловини відображено в роботі [15].

Характер процесу глибокого різання ґрунтів ножовими робочими органами при прокладанні кабелів та дренажів в зоні закритичної глибини різання має спільний характер взаємодії з ґрунтом з клиновим наконечником [16, 17]. Останній характер полягає в ущільненні ґрунту на обидва боки клиновидної стойки ножа. Це може бути покладено в основу вивчення процесів, які відбуваються під час просування клинового робочого органу в ґрунті. Але він в повній мірі не відображає специфіку процесу однорядного прокладання декількох футлярів одночасно та дає нечітку відповідь щодо впливу деформованого ґрунту на прилеглі комунікації під час утворення порожнини.

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок про те, що процес проколу ґрунту робочими органом у вигляді клиновидного наконечника раніше не вивчався.

5. Методи досліджень

З роботи [3] відомо, що прокол ґрунту конусним наконечником може бути ефективним в межах діаметру свердловини, яке отримано з умови оптимального опору. Так, було встановлено, що максимальне зниження опору проколюванню має місце:

- для твердого супіску при діаметрах $D=0.2\dots0.25$ м;

- для напівтвердого суглинку при діаметрах $D=0.13\dots0.17$ м;
- для тугопластичної глини при діаметрах $D=0.12\dots0.13$ м.

Очевидним є те, що крізь такі порожнини кількість прокладання труб обмежена, особливо звертаючи увагу на те, що їх діаметри складають не менше 100 мм.

Проведення дослідження процесу проколу ґрунту робочим органом з клиновидним наконечником є достатньо трудомістким та коштовним процесом. Тому теоретичне обґрунтування перспективи впровадження клиновидного ножа при безтраншейному прокладанні підземних комунікацій та уявлення про закономірності процесу проколу запропонованим робочим органом дозволить визначитись з подальшими технічним удосконаленням розробки та плануванням її експериментального дослідження.

Розрахункові залежності отримані шляхом інтегрованого та диференційного обчислюваного рівнянь, що відображають математичну модель процесу просування робочого органу в ґрунті.

Дослідження базуються на основних положеннях теорій механіки ґрунтів та їх різання.

На основі закону збереження маси до і після ущільнення ґрунту клиновим наконечником маємо схему для визначення опору клинового наконечника (рис. 2):

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

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

d – діаметр лінійно протяжного об'єкту ЛПО;

n – кількість ЛПО, які одночасно прокладаються;

$\rho_{\text{пр}}$ – природна щільність ґрунту;

ρ_x – закономірність зміни щільності ґрунту в деформованій зоні.

У першому наближенні закономірність зміни щільності ρ_x можна прийняти лінійною в залежності від відстані до бокової стінки отвору [16] (рис. 2).

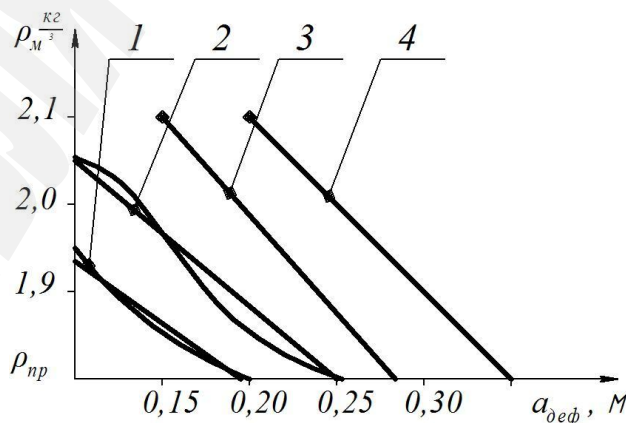


Рис. 2. Закономірність зміни щільності ґрунту в деформованій зоні в залежності від розмірів отвору [17]: 1 – футляр розміром 0,13 м; 2 – футляр розміром 0,19 м; 3 – футляр розміром 0,245 м; 4 – футляр розміром 0,325 м

Прийнята закономірність зміни щільності показана на рис. 3:

$$\rho_x = \rho_{np} + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}}\right) (\rho_{max} - \rho_{np}), \quad (2)$$

де ρ_{max} – максимальна щільність ґрунту в боковій стінці отвору.

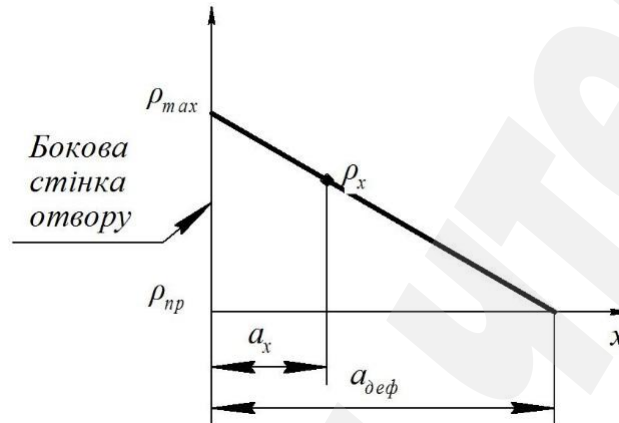


Рис. 3. Прийнята закономірність зміни щільності ґрунту

З урахуванням (1) рівність (2) переписеться у вигляді:

$$\begin{aligned} \left(a_{деф} + \frac{d}{2}\right) \rho_{np} &= \int_0^{a_{деф}} \left[\rho_{np} + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}}\right) (\rho_{max} - \rho_{np}) \right] dx = \\ &= \rho_{np} a_{деф} + (\rho_{max} - \rho_{np}) a_{деф} - (\rho_{max} - \rho_{np}) \frac{a_{деф}}{2} = \frac{\rho_{max} + \rho_{np}}{2} a_{деф}. \end{aligned} \quad (3)$$

Величину середньої щільності $\frac{\rho_{max} + \rho_{np}}{2} = \rho_{сер}$ після ущільнення ґрунту визначено в роботі [1]:

$$\rho_{сер} = \frac{\rho_{np}}{1 - 1/\lambda^2}, \quad (4)$$

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

$$\lambda = \frac{\left(\gamma_{гр} h + \frac{c}{tg \varphi_0}\right) tg^4 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}\right)}{\sigma_1}, \quad (5)$$

де γ_{gp} – питома сила тяжіння ґрунту;

h – глибина, на якій здійснюється прокол;

c – коефіцієнт зчеплення ґрунту;

φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту;

σ_1 – напруження на границі пружної і пластичної зон деформування ґрунту [1]:

$$\sigma_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} = \left| \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \right|, \quad (6)$$

$$\text{де } \begin{cases} A = \sin \varphi_0 (3 - \sin \varphi_0), \\ B = 3c \cos \varphi_0 - 2.5c \sin 2\varphi_0 + \gamma_{gp} h (1 + \sin \varphi_0), \\ C = [\gamma_{gp} h (1 + \sin \varphi_0) + 4c \cos \varphi_0] c \cos \varphi_0. \end{cases}$$

Якщо підставити залежності (4) і (5) у рівняння отримаємо:

$$a_{\text{деф}} = (\lambda^2 - 1) \frac{d}{2} = \left[\frac{\left(\gamma_{gp} h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right)^2 \operatorname{tg}^8 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (7)$$

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

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

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

$$a_{\text{деф}} = \left[\frac{\frac{c^2}{\operatorname{tg}^2 \varphi_0} \operatorname{tg}^8 \left(\frac{\pi}{4} + \varphi_0 \right)}{\sigma_1^2} - 1 \right] \frac{d}{2}. \quad (9)$$

Якщо прийняти, що $\lambda = 5,4 \dots 6,0$ – для твердого супіску; $\lambda = 4,3 \dots 4,8$ – для напівтвердого суглинку; $\lambda = 4,0 \dots 4,3$ – для тугопластичної глини [1], тоді середня щільність ґрунту в пружно-пластичній зоні дорівнює:

- для твердого супіску – $\rho_{сер} = (1,03...1,04)\rho_{np}$;
- для напівтвердого суглинку – $\rho_{сер} = (1,05...1,06)\rho_{np}$;
- для тугопластичної глини – $\rho_{сер} = (1,06...1,07)\rho_{np}$.

За експериментальними даними виробничих випробувань безтраншейних дренажних систем, які працюють з утворенням закритичної зони $\rho_{сер} = (1,05...1,08)\rho_{np}$ [17].

Для приведеної середньої щільності ґрунтів величина зони їх деформування складає:

- для твердого супіску – $a_{деф} = (14,0...17,5)d$;
- для напівтвердого суглинку – $a_{деф} = (8,7...11,0)d$;
- для тугопластичної глини – $a_{деф} = (7,5...8,7)d$.

6. Результати досліджень

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

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

$$= \frac{(1+\omega)\rho_{ме}}{c_k \rho_{np}} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}} \right) \left(\frac{\rho_{max}}{\rho_{np}} - 1 \right)} \right] = E_{zp} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{a_{деф}} \right) \left(\frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2 - 1} \right)} \right],$$
(10)

де c_k – коефіцієнт компресії ґрунту ($c_k = 0,07...0,09(\omega_T - 10)$, МПа⁻¹) [5];

ω – природна вологість ґрунту;

ω_T – межа текучості ґрунту;

$E_{zp} = \frac{(1+\omega)\rho_{ме}}{c_k \rho_{np}}$ – компресійний модуль деформації ґрунту [2, 3].

Побудовано графіки q_x в залежності від відстані x від бокової грані клину для твердого супіску, напівтвердого суглинку та тугопластичної глини (рис. 4). Для побудови прийємомо для обох робочих органів [1–3]:

- кількість однакових футлярів, що прокладаються одночасно $n=5$ шт.;
- глибина прокладання комунікацій $h=1.5$ м;
- діаметр футлярів 100, 200, 300, 400 та 500 мм;
- характеристики твердого супіску – $E_{zp}=1.39$ МПа, $\lambda=5.6$, $a_y=15.2d$;

- характеристики напівтвердого суглинка – $E_{zp}=0.892$ МПа, $\lambda=4.5$, $a_y=9.63d$;
- характеристики тугопластичної глини – $E_{zp}=0.631$ МПа, $\lambda=4.2$, $a_y=8.32d$.

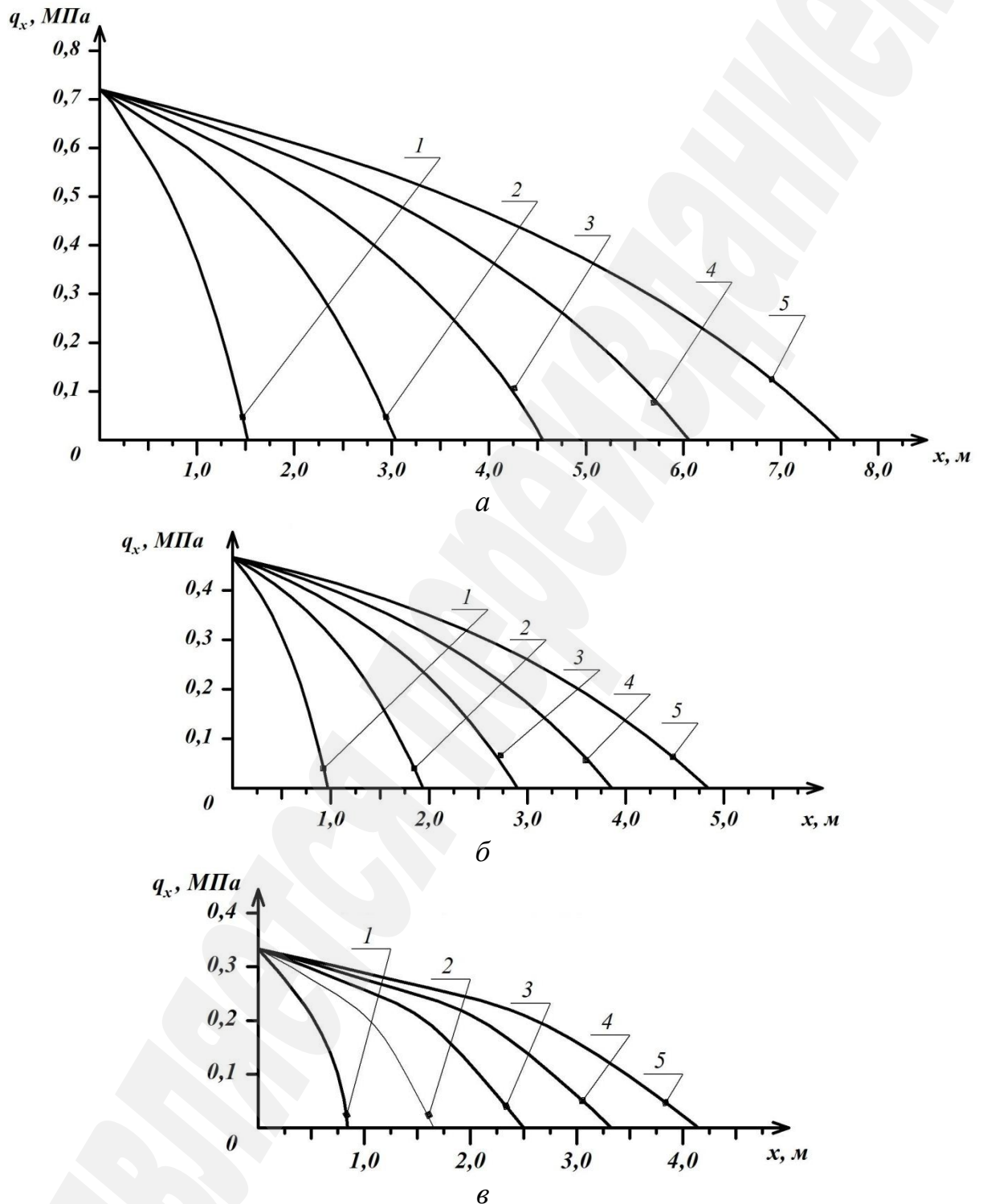


Рис. 4. Залежність тиску ґрунту на підземні комунікації від відстані, діаметра, кількості футлярів та форми робочого органу $n=5$ шт., $h=1.5$ м: *a* – твердий супісок; *б* – напівтвердий суглинок; *в* – тугопластична глина: 1, 2, 3, 4, 5 – клиновий плоский робочий орган діаметру футляра, відповідно, 100, 200, 300, 400 та 500 мм

З рис. 4 чітко видно, що використання досліджуваного робочого органу суттєво залежить від розміру футляру та обмежене по глибині прокладання. Мала глибина приведе до випручування денної поверхні ґрунту.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

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

Weaknesses. Слабкі сторони даного дослідження пов'язані з тими обставинами, що теоретичні рішення по визначенню технологічних особливостей проколу ґрунту робочим органом з клиновим наконечником не отримали експериментального підтвердження деяких положень. Авторські твердження базуються на порівнянні уявлень з аналогічних досліджень, які були проведені з ножовими робочими органами машин для глибокого прокладання підземних комунікацій.

Opportunities. Додаткові можливості дослідження полягають в підвищенні якості та зниженні витрат при виконанні робіт для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій. Це впливає з того, що ущільнення ґрунту навколо порожнини має постійний характер не залежно від кількості труб, що прокладаються. А це, в свою чергу, дає можливість ближче наблизитися до поверхні доріг, не руйнуючи її основи. Це ж має значення при прокладанні комунікацій поблизу з іншими підземними спорудами та з прилеглими комунікаціям. Прокладання декількох трубопроводів крізь традиційну свердловину циліндричної форми такої можливості не має. Крім того, використання клинового наконечника дає значну економію енергозатрат, завдяки меншого опору ґрунту проколу при аналогічній кількості трубопроводів, що прокладаються.

Threats. На даному етапі ще не закінчені експериментальні дослідження тиску ґрунту на сусідні комунікації в різних напрямках по відношенню до робочого органу. Зовсім не проведено досліджень з використання даного робочого органу в ґрунтах, що мало стискаються. Не приводились навіть теоретичні дослідження по зміні положення робочого органу в процесі протягування.

Таким чином, SWOT-аналіз результатів дослідження визначив пріоритети

подальших досліджень:

- вивчити вплив твердих включень на траєкторію руху робочого органу;
- вивчити вплив вологості ґрунту на його тиск на прилеглі комунікації;
- розглянути можливість використання даного робочого органу для ремонту трубопроводів.

8. Висновки

1. Встановлено, що одночасне прокладання декількох трубопроводів більш ефективно прокладати установками статичної дії з робочим органом, у якого наконечник має клинову форму. Розрахунками встановлено, що опір ґрунту при однорядному прокладанні трубопроводів робочим органом з клиновим наконечником, в порівнянні з традиційним прокладанням декілька трубопроводів одним пучком крізь свердловину з круглим отвором, менше на:

- 50 % при прокладанні 2 футлярів;
- 31 % при прокладанні 3 футлярів;
- 20 % при прокладанні 4 футлярів;
- 19 % при прокладанні 5 футлярів;
- 44 % при прокладанні 10 футлярів.

2. Визначено закон зміни щільності ґрунту по товщині наконечника, встановили тиск ґрунту на підземні комунікації, які потрапляють у зону дії пружно-пластичних деформацій. За отриманими графіками визначили мінімальну глибину прокладання комунікацій. Слід відмітити майже лінійну залежність зміни тиску від максимального до природного по товщині робочого органу.

3. Розглянута форма поперечного перерізу отвору та створена аналітична залежність зміни тиску ґрунту на робочий орган від форми та кількості лінійно протяжних об'єктів, що прокладаються одночасно. Отримані залежності дають змогу стверджувати, що при такій формі отвору в залежності від кількості комунікацій, що прокладаються одночасно можна зменшити зусилля протягування. А також зменшити зону структурних змін у ґрунті навколо отриманої порожнини та тиск на сусідні комунікації у порівнянні з традиційним конусним наконечником. Таким чином можемо резюмувати, що така форма робочого органу має право на життя та з часом займе своє місце в лінійці робочих органів для безтраншейного прокладання футлярів.

Література

1. Кравець С. В., Кованько В. В., Лукянчук О. П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 322 с.
2. Кравець С., Посмітюха О., Супонев В. Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт // СММ ПДАБА. 2017. Вып. 103. С. 91–98.
3. Кравець С., Посмітюха О., Супонев В. Визначення еквівалентного і оптимального діаметрів конічного наконечника з виступами для проколювання ґрунту // НІТ ДНУЗТ. 2017. Вип. 70. С. 89–98.

4. Allouche E. N., Ariaratnam S. T. State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Pipelines, 2002. doi: [http://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](http://doi.org/10.1061/40641(2002)55)
5. Pridmore A., Geisbush J. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling // Pipelines 2017. Pipelines Planning and Design Book set. 2017. P. 553–563. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784480878>
6. Hastak M., Gokhale S. Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. New York, 2009. doi: <http://doi.org/10.1115/1.802922.paper30>
7. Bian Z. J. L. Trenchless technology underground pipes. Machinery Industry Press, 2014. 187 p.
8. Xin J. Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. 2014. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784413821.051>
9. Sterling R. L. International Technology Transfer in Tunneling and Trenchless Technology // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. Baosong Ma, ASME, 2009. doi: <http://doi.org/10.1115/1.802922.paper6>
10. A Comparative Study of Soil Pressure and Deformation of Pipes Installed by the Open-Cut Method and Trenchless Technology / Tsung N. et. al. // Pipelines 2016: Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk. 2016. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784479957.132>
11. Najafi M., Gunnink B., Davis G. Details of Field Testing of Major Trenchless Technology Methods for Road Crossings // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. Baosong Ma, ASME, 2009. doi: <http://doi.org/10.1115/1.802922.paper4>
12. Chehab A. G., Moor I. D. One-dimensional calculation for axial pullback for axial pullback distributions in pipes during directional drilling installations. Ottawa Geo, 2007. P. 1140–1154.
13. Guojun W., Xiaoming W., Han C. Trenchless Pipe-Paving in Complex Hard Stratum by Directional Drilling Technology // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Baosong Ma, ASME. New York, 2009. doi: <http://doi.org/10.1115/1.802922.paper26>
14. Балесный С. Особенности процессов статического прокола грунта // Вісник ВХНАДУ. 2017. Вып. 76. С. 138–141.
15. Хачатурян С., Олексин В. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её формирования методом статического прокола грунта // Вісник ВХНАДУ. 2016. Вып. 73. С. 196–202.
16. Высокопроизводительные гидropневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций / состав. Ешуткин Д. Н. М.: Стройиздат, 1990. 171 с.
17. Томин Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа. М.: Колос, 1981. 240 с.