

УДК 624.132.3

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.80

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РОЗШИРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПОРОЖНИНИ В ҐРУНТІ КЛИНОВО-ПРИЗМАТИЧНИМИ ТА КОНІЧНО-ЦИЛІНДРИЧНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Посмітюха О. П.

Український державний університет науки і технологій

Анотація. Статичне проколювання ґрунту є ефективною технологією для безтраншейного прокладання підземних комунікацій у складних міських умовах на великих глибинах та ускладнених ґрунтах. Ця технологія дає змогу зменшити витрати на будівництво та зберегти територію, час і кошти. У статті розглянуто проблему розширення попередньо отриманої методом керованого статичного проколювання технологічної порожнини в ґрунті (далі ТПГ) для прокладання підземних лінійно-протяжних об'єктів (далі ЛПО) міських комунікаційних мереж. За умови групового прокладання комунікацій в одній порожнині виникає потреба отворів великих розмірів, що призводить до суттєвого збільшення робочих сил та габаритів робочого обладнання. Єдиним виходом з такої ситуації є використання робочих органів (далі РО) клиново-призматичної форми, ступеневе розширення отвору в декілька етапів та зміна вологості ґрунту в стінках порожнини отвору. Основною метою є створення методики інженерного розрахунку параметрів робочих органів клиново-призматичної форми та визначення зусиль статичного розширення ТПГ на основі відомої вихідної інформації про ґрунти та форму РО. Дослідження ґрунту ґрунтується на теорії незмінності маси ґрунту до проколювання та після. У процесі розширення ТПГ до необхідного розміру щільність ґрунтового середовища змінюється від природного значення до твердого стану, після чого ґрунт просто переміщується на деяку відстань від осі порожнини, ущільнюючи сусідні масиви. Обґрунтовано гіпотезу взаємодії клиново-призматичних наконечників із ґрунтом за умови статичного проколювання на основі визначеного закону зміни щільності ґрунту по товщині клиново-призматичного наконечника. Отримані теоретичні залежності для визначення раціональних параметрів РО клиново-призматичної форми, опору послідовного розширення ТПГ для ЛПО після стартового проходження лідерного отвору, або порожнин первинного розширення. Запропоновано методику визначення сили проколювання ТПГ для ЛПО після лідерного проходження з урахуванням пружних (зворотних) деформацій ґрунту, його вологості, форми РО та характеристик силового обладнання, як різницю між повним і пілотним опором проколювання ґрунту, а також рекомендації щодо можливості зменшення цих сил зміною форми робочого обладнання або вологості ґрунту.

Ключові слова: проколювання, розширення, пілотний прохід, технологічна порожнина, лінійно-протяжний об'єкт, клиново-призматичне робоче обладнання, вологість, ґрунт.

Вступ

Безтраншейні технології прокладання, відомі у світі як TRENCHLESS TECHNOLOGIES, або NO-DIG, є варіантом виконання будівельних робіт у підземному просторі без розтину ґрунту. Прокладання комунікацій безтраншейними технологіями є одним із новітніх та ефективних способів проведення робіт у галузі будівництва та інженерії. Ці технології дають змогу проводити роботи без знищення ландшафту та без порушення наявних інфраструктурних мереж, що зменшує час та витрати на виконання проекту, а також ризик пошкодження наявних комунікацій і мереж. Процеси формування ТПГ способом статичного проколювання та продавливання ґрунту мають суттєві відмін-

ності та особливості в технологічному й фізичному аспекті [11, 12, 19].

Аналіз публікацій

Питання аналізу стану підземних комунікацій, проектування способів прокладання та ремонту розглядаються в роботах [5, 9, 11–13], де здебільшого досліджуються технології ремонту з використанням горизонтально направленої буріння (далі ГНБ), що не зовсім підходить в умовах щільної міської забудови та наявності наявних комунікаційних мереж. Особливості ГНБ-технологій з інтенсивним використанням бурового розчину описано в працях [6–8].

Конструктивні та режимні параметри робочого обладнання для статичного проколю-

вання ґрунту [7–8, 10, 15], а також механізм осьової подачі наконечників РО для формування ТПГ значною мірою визначається фізико-механічними властивостями ґрунту [17–20]. Для створення нових конструкцій РО і технологічних процесів, що пов'язані з розробкою ґрунтів, необхідно знати їх фізико-механічні характеристики [17, 18] і визначити можливі фактори, які б сприяли підвищенню ефективності процесу взаємодії РО з ґрунтом [1, 2, 20].

Розглянемо фізичну картину процесу взаємодії робочого органа з ґрунтовим масивом для обох випадків [18, 21]. Як показав теоретичний аналіз, процес горизонтального проколювання порівнюється з вертикальним заглибленням паль, коли перед їх кінцем, що заглиблюється, утворюється ґрунтове ядро ущільнення, яке створює додатковий лобовий опір під час виконання робіт [20, 21]. Джерела ґрунтуються на уявленні про зміну розподілу приведеного тиску ґрунту на поверхню конусної частини наконечника [1]. Обидва погляди оснований на фізичних процесах і мають своє логічне обґрунтування.

Проколювання ґрунту загалом полягає у вдавлюванні в ґрунт металевої труби, що має на кінці конічний або клиново-призматичний наконечник, який взаємодіє з ґрунтом. Цей наконечник ущільнює ґрунт у радіальному напрямі навколо штанги, що пересувається в масиві, формуючи ущільнену зону, величина та радіус якої залежать від властивостей ґрунту [17, 20] та розмірів наконечника [1]. Під час заглиблення наконечника в ґрунт відбувається ущільнення його в стінки ТПГ та стиснення, що обумовлюється зміною пористості, а саме загальним об'ємом пор в ґрунті під дією натискної сили на конічний наконечник [1, 20]. Зміна пористості в зоні заглиблення наконечника можлива тільки за умови зміни структури ґрунту, тобто під час структурних деформацій твердих частинок, їх переміщенні в радіальному напрямку від осі руху наконечника. Структурні деформації визначаються крайнім пружним станом, за якого порушується рівновага, що існувала в структурі ґрунту. Такий пружний стан деякі автори [20, 21] пропонують визначати через величину середнього критичного напруження або так званого коефіцієнта опору ґрунту ущільненню – $\sigma_{уц}$. Абсолютне значення $\sigma_{уц}$ визначається експериментальним способом. Відповідно до роботи [20] для глини його значення може досягати 1,5–2,0 МПа, а для піску – 5–6 МПа. Інші автори пропонують характеризу-

вати ущільнення ґрунтів, яке супроводжується значними змінами їх пористості, величиною тиску, що перевищує так звану структурну міцність ґрунту, коли руйнуються структурні зв'язки частинок ґрунту. Величина структурної міцності ґрунтів визначається за компресійними кривими. У цьому разі ґрунт випробовують малими ступенями навантаження.

Також існує метод визначення структурної міцності за результатами експериментів у компресійних приладах. Необхідно зазначити, що на сьогодні встановлення структурної міцності ґрунтів потребує спеціальних методик, у зв'язку з чим структурна міцність може бути визначена лише з відомим наближенням [63]. У роботах [1, 2] наведені результати досліджень щодо визначення величин і закономірностей змін напруження в масиві ґрунту в процесі статичного проколювання. Розміри зони структурної деформації ґрунту можливо визначити, як 3–6 діаметрів створюваної ТПГ.

Мета та постановка завдання

Усі розглянуті дослідження стосуються класичної форми ТПГ – циліндричної. Але практичне застосування статичного проколювання для отримання ТПГ частіше за все використовується для прокладання гнучких групових лінійно-протяжних об'єктів, а саме кабельних ліній електромереж і мереж зв'язку. Відповідно до вимог стандартів організацій України [15] та Державних будівельних норм ДБН В.2.5-74: 2013, ДБН В.2.5-75: 2013, НПАОП 40.1-1.32-01 одночасно прокладаються від двох до двадцяти окремих футлярів, у яких розміщують ЛПО.

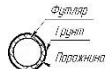
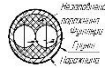
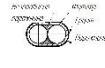
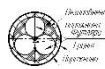
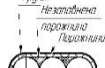
Згідно з проведеними автором цієї статті дослідженнями та практичним застосуванням установок статичного проколювання порожнин у ґрунті, з можливістю корегування траєкторії пілотного проходу, МПК-30-100 фірми ТОВ «МБК Сінергія» (м. Дніпро) було виявлено, що в процесі спорудження кабельних мереж в одній порожнині ТПГ прокладають два, три, рідше чотири футляри, що зі свого боку залишає значний відсоток пустот (табл. 1). Основною метою є створення методики інженерного розрахунку сили проколювання та розширення ТПГ для робочих органів клиново-призматичної форми під час статичного проколювання (рис. 1).

Аналізуючи розрахунки (табл. 1), бачимо, що найбільші пустоти, а відповідно, і площа даремно ущільненого ґрунту, є максимальні

внаслідок прокладання в традиційну круглу форму ТПГ двох футлярів, і відсоток пустот зменшується внаслідок збільшення кількості футлярів понад чотири. Практичне використання клиново-призматичних наконечників РО для розширення ТПГ до потрібних розмірів показало доцільність використання такої форми ТПГ для двох футлярів, оскільки виникає проблема просторової орієнтації ТПГ, а

отже, не допускається перекручування футлярів у ТПГ по всій довжині переходу завдяки тому, що площа ґрунту, а відповідно, і об'єм, який не потрібно ущільнювати, суттєво зменшується, тому й робота, яка витрачається на отримання ТПГ, також зменшується, що приводить до заощадження часу та ресурсів.

Таблиця 1 – Варіанти розташування комунікацій в ТПГ (усе розраховувалося для труби $\varnothing 24$ мм $\varnothing D_{\text{отв}} = 28$ мм)

Схеми розташування футлярів і ТПГ	Площа отриманого ТПГ, $S_{\Sigma \text{ТПГ}}$, см^2 , блакитний колір	Площа необхідного ТПГ $S_{\text{ном}}$, см^2 , круг по дотичній. Площа, що пустує, S_n , см^2 , жовтий колір
	$S_{\Sigma \text{ТПГ}} = 5,98$	$S_{\text{ном}} = 5,16$; $S_n = 0$
	$S_{\Sigma \text{ТПГ}} = 24,03$	$S_{\text{ном}} = 16,62$; $S_n = 8,31$
	$S_{\Sigma \text{ТПГ}} = 12,33$ Зменшення на $\Delta=48,7\%$	$S_{\text{ном}} = 9,45$; Зменшення на $\Delta=43,2\%$ $S_n = 1,14 \text{ см}^2$ Зменшення на $\Delta=86,3\%$
	$S_{\Sigma \text{ТПГ}} = 27,72$	$S_{\text{ном}} = 19,29$; $S_n = 6,35$
	$S_{\Sigma \text{ТПГ}} = 18,68$ Зменшення на $\Delta=32,6\%$	$S_{\text{ном}} = 14,74$ Зменшення на $\Delta=23,6\%$ $S_n = 2,27$ Зменшення на $\Delta=65,2\%$

З огляду на сказане визначимо опір переміщенню підземного багатокомунікаційного робочого органа клиново-призматичної форми в ґрунтовому середовищі в процесі статичного проколювання, що здійснюється для одночасного прокладання об'єктів багатьох ЛПО в будівництві нових комунікаційних мереж.

Основний матеріал дослідження

Лобовий і сумарний опір клиново-призматичного наконечника знайдемо як суму опорів клинової та конічної поверхонь, а також тертя ґрунту по них, і поверхнях, що калібрують ТПГ. Форма клиново-призматичного наконечника РО (рис. 1) має два півконуси, що закінчуються півциліндрами та клином, у середній частині РО, що закінчується плоскою частиною та обрамлений з боків півциліндрами. Тоді для спрощення визначення зусилля проколювання РО ґрунту розділимо все на елементарні фігури: клин і конус.

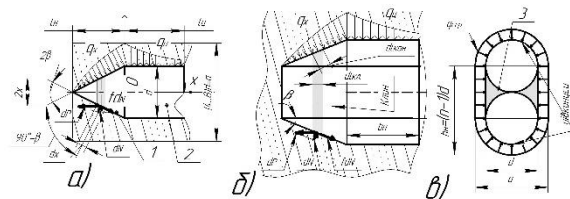


Рис. 1. Взаємодія клиново-призматичного наконечника з ґрунтом: а – клиново-призматичний наконечник (вигляд збоку); б – наконечник (вигляд зверху); в – розташування футлярів у робочому органі в процесі протягування: 1 – клинова частина з півконусами, що проколює; 2 – частина, що калібрує; 3 – футляри

Лобовий опір впровадженню в ґрунт клиново-призматичного наконечника, ширина якого $h_{\text{кл}} = (n-1)d$ та висота дорівнює діаметру d (розмір лінійно-протяжного об'єкта) розміру двох крайніх півконусів, еквівалентних опору одного конуса [2, 3].

$$P_{кл.}^{лоб.} = P_{кл.} + P_{кон.}, \quad (1)$$

$$P_{кл.} = \frac{(n-1)d^2 E_{zp}}{2} (1 + fctg\beta), \quad (2)$$

$$P_{кон.} = \frac{\pi D^2 E_{zp}}{8} (1 + fctg\beta), \quad (3)$$

де $E_{zp} = \frac{(1+\omega)\rho_{m\epsilon}}{c_k \cdot \rho_{np}}$ – компресійний модуль деформації ґрунту; 2β – кут загострення клина; f – коефіцієнт тертя ґрунту по клину; $\rho_{m\epsilon}$ – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту за умови, що в ньому відсутні пори); ρ_{np} – щільність ґрунту в природному стані; c_k – коефіцієнт компресії ґрунту ($c_k = 0,07...0,09(\omega_T - 10)$, МПа⁻¹); ω_T – межа плинності ґрунту або $c_k = 0,1\omega$; ω – природна вологість; D – розмір основи конуса, або діаметр умовного кола, яке описане навколо n футлярів (рис. 2).

Для випадку конічного наконечника для n футлярів, що прокладаються одночасно

$$P_{кон.}^{лоб.} = \frac{\left(\left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\pi}{n}} \right) d \right)^2}{8} E_{zp} (1 + f \cdot c \cdot tg\beta) \quad (4)$$

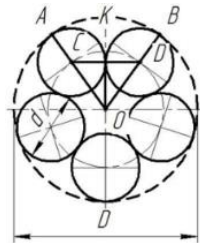


Рис. 2. Визначення діаметра круглого ТПГ за умови групового прокладання n футлярів

Окрім лобового опору на наконечник діятимуть і сили тертя ґрунту по поверхні наконечника. Опір від сил тертя визначається через площу бокової поверхні наконечника, і середній тиск діє на клинову й конічні поверхні. Сумарний опір наконечника матиме вигляд:

$$P_{\Sigma кл.} = \frac{\pi + 4(n-1)}{8} d^2 E_{zp} (1 + fctg\beta) + \left[\pi d + 2(n-1)d \right] b_n f \left[2c \cdot tg \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2} \right) + \frac{a_q}{2} h \right], \quad (5)$$

де φ_0 – кут внутрішнього тертя ґрунту; h – глибина, на якій здійснюється проколювання; σ_1 – напруження на границі пружної та пластичної зон [1, 20]; c – коефіцієнт зчеплення ґрунту.

Сумарний опір заглибленню конусоциліндричного наконечника дорівнює сумі сили лобового опору проколюванню та сили тертя на конічній частині наконечника:

$$P_{\Sigma} = \frac{\pi E_{tp} D^2}{8} (1 + fctg\beta) + 0,1\pi\lambda f D \sigma_1, \quad (6)$$

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

Опір розширенню ТПГ клиново-призматичними та конічно-циліндричними наконечниками.

Отже, більш перспективними є процеси з використанням пілотного проколювання ґрунту та подальшого поступового розширення. Окремо необхідно зазначити, що використання в цьому разі засобів керування траєкторією ТПГ сильно спрощує процес та знижує його вартість.

Опір послідовному розширенню ТПГ для ЛПО після пілотного проходу діаметром отвору d_n – форма отвору кругла.

Якщо прокладання проходить після пілотного проколювання d_n , з урахуванням пружних (зворотних) деформацій ґрунту, то опір розширенню можна визначити як різницю між повним і пілотним опорами проколюванню ґрунту.

Для клинового робочого органа

$$P_{пр.кл.} = \left[\frac{\pi + 4(n-1)}{8} d^2 E_{zp} (1 + fctg\beta_k) \right] - \left[\frac{\pi \left(d_n^2 - \frac{\sigma_1}{E_v} d_n^2 \right)}{8} E_{zp} (1 + fctg\beta) \right], \quad (7)$$

де d_n – діаметр пілотної свердловини, мм; β – половина кута при вершині пілотного конуса.

Для конічно-циліндричного РО

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

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

Для побудови прийемо для обох робочих органів [1–4, 20]:

- $2\beta = 40^\circ$ – подвійний кут при вершині клина та півконуса; – розмір пілотного РО $d_l = 0,08$ м; – довжина РО $l_{ц} = b_n = 0,3$ м;
- кількість однакових футлярів, що прокладаються одночасно $n=1\dots 5$ шт.; – глибина прокладання комунікацій $h=1,5$ м; – діаметр футлярів 100 мм; довжина РО – 300 мм;
- характеристики твердого супіску [17, 18] – $\omega = 10\%$, $c = 0,020$ МПа, $\lambda = 5,611$, $E_{zp} = 2,363$ МПа, $a_q = 0,05$, $a_{деф} = 15,241d$;
- характеристики напівтвердого суглинка [17, 18] – $\omega = 17\%$, $c = 0,04$ МПа, $\lambda = 4,174$, $E_{zp} = 1,071$ МПа, $a_q = 0,044$, $a_{деф} = 8,21d$;
- характеристики тугопластичної глини [17, 18] – $\omega = 23\%$, $c = 0,04$ МПа, $\lambda = 4,539$, $E_{zp} = 0,818$ МПа, $a_q = 0,044$, $a_{деф} = 9,80d$;
- характеристики піску [17, 18] – $\omega = 6\%$, $c = 0,0$ МПа, $\lambda = 15,961$, $E_{zp} = 7,293$ МПа, $a_q = 0,075$, $a_{деф} = 86,8d$.

Побудуємо графіки для порівняння $P_{\Sigma прк.}$ сумарної сили проколювання ґрунту РО клиново-призматичної та конічно-циліндричної форм, підставимо значення у формули (5) та (6) відповідно залежно від кількості футлярів, що прокладаються одночасно, та типу ґрунту (рис. 3).

На рис. 3, 4 використані такі позначки: діаметр пілотного РО $d_l = 0,08$ м, 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.

Суттєве збільшення сили проколювання або розширення отворів наконечником традиційної конічно-циліндричної форми в процесі отримання ТПГ для двох футлярів пояснюється збільшенням розміру отвору удвічі.

Для порівняння побудуємо графіки $P_{\Sigma рзш.}$ зусилля проколювання та поступового розширення ТПГ наконечником, що послідовно збільшує свої розміри на один футляр. У цьому разі формулу (2) замінимо на (7), а (4) – на (8) (рис. 4).

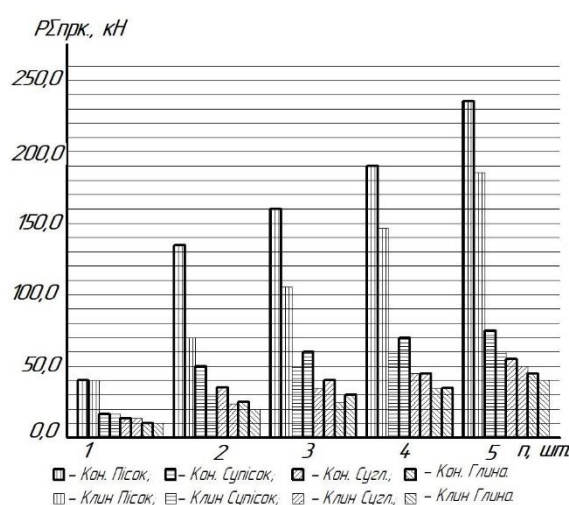


Рис. 3. Вплив кількості футлярів і форми робочого органа на сумарну силу проколювання ТПГ

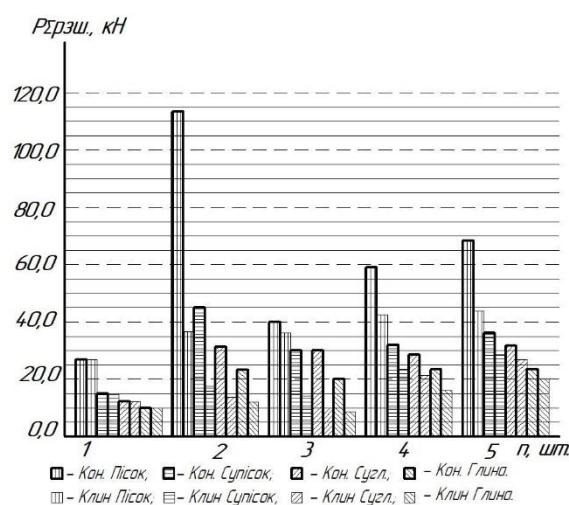


Рис. 4. Вплив кількості футлярів і форми робочого органа на сумарну силу розширення ТПГ

Якщо розширення неможливо провести за один перехід, тоді його повторюють декілька разів для отримання мінімальної сили проколювання (яку може забезпечити робоче обладнання або з умов неруйнування опорних стінок приямків). У цьому разі у формули (7) і (8) послідовно підставляємо відповідні значення, або, використавши формули (5) та (6), послідовно підставляємо їх значення замість параметрів пілотного робочого органа.

Висновки

Створено методику інженерного розрахунку сили проколювання та розширення ТПП для РО клиново-призматичної або конічно-циліндричної форми під час статичного проколювання й оптимізації параметрів РО для зменшення впливу на сусідні підземні комунікації. З допомогою порівняння співвідношення сили лобового опору ґрунту проколюванню клиново-призматичними наконечниками з традиційними конічно-циліндричними РО встановлено відмінність понад 1,2–1,76 рази нижче залежно від кількості футлярів, що одночасно прокладаються.

Вихідними даними для виконання інженерних розрахунків зусиль проколювання ТПП з метою прокладання комунікацій або проектування обладнання є розмір і кількість футлярів, тип ґрунту та його вологість, глибина прокладання комунікації. Решту параметрів ґрунтів беремо з нормативних документів або за результатами лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей ґрунтів [17, 18].

Література

1. Наукові основи та практика створення мінімально енергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті: монографія / С. В. Кравець та ін. Харків: ХНАДУ, 2021. 304 с. ISBN 978-966-303-769-1.
2. Analytical method of determining the movement resistance of a tip for forming rectangular technological hole in the lower structure tracks / O. Posmitiukha et al. Published under license by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 15th International Scientific and Technical Conference "Problems of the railway transport mechanics" (PRTM 2020) (27–29 May) Dnipro, Ukraine, 2020. Vol. 985. P. 1–7. DOI 10.1088/1757-899X/985/1/012033.
3. Determination of equivalent and optimal sizes of wedge tip from flange for the static perforation of soil / Posmitiukha O. et al. 7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud–2018) (November 14–16) Kharkiv, Ukraine, 2018. Vol. 230. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001011>
4. Analytical method of determining the movement resistance of a tip for forming rectangular technological hole in the lower structure / Posmitiukha O. et al. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження: тези доп. XV Міжнар. наук.-техн. конф.* / Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна та ін. Дніпро, 2020. С. 138–139. URL: http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12685/1/XV_Conference.pdf.
5. Cohen A., Ariaratnam Samuel T. Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. *Pipelines 2017: Planning and Design* (553–563). <https://doi.org/10.1061/9780784480878>.
6. Ditch Witch. Equipment NO-DIG. directional drills. Electronic resource (USA). 2021. URL: <https://www.ditchwitch.com/directional-drills>.
7. HDD technology and methods of horizontal drilling rigs PERFORATOR (USA). 2021. URL: <https://www.ditchwitch.com/directional-drills>.
8. The advantages of the NO-DIG systems from TRACTO-TECHNIK (Germany). 2021. URL: <https://tracto.com/en/Products/grundodrill-the-new-generation>.
9. Najafi M., Sanjiv Gokhale. *Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal*, Second Edition Hardcover. McGraw-Hill Education, 2021. 544 p. ISBN: 9781260458732.
10. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V. A. PENCHUK et al. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. № 2. P. 100–107. Access Mode: doi:10.5862/MCE.54.11.
11. Current water main rehabilitation practice using trenchless technology / Yichen Wu et al. *Water Practice and Technology*. 2021. Vol. 00. No. 01. P. 17. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.026>.
12. Willoughby D. A. *Horizontal Directional Drilling: Utility and Pipeline Applications*. McGraw-Hill, New York, 2005. ISBN: 9780071454735.
13. Zhao Jun Ling Bian. *Trenchless technology underground pipes*. China, 2014. 187 p. ISBN-13: 978-7111455707.
14. Ba National Research Council. 2013. *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. Washington, 2013. DC: The National Academies, 246 p.
15. Antonets Yu., Obozny A. L. *XLPE-INSULATED POWER CABLES for voltages from 6 kV up to 30 kV*. PJSC Factory "Yuzhcable", 2020. 132 p.
16. Кравець С. В., Кованько В. В., Лук'ячук О. П. Наукові основи створення землерийно-

- ярусних машин і підземно рухомих пристроїв: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 319 с.
17. Державний будівельні норми України. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення (ДБН В.2.1-10-2009, СНиП 2.02.01-83). Затв. та введ в дію наказ від 02.08.2018 № 200 / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ: Мінрегіону України, 2018. 42 с.
 18. Державний стандарт України. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. Затв. та введ в дію наказом від 01.11.1996 № 189 / Держкомітет України з будівництва та архітектури. Київ: Держкоммістобудування, 1996. 107 с.
 19. Деркач І. Л. Миські інженерні мережі: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2006. 97 с.
 20. Кованько В. В. Біомеханічні основи створення підземнорухомих пристроїв підвищеної ефективності: монографія. Рівне: НУВГП, 2011. 198 с.
 21. Якименко О. В. Земляні роботи: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 157 с.
- ### References
1. Kravets, S. V., Suponev, V. M., Posmityukha, O. P., Balesny S.P. (2021) Scientific basis and practice of creating minimally energy-consuming working bodies for the formation of communication cavities in the soil: monograph. Kharkiv, 304 p. ISBN 978-966-303-769-1.
 2. Posmitiukha, O., Hlavatskyi, K., Kravets S., Suponyev V., Koval A. (2020) Analytical method of determining the movement resistance of a tip for forming rectangular technological hole in the lower structure tracks. Published under license by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, (PRTM 2020) (27–29 May) Dnipro, Ukraine, p. 1–7. DOI 10.1088/1757-899X/985/1/012033.
 3. Posmituha, O. Kravets, S., Suponyev, V., Glavatsky, 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) (November 14–16) Kharkiv, Ukraine, vol. 230. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001011>
 4. Posmitiukha, O., Hlavatskyi, K., Kravets, S. et al. (2020) Analytical method of determining the movement resistance of a tip for forming rectangular technological hole in the lower structure. Dnipro, pp. 138–139. URL: http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12685/1/XV_Conference.pdf.
 5. Aaron Cohen, Samuel T. (2017) Ariaratnam, Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling. Pipelines 2017: Planning and Design (553–563). <https://doi.org/10.1061/9780784480878>.
 6. Ditch Witch (2021) Equipment NO-DIG. directional drills (USA) URL: <https://www.ditchwitch.com/directional-drills>.
 7. HDD technology and methods of horizontal drilling rigs PERFORATOR. (2021) (USA) URL: <https://www.ditchwitch.com/directional-drills>.
 8. The advantages of the NO-DIG systems from TRACTO-TECHNIK. (2021) (Germany) URL: <https://tracto.com/en/Products/grundodrigill-the-new-generation>.
 9. Najafi M., Sanjiv Gokhale. (2021) Trenchless Technology: Pipeline and Utility Design, Construction, and Renewal, Second Edition Hardcover. McGraw-Hill Education, 544 p. ISBN: 9781260458732.
 10. PENCHUK, V. A., RUDNEV, V. K., SAENKO, N. V. et al. (2015) Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells. *Magazine of Civil Engineering*, no. 2, pp. 100–107. Access Mode: doi:10.5862/MCE.54.11.
 11. Yichen Wu, Chao Kang, Mohammad Molavi Nojumi, Alireza Bayat, George Bontus (2021) Current water main rehabilitation practice using trenchless technology. *Water Practice and Technology*, vol. 00, no. 01, p. 17. Crossref DOI link: <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.026>.
 12. Willoughby, D. A. (2005) Horizontal Directional Drilling: Utility and Pipeline Applications, McGraw-Hill, New York. ISBN: 9780071454735.
 13. Zhao Jun Ling Bian (2014) Trenchless technology underground pipes. China, 187 p. ISBN-13: 978-7111455707
 14. Ba National Research Council (2013) Underground Engineering for Sustainable Urban Development. Washington, DC: The National Academies, p. 246. Press. <https://doi.org/10.17226/14670>.
 15. Antonets, Yu., Obozny A. L. (2020) XLPE-INSULATED POWER CABLES for voltages from 6 kV up to 30 kV. PJSC Factory "Yuzhcable", 132 p.
 16. Kravets, S. V., Kovanko, V. V., Lukyanchuk, O. P. (2015) Scientific basis of creation of earth-moving machines and underground moving devices: monograph. Rivne, 319 p.
 17. State building regulations of Ukraine. DBN V.2.1-10:2018 Foundations and foundations of buildings and structures. Substantive provisions. Kyiv, 2018, 42 p.
 18. State standard of Ukraine. DSTU B V.2.1-4-96. Soils. Methods of laboratory determination of strength and deformability characteristics. Kyiv, 1996, 107 p.
 19. Derkach, I. L. (2006) Urban engineering networks: Education. manual. Kharkiv, 97 p.

20. Kovanko, V. V. (2011) Biomechanical basis of creation of underground moving devices of increased efficiency: monograph. Rivne, 198 p.
21. Yakymenko, O. V. (2018) Earthworks: teaching manual. Kharkiv, 157 p.

Посмітюха Олександр Петрович, старший викладач кафедри прикладної механіки та матеріалознавства, Український державний університет науки і технологій, 2aleksandraa@gmail.com, тел. +38 0661509500.

Theoretical determination of the expansion forces of the technological cavity in the soil by wedge-prismatic and conical-cylindrical working bodies

Abstract. Problem. The article deals with the problem of expansion of the technological cavity in the soil (TPG), previously obtained by the method of controlled static piercing, for the laying of underground linear extension objects (LPO) of urban communication networks. Group laying of communications in one cavity requires large holes, which in turn leads to a significant increase in the workforce and dimensions of work equipment. The only way out of such a situation is the use of working bodies (RO) of wedge-prismatic form, gradual expansion of the hole in several stages and change of soil moisture in the walls of the hole cavity. **Goal.** The main goal is to create a methodology for engineering calculation of the parameters of the wedge-prismatic working bodies and to determine the static expansion efforts of the TPG based on the known initial data on the soil and the shape of the RO. **Methodology.** The study is based on the theory of the invariance of soil mass before and after

piercing. In the process of expanding the TPG to the required size, the density of the soil medium changes from its natural value to a solid state, after which the soil simply moves to a certain distance from the axis of the cavity, compacting the neighboring massifs. **Results.** The hypothesis of the interaction of wedge-prismatic tips with the soil during static puncture is substantiated based on the determined law of soil density change along the thickness of the wedge-prismatic tip. **Originality.** The theoretical dependences for determining the rational parameters of the RO of wedge-prismatic form, the resistance of the sequential expansion of the TPG for the LPO after the starting passage of the leading hole, or the cavities of the primary expansion were obtained. **Practical value.** A method of determining the penetration force of the TPG for LPO after the leading pass is proposed, taking into account the elastic (reverse) deformations of the soil, its moisture, the shape of the RO, and the characteristics of the power equipment, as the difference between the full and pilot resistance of the soil puncture, as well as recommendations on the possibility of reduction of these forces by changing the shape of work equipment or soil moisture.

Key words: puncture, expansion, pilot passage, technological cavity, linearly extended object, wedge-prismatic working equipment, moisture, soil.

Posmytyukha Oleksandr, art. teacher. Department "Applied Mechanics and Materials Science", Ukrainian State University of Science and Technology, 2aleksandraa@gmail.com, tel. +38 0661509500.

