

УДК 624.132.3

Супонєв В. М., к.т.н.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## НАУКОВІ ОСНОВИ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПОРОЖНИН СТАТИЧНИМ ЗАДАВЛЮВАННЯМ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ В ГРУНТ

***Анотація.** Об'єктом дослідження є технології статичного прокладання підземних комунікацій та їх обладнання. Існуючі досягнення в області удосконалення процесів утворення горизонтальних порожнин в ґрунті для безтраншейного прокладання інженерних комунікацій, як звичай, обмежуються однією з можливих технологій та обладнання для її реалізації. В роботі пропонується узагальнюючі підходи до створення аналітичних залежностей по розрахунку параметрів наконечників робочих органів та визначення сил опору ґрунту їх просуванню при створюванні свердловин технологіями статичного проколу та продавлюванню ґрунту, та шляхом їх комбінації. Слід відмітити, що для отримання всіх аналітичних розрахунків були використані лише розміри робочих органів, та дані, які легко визначити – тип та щільність ґрунту, вологість, пористість та решта стандартизованих характеристик. Використання даного методу має суттєву перевагу над іншими методами, що містять в своїй основі емпіричні залежності, які або важко визначити, або їхня достовірність викликає сумніви.*

***Ключові слова:** аналітична модель, безтраншейна технологія, інженерні комунікації, горизонтальна свердловина, горизонтальна свердловина.*

***Аннотация.** Объектом исследования являются технологии статической прокладки подземных коммуникаций и их оборудования. Существующие достижения в области совершенствования процессов создания горизонтальных пустот в ґрунте для безтраншейной прокладки инженерных коммуникаций, как правило, ограничиваются одной из возможных технологий и оборудования для их реализации.*

*В работе предлагается обобщённый анализ результатов проведенных теоретических исследований и основ получения аналитических зависимостей для расчёта параметров наконечников рабочих органов и определения сил сопротивления ґрунта их перемещению при создании горизонтальных скважин технологиями статического прокола и продавливания ґрунта, а также путём их комбинации.*

---

© Супонєв В. М.

*Следует отметить, что для получения всех аналитических расчётов были использованы только размеры рабочих органов и свойства грунта, которые достаточно просто установить: тип грунта, влажность, пористость и прочие стандартные характеристики. Применение данного метода имеет существенное превосходство над другими методами, которые имеют в своей основе эмпирические зависимости, которые либо тяжело определить, либо их достоверность вызывает сомнения.*

**Ключевые слова:** аналитическая модель, бестрапичная технология, инженерные коммуникации, горизонтальная скважина.

**Abstract.** *The research object are static technology laying underground utilities and their equipment. Existing achievements in improving the processes of creating horizontal voids in the soil for trenchless laying engineering communications are usually limited to one possible technologies and equipment required for their implementation. We propose a generalized analysis of results of theoretical studies and the foundations receiving analytical dependencies for calculation of parameters of tips working bodies and determine the resistance forces ground their movement when creating horizontal wells technology static puncture and forcing the soil, as well as by their combination. It should be noted that in order to get all analytical calculations were used only the dimensions of the working bodies and soil properties that are quite simple to install: soil type, moisture content, porosity and other standard features. The use of this method has significant superiority over other methods that are based on empirical dependencies that are either difficult to determine their veracity is questionable.*

**Keywords:** analytical model, trenchless technology, engineering services, horizontal borehole.

**Вступ.** Високі вимоги до якості надання послуг населенню особливо в великих містах по постачанню енергоносіїв та води, передачі інформації по кабельним лініям зв'язку та інше заставляє удосконалювати машини для виконання будівельних робіт по прокладанню підземних комунікацій, що дасть змогу знизити собівартість їх виконання, зменшити вартість та тривалість робіт, зменшити вплив на міську інфраструктуру та жителів міста. Отримання нових форм робочих органів для створення свердловин статичними технологіями та розрахунку їх параметрів дасть можливість визначити сили опору ґрунту та величину тиску на прилеглі підземні комунікації, знати зону небезпечного сусідства. Таким чином, пошук шляхів удосконалення технології статичного проколу ґрунту для прокладання підземних комунікацій є актуальною

задачею.

**Аналіз публікацій.** Основними напрямками розвитку безтраншейних технологій прокладання комунікацій у світі є горизонтально направлене буріння та мікротонелювання у вигляді статичного продавлювання з ексавацією ґрунту. Опір просуненню робочого органу циліндричної форми для реалізації останньої визначається параметрами робочого органу та властивостями ущільненого ґрунту, описані авторами в [1-3].

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. Роботи [5,6] присвячені вибору способу виконання робіт, з аналізом переваг та недоліків різних технологій. А в дослідженнях [7,8] увагу приділяють безтраншейним технологіям спорудження та ремонту трубопроводів. В роботі [9] пропонується вибір способу та планування виконання особливо відповідальних робіт, які виконуються при безтраншейному прокладанні інженерних мереж. Можливості розширення безтраншейних технологій до потрібних розмірів та способи виконання робіт описані в роботі [10]. В дослідженнях [11] визначається вплив тиску ґрунту на підземні комунікації, що розташовані над ними на певній глибині.

Результати польових випробувань та розрахунки осьових зусиль прокладання комунікацій безтраншейним способом відображені в роботах [12,13]. Окремо виділимо дослідження можливості впровадження безтраншейних технологій в твердих породах [14] 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, 15] 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 [16].

**Мета і постановка задачі.** Метою роботи є узагальнення підходів до створення аналітичних залежностей по розрахунку раціональних параметрів наконечників робочих органів та визначення сил опору ґрунту їх просуванню при створюванні свердловин технологіями статичного проколу та продавлюванню ґрунту, та шляхом їх комбінації.

**Виклад основного матеріалу.** Існуючі технології статичної дії для утворювання горизонтальних свердловин можна поділити на технології статичного проколу, статичного продавлювання та їх комбінації (рис.1). Вони базуються на силовому впровадженні наконечників робочих органів в ґрунт з різною формою, які

забезпечують: повне радіальне ущільнення повне ущільнення ґрунту при використанні конічно-циліндричного наконечника; екскавацію ґрунту по всьому перетину свердловини при використанні циліндрично-трубчастих наконечників та частковою екскавацію і частковим радіальним ущільненням при використанні циліндрично-конусного наконечника з зовнішнім конусом або конічно-циліндричного наконечника з циліндрично-трубчастим наконечником з загостреною кромкою. Керований прокол для утворення криволінійної свердловини утворюється робочим органом з асиметричним наконечником.

Для розрахунку силового приводу установок статичної дії треба знати сили опору ґрунту. Вибір технології формування свердловини здійснюється з умови мінімізація енерговитрат, або зменшення впливу зони деформованого ґрунту від ущільнення на прилеглі комунікації або основу доріг.



Рис. 1. Класифікація методів розробки горизонтальних свердловин

Зона руйнування ґрунту згідно [1, 20, 21] навколо конусно-циліндричних наконечників, що здійснюють прокол ґрунту за принципом його витіснення в бокові стінки свердловини визначається в межах 4...6 діаметрів свердловини, для циліндрично-конічних наконечників з кільцевидним перерізом, що працюють за комбінованим принципом в межах 2 діаметрів, а для продавлювання

кільцевим ножем її значення досягає близько нуля. Практично у всіх випадках зона руйнування визначена експериментально для конкретного типу ґрунту з конкретними фізико-механічними властивостями. Для інших типів ґрунтів розмір цієї зони не відомий, що не дозволяє прогнозувати при прокладанні підземних комунікацій вплив зони деформування на сусідні підземні комунікаційні об'єкти.

Для визначення сил опору ґрунту та встановлення раціональних параметрів наконечників для кожного випадку було запропоновано використовувати нормальний тиск ґрунту на їх лобову поверхню, який на основі компресійних показників має вигляд [19]:

$$q_x = \frac{(1 + \omega) \rho_{m\phi}}{c_k} \left( \frac{1}{\rho_{np}} - \frac{1}{\rho_x} \right), \quad (1)$$

де  $\rho_{тв}$  – щільність твердої фази ґрунту при умові, коли відсутні пори;

$\omega$  – вологість ґрунту;

$\rho_{np}$  – щільність ґрунту в природньому неперушеному стані;

$\rho$  – змінна щільність ґрунту пропорційна зміні площі поперечного перерізу зовнішнього або внутрішнього кільцевих конусів;

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

$\omega_T$  – границя текучості ґрунту.

Далі на основі закону зміни середньої щільності ґрунту в деформованому просторі поверхнями наконечників та основі рівності мас були отримані залежності для визначення сили опору ґрунту для кожного випадку окремо.

Так була отримана залежність для визначення лобовий опору при проколюванні ґрунту [22]:

$$P_{np} = \frac{\pi E_{zp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta), \quad (13)$$

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

$D$  – діаметр конусного наконечника;

$f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по конусу;

$\beta$  – кут нахилу утворюючої поверхні конуса.

З урахуванням тиску ґрунту на бокову поверхню циліндричної частини робочого органу при відомій пружної складової деформації ґрунту після його релаксації, згідно з [1; 19] описується рівністю:

$$q_u = q_u^{\max} \cdot e^{-\frac{E_V t_u}{k_g}}, \quad (14)$$

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

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

$k_g$  – коефіцієнт динамічної в'язкості ґрунту;

$t_u$  – час контакту з ґрунтом циліндричної частини наконечника

$$(t_u = \frac{y}{v});$$

$v$  – швидкість пересування наконечника.

$$q_u^{\max} = \frac{D_p}{D} \sigma_1, \quad (15)$$

де  $D_p$  – діаметр пружно-пластичної зони (зони руйнування), [5];

$\sigma_1$  – напруження на границі пружної і пластичної зон визначили Кравець С. В. [1].

Сумарний опір заглибленню конічно-циліндричного наконечника дорівнює сумі сили лобового опору проколюванню (13) та сили тертя на циліндричній частини наконечника (17), який згідно отриманого результату, згідно [22] має вигляд:

$$P_{\Sigma} = \frac{\pi E_{ep} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1 \pi \lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_u - 0,2) q_s, \quad (18)$$

де  $l_u$  - довжина циліндричної частини наконечника;

$\lambda = \frac{D_p}{D}$  – відношення діаметра зони пружно-пластичних деформацій до діаметра конусного наконечника [1].

З урахуванням вище отриманих залежностей, що відображають процеси проколу ґрунту конічно-циліндричним наконечником було отримано залежність для визначення еквівалентного діаметра конічної частини  $D_e$  (4) із умови рівності опорів  $\vec{P}_{np} = P_{\Sigma}$  для випадків:

1)  $D_k > D_u$  – відсутні сили тертя на бічній поверхні наконечника;

2)  $D_k = D_u = D_e$  – присутні сили тертя на бічній поверхні наконечника.

наконечника.

$$D_e = D \sqrt{1 + 8f \frac{0,1 \lambda \sigma_1 + (l_u - 0,2) q_s}{DE_{ep} (1 + \operatorname{ctg} \beta)}}. \quad (4)$$

Мінімальний діаметр  $D_k^{\min}$ , який усуває дію пружних деформацій на циліндричну частину наконечника:

$$D_k^{\min} = D + \frac{\sigma_1}{E_v} D = D \left( 1 + \frac{\sigma_1}{E_v} \right). \quad (11)$$

Аналіз цієї залежності показав, що для твердого супіску

$D_k^{\min} = 1,08D$ , для напівтвердого суглинку  $D_k^{\min} = 1,22D$ , для тугопластичної глини  $D_k^{\min} = 1,31D$ . Якщо  $D_k > D_k^{\min}$ , ґрунт на границі пружної і пластичної зон деформується за рахунок пружно-пластичних зсувів (руйнується).

Отримані розрахункові залежності по визначенню сил опору та параметрів конічно-циліндричного наконечника дозволили встановити оптимальній діаметр свердловини, який ефективно здійснювати методом статичного проколу ґрунту, який згідно [23] має вигляд:

$$D_{opt} = 4 \frac{0,1f\lambda\sigma_1 + f(l_y - 0,2)q_3}{\left[ \left( 1 + \frac{\sigma_1}{E_V} \right)^2 - 1 \right] E_{sp} (1 + f \operatorname{ctg}\beta)}. \quad (13)$$

Аналіз цієї залежності показав, що для твердого супіску  $D_{max} \geq 0,444$  м; для напівтвердого суглинку  $D_{max} \geq 0,295$  м; для тугопластичної глини  $D_{max} \geq 0,236$  м. Це означає, що для  $D > D_{max}$  лобовий опір конічно-циліндричного наконечника з діаметром в основі конуса  $D_k^{\min} > D_{max}$  зростає інтенсивніше за опір циліндричної частини наконечника.

Згідно з отриманим уявленням про підхід до процесів та отримання розрахункових залежностей було отримано зусилля заглиблення двоконусного кільцевого наконечника:

$$P_{2к} = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \operatorname{ctg}\beta) \left[ \frac{\gamma^2 - 1}{4} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{(\gamma + 1)^4}{128 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right] \gamma^2} - \left( \frac{\gamma + 1}{32} \right)^2 + \frac{1}{2(\gamma + 1)^2} \right] \cdot \frac{D^2}{\gamma^2}, \quad (13)$$

Де  $\gamma = \frac{D}{d}$  - відношення зовнішнього діаметру циліндру до внутрішнього діаметру.

Для одноконусного кільцевий наконечник (зовнішній конус) при опір ґрунту при його заглибленні наведено у залежності (15).

Аналіз отриманих залежностей (13) та (15) показали, при однакових умовах конструкція одноконусного наконечника майже на 30% ефективніше. Зіставлення сил опору ґрунту втисненню

одноконусного наконечника з двоконусним показав, що перший також ефективніший більш ніж на 25%.

$$P_k = \pi E_{гр} (1 + f \cdot \text{ctg}\beta) \left( \frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \frac{(\gamma + 1)^4}{\gamma^2} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{(\gamma + 1)^4}{128 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} \right) \frac{D^2}{\gamma^2} \quad (15)$$

Сумарне зусилля проникнення кільцевого наконечника із зовнішнім конусом дорівнює [24]:

$$P_{\Sigma} = \pi E_{gp} (1 + f \text{ctg}\beta) \times \left[ \frac{3\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16} - \frac{\gamma^2 - 2\gamma - 1}{16 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} - \frac{(\gamma + 1)^4}{128 \left[ 1 - \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2 \right]} \right] \frac{D^2}{\gamma^2} + \frac{\pi D^2}{4\gamma^2} q_{кр} \left( 1 - \frac{1}{\frac{4fql_H \gamma}{e D}} \right) + \pi D \sigma_1 f l_H \quad (23)$$

Аналіз аналітичних моделей та відображення в графічному вигляді показали, що в залежності від типу ґрунту сумарна сила опору продавлюванню його циліндричним наконечником відрізняється, наприклад для тугопластичної глини та твердого супіску на 36–38 %. В залежності від довжини циліндру в межах 1,5 D–3,0 D для цих ґрунтів може змінюватися до 32 %.

Визначення зони деформованого ґрунту при просуванні циліндрично-трубчастого наконечника із зовнішнім конусом було визначено з умови рівності мас ґрунту до і після ущільнення його наконечником:

$$D_p = \sqrt{\lambda^2 D^2 - (\lambda^2 - 1) \left( \frac{D + d}{2} \right)^2} \quad (9)$$

де



$$\lambda = \frac{\left( \gamma_{zp} h + \frac{c}{\operatorname{tg} \varphi_0} \right) \operatorname{tg}^4 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_p}{2} \right)}{\sigma_1}, \quad (7)$$

де  $\gamma_{zp}$  – питома сила тяжіння ґрунту в природньому стані;  
 $h$  – глибина проколу;  
 $c, \varphi_0$  – коефіцієнт зчеплення та кут внутрішнього тертя ґрунту;  
 $\sigma_1$  – напруження на границі пружної та пружно-пластичної (зруйнованої) зон – структурна міцність ґрунту [1].

Або, якщо  $\gamma = \frac{D}{d}$

$$\frac{D_p}{D} = \sqrt{\lambda^2 - (\lambda^2 - 1) \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^2} \quad (10)$$

Аналіз залежності (10) показав, зони руйнування прямопропорційно збільшується із збільшенням діаметра ґрунтової порожнини  $D$  та не прямопропорційно зростає із зростанням співвідношення зовнішнього та внутрішнього діаметрів наконечника.

Відношення  $\frac{D_p}{D}$  знаходиться в межах:

для твердого супіску -  $\frac{D_p}{D} = 2,46 \dots 3,55$ ;

для напівтвердого суглинку -  $\frac{D_p}{D} = 2,02 \dots 2,85$ ;

для тугопластичної глини -  $\frac{D_p}{D} = 1,91 \dots 2,67$ .

В основі розрахунку наконечника з асиметричним наконечником так, як і в попередніх випадках починалось з отримання закону зміни тиску ґрунту на похилій площині. Кінцевий результат визначення сил опору ґрунту [25] має вигляд:

- для горизонтальної складової:

$$P_y = 0,36 \frac{(1 + \omega) \rho_{ms}}{C_k \rho_{np}} \left[ (1 - f^2) + 2f \cdot \operatorname{ctg} \beta \right] D^2. \quad (2.24)$$

- для вертикальної складової (відхиляючої сили):

$$P_x = 0,36 \frac{(1 + \omega) \rho_{ms}}{C_k \rho_{np}} (\operatorname{ctg} \beta - f) D^2. \quad (2.25)$$

Важливим питанням для керування процесом проколу є визначення кута нахилу асиметричного наконечника у вигляді скошеної поверхні. Його залежність від коефіцієнту тертя матеріалу наконечнику з ґрунтами різного типу має вигляд [26]:

$$\beta < \arcsin \sqrt{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{f}{1+f^2}\right)^2}} . \quad (2.31)$$

Підсумуючи викладене можна визначити, що всі отримані аналітичні залежності для кожного випадку статичного формування свердловини базуються тільки на конструктивних параметрах наконечників робочих органів та відомих властивостей ґрунту, в тому числі коефіцієнта компресії та його пористості. В основі використаної наукової методології опису процесів та визначенню сил опору ґрунту лежить визначення закону тиску на робочі поверхні наконечників та закону зміни деформованого стану ґрунтового середовища у просторі, які базуються відомих властивостях ґрунтів.

**Висновки.** Отримані аналітичні залежності для розрахунку сил опору ґрунту статичному задавлюванню наконечників робочих органів методами проколу, продавлювання та їх комбінації дають можливість проведення всебічного аналізу робочих процесів, встановити вплив їх параметрів на процеси формування свердловини в різних типах ґрунтів, що дає можливість отримати раціональні параметри робочих органів та визначити силові характеристики установок.

Доведено, що для отримання аналітичних залежностей достатньо використовувати лише розміри робочих органів, та дані, які легко визначити – тип та щільність ґрунту, вологість, пористість та решта стандартизованих характеристик.

#### 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., Супонєв В. Аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника в ґрунт // СММ ПДАБА. 2017. Вып. 103. С. 91–98.
3. Кравець С. П., Посмітюха О. П., Супонєв В. М. Визначення еквівалентного і оптимального діаметрів конічного наконечника з виступами для проколювання ґрунту // НПТ ДНУЗТ. 2017. Вип. 70. С. 89–98.

4. Erez N. Allouche, Samuel T. Ariaratnam, State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Published online: April 26, 2012. [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://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. <https://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: 10.1115/1.802922.paper30

7. Zhao Jun Ling Bian. Trenchless technology underground pipes. Machinery Industry Press, 2014. P. 187.

8. Jian Xin. Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. 2014. <https://doi.org/10.1061/9780784413821.051>

9. Hastak Makarand, Gokhale Sanjiv. Decision Tool for Selecting the Most Appropriate Technology for Underground Conduit Construction // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference, Baosong Ma, ASME. doi: 10.1115/1.802922.paper30

10. Sterling Raymond L. International Technology Transfer in Tunneling and Trenchless Technology // Geological Engineering: Proceedings of the 1st International Conference. Baosong Ma, ASME, 2009. doi: 10.1115/1.802922.paper6.

11. Nilo Tsung, Mingming Zheng, Mohammad Najafi, Saleh Mehraban. A Comparative Study of Soil Pressure and Deformation of Pipes Installed by the Open-Cut Method and Trenchless Technology // Pipelines 2016: Out of Sight, Out of Mind, Not Out of Risk. 2016. <https://doi.org/10.1061/9780784479957.132>

12. Najafi Mohammad, Gunnink Brett, Davis George. 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: 10.1115/1.802922.paper4.

13. Chehab A. G., Moor I. D. One-demensional calculation for axial pullback for axial pullback distributions in pipes during directional drilling installations. Ottawa Geo, 2007. P. 1140-1154.

14. Guojun Wen, Xiaoming Wu, Han Chen. 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: 10.1115/1.802922.paper26

15. Балесный С. П. Особенности процессов статического прокола грунта // Вісник ВХНАДУ. 2017. Вып. 76. С. 138–141.

16. Хачатурян С. Л., Олексин В. І. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её

---

формирования методом статического прокола грунта // Вісник ВХНАДУ. 2016. Вып. 73. С. 196–202.

17. Ешуткин Д. Н. Высокопроизводительные гидропневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций / состав. - М. Стройиздат, 1990. 171 с.

18. Томин Е. Д. Бестраншейное строительство закрытого дренажа. - М.: Колос, 1981. 240 с.

19. Рубинштейн, А. Л. Грунтоведение, основания и фундаменты: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А. Л. Рубинштейн. - М.: Сельхозгиз, 1961. - 312 с. У624.13

20. Тимошенко В.К. Определение формы наконечника, обеспечивающей минимальное усилие прокола. Строительство трубопроводов. - 1969. - №3. - С. 18 - 20. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб, пособие для строительных вузов [Текст] / С. С. Вялов. - М.: Высш. шк., 1978. - 447 с.

21. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб, пособие для строительных вузов [Текст] / С. С. Вялов. - М.: Высш. шк., 1978. - 447 с.

22. Кравець С. В., Супонев В. М., Посмітюха О. П. Аналітичний спосіб визначення опору ґрунту занурення конусного наконечника в ґрунт. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сборник научных трудов Приднепровской академии строительства и архитектуры, № 97, 2017 –ПАСА – С.91-98.

23. Кравець С. В., Супонев В. М. Аналітичний спосіб визначення лобового опору заглибленню в ґрунт кільцевого наконечника. Підйомно-транспортна техніка №1(53), 2017 С. 70-80.

24. Kravets S., Suponev V., Rieznikov O., Kosyak A., Nechiduk A., Klets, Chevychelova O. Determination of the resistance of the D. cylindrical-tubular drill for trenchless laying of underground communications / // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 3/7(93), 2018 - С. 64-71.

25. Кравець С.В., Супонев В.М., Балесний С.П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху при його проколі асиметричним наконечником. Автомобильный транспорт . Сборник научных трудов. Выпуск 41, 2017. - Харьков, ХНАДУ – С.155-163.