

УДК 624.132.3

## АНАЛІТИЧНИЙ СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗАНУРЕННЯ КОНУСНОГО НАКОНЕЧНИКА В ҐРУНТ

КРАВЕЦЬ С. В.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ПОСМІТЮХА О. П.<sup>2</sup>, *магістр, здобувач*,  
СУПОНЄВ В. Н.<sup>3</sup>, *к.т.н, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування. вул. Новака, 77, навчальний корпус №3, 33028 м. Рівне, Україна. Тел. +38(0362) 63-55-80, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2</sup> Кафедра прикладної механіки та матеріалознавства, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. А. Лазаряна. вул. ак. В. Лазаряна 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 150-95-00, e-mail: AleksandrP@3g.ua. ORCID ID: 0000-0002-9701-3873

<sup>3</sup> Кафедра будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. вул. Тимурівців, 3, 61002, м. Харків, Україна. тел. +38 (057) 738-77-97, e-mail: v-suponev@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-7404-6691

**Анотація. Постановка проблеми.** Статичний прокол ґрунту робочим органом з конусним наконечником є найбільш ефективнішим методом для розробки горизонтальної свердловини при безтраншейному прокладанні розподільних комунікацій. В роботі пропонується аналітичний спосіб визначення опору занурення конусного наконечника у ґрунт, який може бути використаний для розрахунку робочого органу та його обладнання. **Актуальність роботи.** Для прокладання підземних комунікацій під різними перешкодами широко використовують безтраншейні методи, які дозволяють уникнути пошкодження дорожнього покриття та інших інженерних комунікацій. Для створення горизонтальної свердловини невеликого діаметру до 300 мм під розподільні комунікації часто застосовують метод статичного проколу ґрунту. Існує цілий ряд розрахунків сил опору при зануренні робочого органу у ґрунт. Більшість з них побудована на використанні емпіричних даних та припущеннях, які знижують достовірність розрахунків та їх відповідність фактичним даним. **Ціль роботи.** Ціллю роботи є удосконалення розрахунку проколюючого робочого органу шляхом отримання аналітичного способу визначення сили опору занурення його конусного наконечника у ґрунт. **Аналіз публікацій.** Загальні закономірності процесів проколу ґрунту та формування горизонтально спрямованої свердловин викладені у роботах [5; 2; 3]. Результати досліджень впливу конструктивних параметрів робочого органу на процес проколу ґрунту та його інтенсифікацію викладено в роботах [3, 4, 1, 11, 14, 12]. Зміни якостей ґрунту в навколишньому просторі свердловини під час статичного проколу ґрунту та їх вплив на процеси формування лідерної свердловини та її розширення були розглянуті у роботах [4; 1]. **Висновки.** Встановлені в роботі закономірності зміни тиску ґрунту на бічній поверхні конуса та циліндричній частині наконечника ґрунто-проколюючої головки дозволили отримати аналітичну залежність розрахунку його сили опору в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту і діаметра наконечника. Так, наприклад, у найбільш поширених ґрунтах України сумарна сила опору ґрунту проколу діаметром свердловини 200 мм складає: у твердому супіску понад 85 кН, у напівтвердому суглинку більш 50 кН та у туго пластичній глині вона буде дорівнювати 25 кН. У той же час опір заглиблення конусної частини у цих ґрунтах дорівнює 60 кН, 30 кН та 15 кН відповідно. Таким чином можна констатувати, що сила тертя на поверхні конусної частини наконечника проколюючої головки досягає 25 – 30 % від сумарного значення сили опору ґрунту. Запропонований спосіб дозволяє визначити зусилля проколу на основі знання тільки типу ґрунту і його природньої вологості. Отримані результати розрахунків можуть бути рекомендовані до практичного впровадження при виборі параметрів проколюючої головки установок для безтраншейного прокладання підземних комунікацій шляхом статичного проколу ґрунту.

*Ключові слова:* аналітична модель, безтраншейна технологія, статичний прокол ґрунту, інженерні комунікації, проколююча головка, горизонтальна свердловина.

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОГРУЖЕНИЯ КОНУСНОГО НАКОНЕЧНИКА В ПОЧВУ

КРАВЕЦ С. В.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ПОСМИТЮХА А. П.<sup>2</sup>, *магістр, соискатель*,  
СУПОНЄВ В. Н.<sup>3</sup>, *к.т.н, доц.*

<sup>1</sup> Кафедра строительных, дорожных, мелиоративных, сельскохозяйственных машин и оборудования, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. ул. Новака, 77, учебный корпус №3, 33028 м. Ровно, Украина. Тел. +38 (0362) 63-55-80, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2\*</sup> Кафедра прикладной механики и материаловедения, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. А. Лазаряна. ул. ак. В. Лазаряна 2, 49010, г. Днепр, Украина, тел. 38(066) 150-95-00, e-mail: AleksandrP@3g.ua. ORCID ID: 0000-0002-9701-3873

<sup>3</sup> Кафедра строительных и дорожных машин, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет. ул. Тимуровцев, 3, 61002, г. Харьков, Украина. тел. 38(057) 738-77-97, e-mail: v-suponev@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-7404-6691

**Аннотация. Постановка проблемы.** Статический прокол почвы рабочим органом с конусным наконечником является наиболее эффективным методом для разработки горизонтальной скважины при бестраншейной прокладке распределительных коммуникаций. В работе предлагается аналитический способ определения сопротивления погружения конусного наконечника в почву, который может быть использован для расчета рабочего органа и его оборудования. Актуальность работы. Для прокладки подземных коммуникаций под разными препятствиями широко используют бестраншейные методы, которые позволяют избежать повреждения дорожного покрытия и других инженерных коммуникаций. Для создания горизонтальной скважины небольшого диаметра до 300 мм под распределительные коммуникации часто применяют метод статического прокола почвы. Существует целый ряд расчетов сил сопротивления при погружении рабочего органа в почву. Большинство из них построено на использовании эмпирических данных и предположениях, которые снижают достоверность расчетов и их соответствие фактическим данным. **Цель работы.** Целью работы является усовершенствование расчета прокалывающего рабочего органа путем получения аналитического способа определения силы сопротивления погружения его конусного наконечника в почву. Анализ публикаций. Общие закономерности процессов прокола почвы и формирования горизонтально направленной скважины изложены в работах [5; 2; 3]. Результаты исследований влияния конструктивных параметров рабочего органа на процесс прокола почвы и его интенсификацию изложены в работах [3, 4, 1, 11, 14, 12]. Изменения качеств почвы в окружающем пространстве скважины во время статического прокола почвы и их влияние на процессы формирования лидерной скважины и ее расширения были рассмотрены в работах [4; 1]. **Выводы.** Установленные в работе закономерности изменения давления почвы на боковой поверхности конуса и цилиндрической части наконечника грунто-прокалывающей головки позволили получить аналитическую зависимость расчета его силы сопротивления в зависимости от физико-механических свойств почвы и диаметра наконечника. Так, например, в наиболее распространенных почвах Украины суммарная сила сопротивления почвы прокола диаметром скважины 200 мм составляет: в твердой супеси свыше 85 кН, в полутвердом суглинке более 50 кН и в тугопластичной глине она будет равняться 25 кН. В то же время сопротивление углубления конусной части в этих почвах равняется 60 кН, 30 кН и 15 кН соответственно. Таким образом можно констатировать, что сила трения на поверхности конусной части наконечника прокалывающей головки достигает 25-30 % суммарного значения силы сопротивления почвы. Предложенный способ позволяет определить усилие прокола на основе знания только типа почвы и его естественной влажности. Полученные результаты расчетов могут быть рекомендованные к практическому внедрению при выборе параметров прокалывающей головки установок для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций путем статического прокола почвы.

*Ключевые слова:* аналитическая модель, бестраншейная технология, статический прокол почвы, инженерные коммуникации, прокалывающая головка

## ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING RESISTANCE IMMERSING TAPERED TIP IN SOIL

KRAVETS S.V.<sup>1</sup>, *Doctor of Science*,  
POSMITYUHA A. P.<sup>2</sup> *Master*,  
SUPONYEV V. N.<sup>3</sup> *Assoc., Ph.D.*,

<sup>1</sup> Department building, road, reclamation, agricultural machinery and equipment, National University of Water and Environmental Engineering. 77, Nowak str., Rivne city, 33028. Ukraine. Tel. +38 (0362) 63-55-80, e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua. ORCID ID 0000-0003-4063-1942

<sup>2</sup> Department of applied mechanics and material science, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. 2, Lazaryan str., Dnipro city, 49600, Ukraine. Tel. +38 (066) 150-95-00, e-mail: AleksandrP@3g.ua. ORCID ID: 0000-0002-9701-3873

<sup>3</sup> Department of build and travelling machines. Kharkov National Automobile and Highway University. 3, Timurivciv str., Kharkov city, 61002, Ukraine. Tel. +38 (057) 738-77-97, e-mail: v-suponev@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-7404-6691

**Summary. Problem definition.** Static soil puncture with working body with conical tip is the most effective method for horizontal excavation with distributive trenchless laying of communications. The work proposes an analytical method for determining the resistance to deepening conical tip into soil, which can be used to calculate the working body and its equipment. **Actuality of the work.** Trenchless methods, which let avoid damaging the pavement and other utilities, is widely used for the laying underground utilities under different obstacles. Method of static soil puncture is used very often for creation of horizontal wells small

diameter to 300 mm for distribution communications. There are many calculations of the resistance of immersion working body into soil. Majority of them are based on using empirical data and assumptions, which reduce the reliability of calculations and accordance to actual data. **Aim of the work.** The aim of the work is developing of calculation the working puncture body in the way on receiving an analytical way to determining the resistance force of immersion conical tip into soil. **Analysis of publications.** General regularities of puncture process and making horizontal wells are described in the works [5, 2, 3]. The research results of effecting the constructive parameters of working body on the puncture process and its intensification are described in the works [3, 4, 1, 11, 12, 14]. The change of soil quality during the static puncture and its effecting to the forming process the wells were considered in the works [4, 1]. **Conclusions.** The set up regularities of pressure change on the lateral surface of the cone and cylindrical part of the tip let receive analytical formula for determining of resistance force, which depend on physical-mechanical soil qualities and tip diameter. For example, the total resistance force to 200 mm well puncture of the most widespread Ukrainian soil is: over 85 kN in hard sand loam, over 50kN in middle hard sand loam and over 25 kN in hard plastic loam. Meanwhile resistance to deepening conical tip into these kinds of soil are 60 kN, 30 kN and 15 kN accordingly. Therefore, we can state that friction force on the conical surface of the tip achieves 25-30% from total soil resistance sum. The way let determine the puncture force knowing just kind of soil and its moisture. The results can be recommended for choosing the puncture equipment for trenchless excavation.

*Key words:* analytical model, trenchless technology, static soil puncture, utilities, puncture tip, horizontal well

**Актуальність роботи.** Для прокладання підземних комунікацій під різними перешкодами широко використовують безтраншейні методи, які дозволяють уникнути пошкодження дорожнього покриття та інших інженерних комунікацій. Для створення горизонтальної свердловини невеликого діаметру до 300 мм під розподільні комунікації часто застосовують метод статичного проколу ґрунту. Існує цілий ряд розрахунків сил опору при зануренні робочого органу у ґрунт. Більшість з них побудована на використанні емпіричних даних та припущеннях, які знижують достовірність розрахунків та їх відповідність фактичним даним.

**Ціль роботи.** Ціллю роботи є удосконалення розрахунку проколюючого робочого органу шляхом отримання аналітичного способу визначення сили опору занурення його конусного наконечника у ґрунт.

**Аналіз публікацій.** Загальні закономірності процесів проколу ґрунту та формування горизонтально спрямованої свердловин викладені у роботах [5; 2; 3]. Результати досліджень впливу конструктивних параметрів робочого органу на процес проколу ґрунту та його інтенсифікацію викладено в роботах [3, 4, 1, 11, 14, 12]. Зміни якостей ґрунту в навколишньому просторі свердловини під час статичного проколу ґрунту та їх вплив на процеси формування лінійної свердловини та її розширення були розглянуті у роботах [4; 1].

**Основний матеріал.** Для визначення зусилля деформування ґрунту необхідно знати закон зміни його нормального тиску  $q_x$  на конічний наконечник (рис. 1.) у залежності від деформації  $x$ . Визначимо його на основі компресійних кривих для ґрунтів, які можна у першому наближенні представити у вигляді лінійних залежностей [5; 2].

$$e_x = e_0 - c_k q_x, \quad (1)$$

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

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

$c_k$  – коефіцієнт компресії ґрунту ( $c_k = 0,07 \dots 0,09(\omega_T - 10)$ , МПа<sup>-1</sup>) [5];

$\omega_T$  – межа текучості ґрунту.

Коефіцієнти пористості  $e_x$  і  $e_0$  можна виразити через щільність ґрунту за залежностями [1; 2]

$$e_x = \frac{(1 + \omega) \rho_{ms}}{\rho_x} - 1, \quad e_0 = \frac{(1 + \omega) \rho_{ms}}{\rho_{np}} - 1, \quad (2)$$

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

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

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

Тоді нормальний тиск ґрунту в кожному поперечному перерізі конуса дорівнює:

$$q_x = \frac{(1 + \omega) \rho_{ms}}{c_k} \left( \frac{1}{\rho_{np}} - \frac{1}{\rho_x} \right). \quad (3)$$

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

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

де  $D$  – діаметр конусного наконечника; звідки

$$\rho_x = \frac{\rho_{np}}{1 - (2x/D)^2}. \quad (5)$$

Знайдемо значення  $x$  із залежності (5), при якому ґрунт максимально ущільнюється до  $\rho_{ms}$ .

$$x = \frac{D}{2} \sqrt{1 - \frac{\rho_{np}}{\rho_{ms}}}. \quad (6)$$

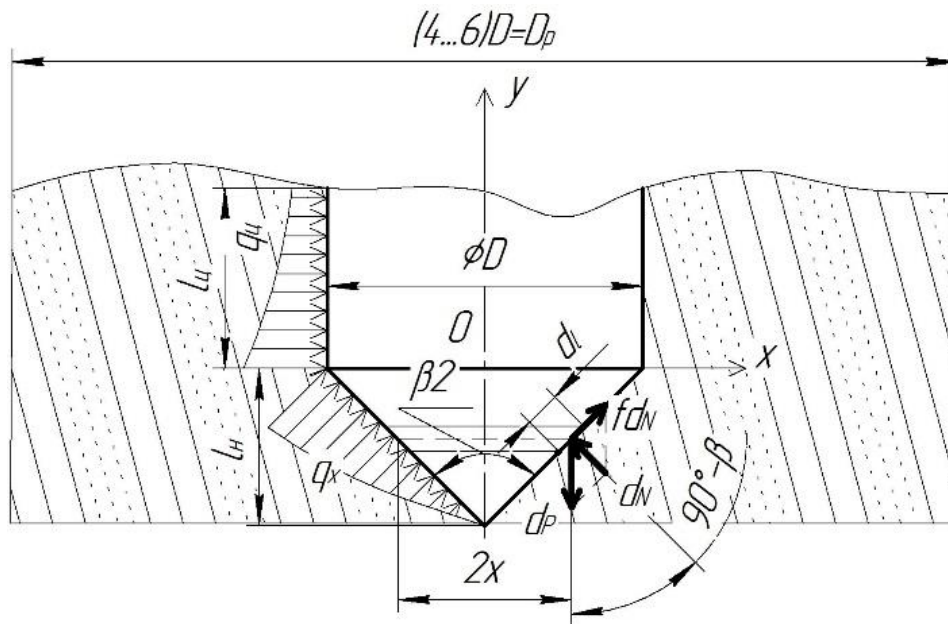


Рис. 1. Взаємодія конічно-циліндричного наконечника з ґрунтом

У подальшому ґрунт буде витіснятися за межі ґрунтового отвору. Для ідеального сипучого середовища зона максимального ущільнення ( $\rho_{zp} = \rho_{ms}$ ) розповсюджується навколо осі проколіни на відстань  $D_{\rho_{ms}}$ . Визначимо цю відстань із умови

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{np} = \frac{\pi}{4} (D_{\rho_{ms}}^2 - D^2) \rho_{ms} \quad (7)$$

Звідки

$$D_{\rho_{ms}} = D \sqrt{1 + \frac{\rho_{np}}{\rho_{ms}}} \quad (8)$$

Для зв'язних ґрунтів зона руйнування ґрунту  $D_p$  розповсюджується на значно більшу відстань  $D_p > D_{\rho_{ms}}$  [1].

Відповідно до залежності (3) закон зміни нормального тиску на бічну поверхню конусного наконечника запишеться у вигляді

$$q_x = E_{zp} \left( \frac{2x}{D} \right)^2, \quad (9)$$

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

деформації ґрунту.

Закон зміни тиску (9), що приведений на рис. 2, підтверджений експериментальними даними, для твердого супіску [8]. Для розрахунку прийняті наступні вихідні дані: для твердого супіску –  $\rho_{ms} = 2,70 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{np} = 2,05 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 14\%$ ;  $c_k = 1,08 \text{ МПа}^{-1}$ ; для напівтвердого суглинку –  $\rho_{ms} = 2,70 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{np} = 2,10 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 10\%$ ;

$c_k = 1,73 \text{ МПа}^{-1}$ ; для тугопластичної глини –  $\rho_{ms} = 2,73 \text{ т/м}^3$ ;  $\rho_{np} = 2,00 \text{ т/м}^3$ ;  $\omega = 30\%$ ;  $c_k = 2,81 \text{ МПа}^{-1}$ .

Параметри зміни тиску на бічній поверхні для твердого супіску, напівтвердого суглинку і тугопластичної глини наведені на графіку (див. рис. 2).

Елементарна площа конусного наконечника дорівнює

$$dF = 2\pi x \cdot \frac{dx}{\sin \beta}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} dP_{np} &= dN \sin \beta + f \cdot dN \cos \beta = \\ &= dN \sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta) = \\ &= q_x \cdot dF \sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta) = \\ &= E_{zp} \left( \frac{2x}{D} \right)^2 2\pi x \frac{dx}{\sin \beta} \times \\ &\quad \times \sin \beta (1 + f \operatorname{ctg} \beta) = \\ &= \frac{8\pi E_{zp}}{D^2} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) x^3 dx. \end{aligned} \quad (11)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ґрунту по конусу;  $2\beta$  – кут при вершині конуса.

Тоді

$$\begin{aligned} P_{np} &= \frac{8\pi E_{zp}}{D^2} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) \int_0^{D/2} x^3 dx = \\ &= \frac{\pi E_{zp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta). \end{aligned}$$

(12) Лобовий питомий опір проколюванню дорівнює

$$P = \frac{E_{zp}}{2} (1 + f \operatorname{ctg} \beta). \quad (13)$$

супісок, напівтвердий суглинок і тугопластичну глину від діаметра проколу.

На рис. 3 побудовані залежності зусилля заглиблення конічної частини наконечника в твердий

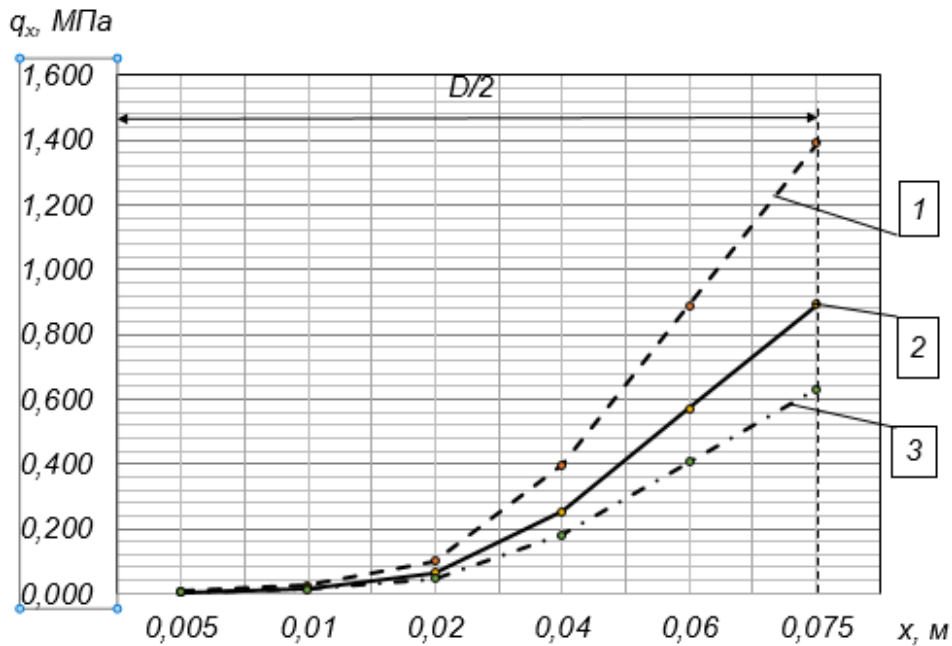


Рис. 2. Закономірність зміни тиску на бічній поверхні конуса в різних видах ґрунтів: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

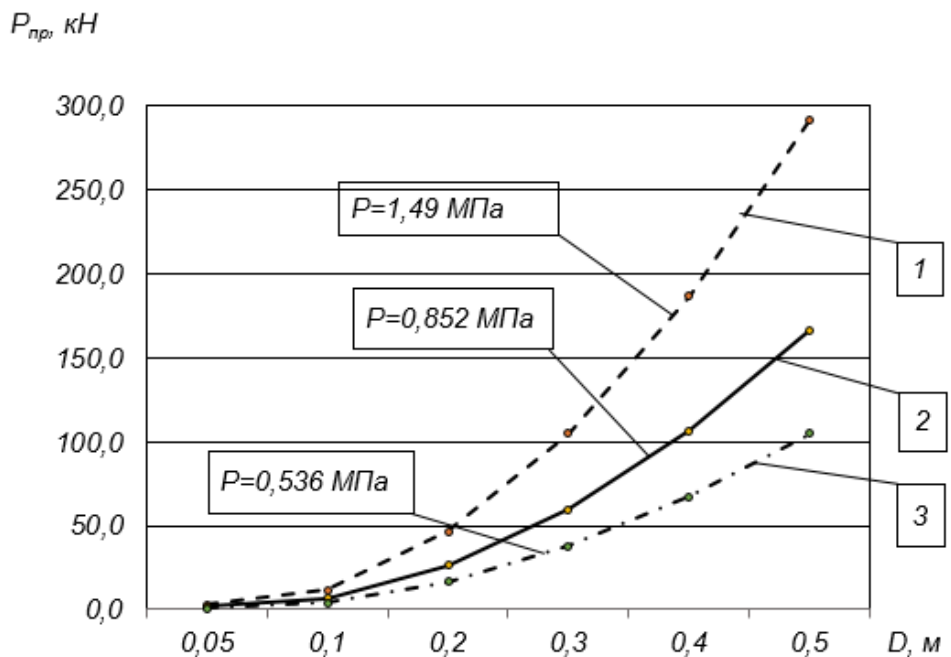


Рис. 3. Залежність зусилля заглиблення конусної частини наконечника від діаметра проколу: 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

Для побудови графіка залежності рис. 3. зусилля заглиблення конусної частини наконечника вихідними даними для розрахунку були:  $2\beta = 50^\circ$  для твердого супіску –  $E_{zp} = 1,39$  МПа;  $f = 0,532$ ; для напівтвердого суглинка -  $E_{zp} = 0,892$  МПа;

$f = 0,424$ ; для тугопластичної глини  $E_{zp} = 0,631$  МПа;  $f = 0,325$ .

Визначимо силу тертя на циліндричній поверхні наконечника.

Для визначення сил тертя на циліндричній поверхні наконечника розглянемо фізику процесу проколювання в цілому.

Після формування ґрунтової порожнини кінчною частиною наконечника до необхідного діаметра деформування ґрунту в радіальному напрямку припиняється. З цього моменту часу ( $t = 0$ ,  $y = 0$ ) в напруженому середовищі встановлюється статична рівновага, коли напруження, які характеризують стан середовища релаксують (зменшуються з часом) у результаті зменшення пружної складової деформації. Такий стан середовища описується рівністю [4; 1; 6].

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

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), [1];

$\sigma_1$  – напруження на границі пружної і пластичної зон визначили Кравець С. В. і Кованько В. В. [5].

$$\sigma_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} = \left| \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A} \right|, \quad (16)$$

де

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

$\varphi_0$  – кут внутрішнього тертя ґрунту, [15];

$c$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту, [15];

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

$h$  – глибина на якій здійснюється прокол.

У момент часу  $t = 0$  в поперечному перерізі наконечника в основі конуса діє максимальний контактний тиск (15). Якщо  $t > 0$ , то у зв'язку з тим, що  $E_V \gg k_g$  [1], тиск на циліндричній частині наконечника на довжині 10...20 см зменшується за даними [7; 8] до 0,016 ... 0,035 МПа, для діаметрів циліндра від 0,1 до 0,35 м, із збільшенням діаметра залишковий тиск зростає.

Тому якщо  $l_u \leq 0,2$  м,  $q_u^{cep} = \frac{D_p}{2D} \sigma_1$ , а якщо  $l_u > 0,2$  м, то тиск у залежності від діаметра знаходиться у межах 0,016...0,035 МПа.

Сумарна сила тертя на циліндричній частині наконечника дорівнює

$$F_{mp} = 0,1\pi\lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_u - 0,2) q_3, \quad (17)$$

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

Тоді сумарний опір заглибленню кінчно-циліндричного наконечника дорівнює

$$P_{\Sigma} = \frac{\pi E_{zp} D^2}{8} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) + 0,1\pi\lambda f D \sigma_1 + \pi f D (l_u - 0,2) q_3. \quad (18)$$

Залежність сумарного опору заглиблення на глибині 1,5 м від діаметра наконечника приведена на рис. 4. ( $l_u = 0,5$  м).

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

$$l_3 > \frac{E_{zp} D}{8q_3} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) - \frac{0,1\lambda \sigma_1}{q_3} + 0,2, \text{ м.} \quad (19)$$

З урахуванням динамічності процесу [7]:

$$l_3 \geq \frac{(0,3...0,4) E_{zp} D}{8q_3} (1 + f \operatorname{ctg} \beta) - \frac{0,1\lambda \sigma_1}{q_3} + 0,2, \text{ м.} \quad (20)$$

Довжина корпусу збільшується прямопропорційно діаметру наконечника.

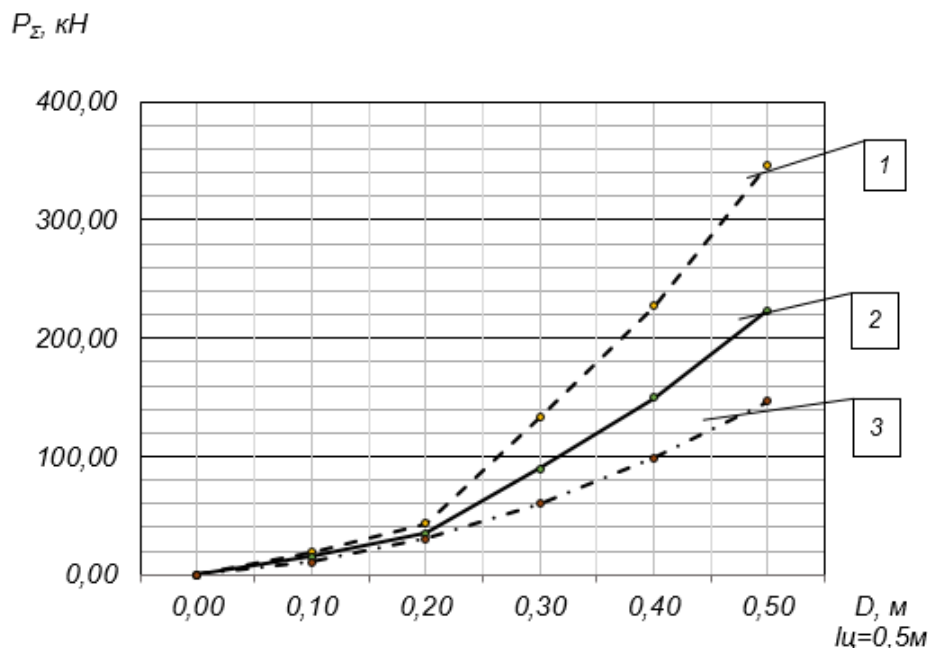


Рис. 4. Залежність сумарного опору переміщенню конічно-циліндричного наконечника від діаметра ( $l_{ц}=0,5$  м):  
1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

**Висновки.** Встановлені в роботі закономірності зміни тиску ґрунту на бічній поверхні конуса та циліндричній частині наконечника ґрунтопроколюючої головки дозволили отримати аналітичну залежність розрахунку його сили опору в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту і діаметра наконечника. Так, наприклад, у найбільш поширених ґрунтах України сумарна сила опору ґрунту проколу діаметром свердловини 200 мм складає: у твердому супіску понад 85 кН, у напівтвердому суглинку більш 50 кН та у тугопластичній глині вона буде дорівнювати 25 кН. У той же час опір заглиблення конусної частини у

цих ґрунтах дорівнює 60 кН, 30 кН та 15 кН відповідно. Таким чином можна констатувати, що сила тертя на поверхні конусної частини наконечника проколюючої головки досягає 25 – 30 % від сумарного значення сили опору ґрунту.

Запропонований спосіб дозволяє визначити зусилля проколу на основі знання тільки типу ґрунту і його природної вологості.

Отримані результати розрахунків можуть бути рекомендовані до практичного впровадження при виборі параметрів проколюючої головки установок для безтраншейного прокладання підземних комунікацій шляхом статичного проколу ґрунту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кравець С. В. Наукові основи створення землерійно-ярусних машин і підземно рухомих пристроїв: Монографія / С. В. Кравець., В. В. Кованько., О.П. Лук'янчук. – Рівне: НУВГП, 2015. – 319 с.
2. Бабич Є. М. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник для студ. вищих навч. закл., які навчаються за напрямом "Водні ресурси" / С. М. Бабич, Ю. О. Крусь. – Рівне: Видавництво РДТУ, 2001. – 367 с.
3. Кравець С. В. Теорія руйнування робочих середовищ: навч. Посіб. / С. В. Кравець. – НУВГП. Рівне: 2008. – 124 с.
4. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: Учеб, пособие для строительных вузов / С. С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
5. Гольдштейн П. Н. Механические свойства грунтов: напряженно-деформированные характеристики грунтов / П. Н. Гольдштейн – М.: Стройиздат, 1979. – 304 с.
6. Дяков В. П. Усилие вертикальною резания почвы / В. П. Дяков. Мех. и электр. сельск. хоз.. 1987. № 4. – С. 34 -36.
7. Ешуткин Д. Н. Высокопроизводительные гидropневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций / Д. Н. Ешуткин, Ю. П. Смирнов, В. И. Цой, В. Л. Исаев. под ред. Д. Н. Ешуткин. – М.: Стройиздат, 1990. – 176 с.
8. Полтавцев И. С. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства / И. С. Полтавцев, В. Б. Орлов. И. Ф. Ляхович – К.: Будівельник, 1977. – 136 с.
9. Рубинштейн А. Л. Ґрунтоведение, основания и фундаменты: Учеб. пособие для вузов / А. Л. Рубинштейн. – М.: Сельхозгиз, 1961. – 312 с.
10. Тимошенко В.К. Определение формы наконечника, обеспечивающей минимальное усилие прокола / В. К. Тимошенко. Строительство трубопроводов. - 1969. - №3. – С. 18-20.
11. Ромакин Н.Е. Усилие внедрения и оптимальный угол заострения рабочего наконечника при статическом проколе ґрунта / Н.Е. Ромакин, Н.В. Малкова // Строительные и дорожные машины. – 2006. - № 10. – С. 35 - 37.

12. Земсков В.М. Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола / В.М. Земсков, А.В. Судаков. Известия ТулГУ. Серия «Подъемно-транспортные машины и оборудование». – Тула: ТулГУ, 2005. Вып. 6. – С. 35 - 38.
13. Супонев В.Н. Исследование процесса изменения состояния грунта вокруг горизонтальной скважины после её формирования методом статического прокола грунта / В. Н. Супонев, С. Л. Хачатурян, В. И. Олексин. - Вестник ХНАДУ. Сборник научных статей. Харьков, ХНАДУ – Выпуск №73, 2016. –с. 196-202.
14. Михельсон И.С. Определение напряжений в грунте при введении рабочего инструмента бестраншейной прокладывающей машины / И. С. Михельсон. Вестник СГТУ. – Саратов, 2011. Вып. 1
15. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. ДБН В.2.1-10-2009 / Мінрегіонбуд України. – К., 2009. – 161 с. Режим доступу: [http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn\\_v21\\_10\\_2009/1-1-0-319](http://dbn.at.ua/load/normativy/dbn/dbn_v21_10_2009/1-1-0-319).

## REFERENCES

1. Kravets' S. V., Kovan'ko V. V., O. P. Luk'yanchuk. *Naukovi osnovi stvorenniya zemleriyno-yarusnikh mashin i pidzemno rukhomikh pristroiv: Monografiya*. [Scientific bases of creation earth-moving-tier machines and underground mobile devices: Monograph]. – Rivne: Vydavnytstvo NUVHP, 2015. – 319 p.
2. Babych Ye. M., Krus' Yu. O. *Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenti: pidruchnyk dlya stud. vyshchikh navch. zakl., yaki navchayut'sya za napryamom "Vodni resursy"* [Mechanical properties of soils: tense-deformed descriptions of soils]. – Rivne: Vydavnytstvo RDTU, 2001. – 367 p.
3. Kravets' S. V. *Teoriya ruynuvannya robochykh seredovyshch: navchal'nyy posibnyk* [Theory of destruction of workings environments: train aid]. – Rivne: Vydavnytstvo NUVHP, 2008. – 124 p.
4. Vyalov S. S. *Reologicheskiye osnovy mekhaniki gruntov: Ucheb, posobiye dlya stroitel'nykh vuzov* [Reologicheskie bases of mechanics of soils: Educational, manual for build institutes of highert]. – M.: Vyssh. shk., 1978. – 447 p.
5. Hol'dshteyn P. N. *Mekhanicheskiye svoystva hruntov: napryazhenno-deformirovannyye kharakterystyky hruntov* [Mechanical properties of soils: tense-deformed descriptions of soils]. – M.: Stroizdat, 1979. – 304 p.
6. D'yakov V. P. *Usiliye vertikal'noyu rezaniya pochvy* [Effort vertical cuttings of soil]. *Mekh. i elektr. sel'sk. khoz.* 1987. # 4. – p. 34 - 36.
7. Yeshutkin D. N., Smirnov Yu. P., Tsoy V. I., ta in/ *Vysokoproizvoditel'nyye gidropnevmaticheskiye udarnyye mashiny dlya prokladki inzhenernykh komunikatsiy*. [High-performance hydropneumatic shock machines for the gasket of engineering communications]. – M.: Stroyizdat, 1990. – 176 p.
8. Poltavtsev I. S., Orlov V. B., Lyakhovich I. F. *Spetsial'nyye zemleroynyye mashiny i mekhanizmy dlya gorodskogo stroitel'stva*. [Special earth-moving machines and mechanisms for urban construction]. – K.: Budivel'nik, 1977. – 136 p.
9. Rubinshteyn, A. L. *Gruntovedeniye, osnovaniya i fundamenti: Ucheb. posobiye dlya vuzov* [Soils, bases and foundations: textbook for universities]. – M.: Sel'khozgiz, 1961. – 312 p.
10. Timoshenko V. K. *Opredeleniye formy nakonechnika, obespechivayushchey minimal'noye usiliye prokola* [The definition of the shape of the tip, providing the minimum puncture force]. *Stroitel'stvo truboprovodov*. – 1969. – #3. – p. 18 - 20.
11. Romakin N. Ye., Malkova N. V. *Usiliye vnedreniya i optimal'nyy ugol zaostreniya rabocheho nakonechnika pri staticheskom prokole grunta* [Effort of introduction and optimum corner of sharpening of working tip at the static puncture of soil]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*. – 2006, # 10. – P. 35 - 37.
12. Zemskov V. M., Sudakov A. V. *Analiz issledovaniya lobovogo soprotivleniya pri bestransheyroy prokladke truboprovodov metodom prokola* [Analysis of research of head-resistance at a trenchless mainlaying the method of puncture]. *Izvestiya TulGU: Pod'yomno-transportnyye mashiny i oborudovaniye*. – Tula: TulGU, 2005. #6. – p. 35 - 38.
13. Супонев В.Н., Хачатурян С. Л., Олексин В. И. *Issledovaniye protsessa izmeneniya sostoyaniya grunta vokrug gorizonta'lnoy skvazhiny posle yeyo formirovaniya metodom staticheskogo prokola grunta* [Research of process of change of the state of soil round ahorizontal mining hole after her forming by the method ofstatic puncture of soil]. *Vestnik KHNADU. Sbornik nauchnykh stately*. – Khar'kov, Vydavnytstvo KHNADU, 2016. #73, – p. 196 - 202.
14. Mikhel'son I.S. *Opredeleniye napryazheniy v grunte pri vnedrenii rabocheho instrumenta bestransheyroy prokladyvayushchey mashiny* [Determination of tensions in soil at introduction of working instrument of бестраншейной laying machine]. – Vestnik SGTU. – Saratov, 2011. Vyp. 1.
15. Minregion Ukrainy. *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennya proektuvannya: N B V.2.1-10-2009*. [State standard of Ukraine N B V.2.1-10:2009. Bases and foundations of buildings. Substantive provisions of planning]. – K., 2009. – 161 p. Available at: <http://www.dbn.at.ua>. (in Ukrainian).