

Встановлення закономірностей процесу проколу ґрунту робочим органом з асиметричним наконечником

**С. В. Кравець, В. М. Супонєв, С. П. Балесний, В. О. Шевченко,
О. В. Єфименко, В. М. Рагулін**

Наявність аналітичних залежностей, які описують процес статичного проколу ґрунту робочим органом з конічним асиметричним наконечником, потрібно для створення установок з можливістю керування траєкторією проколу ґрунту.

У роботі розглянуті особливості процесу взаємодії асиметричного конічного наконечника з ґрунтом. Отримані аналітичні залежності для визначення його реакцій при статичному проколі, для відхилення траєкторії руху головки від прямої, для встановлення розміру зони ущільнення ґрунту і величини руйнуючої сили, яка діє на прилеглі комунікації та інші підземні об'єкти.

Встановлено, що з збільшенням величини зміщення вершини конусу, наприклад, від своєї вісі з 0,02 м до 0,08 м при діаметрі свердловини 0,2 м, величина опору проколу ґрунту збільшується майже в чотири рази. Найбільший опір досягається при проколюванні твердого сугінку.

Встановлено, що з ростом величини зміщення вершини конусу наконечника відхилення траєкторії збільшується. Найбільшого відхилення від прямої траєкторії руху проколююча головка досягає при більш загостреному конусі та більшому асиметричному відхиленні його вершини та, наприклад, в твердому сугінку може скласти до 0,17 м при довжині прольоту 10 м.

Визначено, що розмір зони руйнування ґрунту може бути більшим майже ніж у 1,8 рази порівняно з наконечником у вигляді симетричного конусу та досягати від 8 до 12 діаметрів свердловини залежно від типу ґрунту. Максимальний тиск на прилеглі об'єкти може досягати з 0,06 МПа в тугопластичній глині до 0,09 МПа в твердому сугінку.

Отримані розрахункові залежності для визначення силових та технологічних параметрів залежно від геометричних розмірів асиметричного наконечника робочого обладнання можуть бути використані при створенні установок з керованим статичним проколом для найбільш поширених ґрунтових умов.

Ключові слова: безтраншейні технології, прокол ґрунту, інженерні комунікації, робочий орган, керування рухом.

1. Вступ

Безтраншейне прокладання інженерних комунікацій активно поширюється в усіх країнах світу. Серед існуючих методів формування свердловин для реалізації цієї технології найбільш популярним є метод статичного проколу ґрунту. Головним недоліком методу традиційного проколу є недостатня

точність руху проколюючої головки у масиві. Для досягнення цілі необхідне постійно корегувати траєкторію руху. Управління рухом можливо шляхом використання ґрунтопроколюючої головки з асиметричним наконечником та дії на неї поступального або поступально-обертального руху від силової установки. Зазначений процес вимагає великих зусиль та енергетичних витрат.

Безтраншейне прокладання інженерних комунікацій активно поширюється в усіх країнах світу. Серед існуючих методів формування свердловин для реалізації цієї технології найбільш популярним є метод статичного проколу ґрунту. Головним недоліком методу традиційного проколу є недостатня точність руху проколюючої головки у масиві. Для досягнення цілі необхідне постійно корегувати траєкторію руху. Управління рухом можливо шляхом використання ґрунтопроколюючої головки з асиметричним наконечником та дії на неї поступального або поступально-обертального руху від силової установки. Зазначений процес вимагає великих зусиль та енергетичних витрат. Тому актуальною задачею є вдосконалення методів розрахунку опору ґрунту проколу та забезпечення керування траєкторією руху ґрунтопроколюючої головки з асиметричним конусом. Це здійснюється шляхом визначення величини її відхилення в залежності від типу ґрунту та його фізико-механічних властивостей.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розвиток інфраструктури міст постійно потребує будівництва нових інженерних мереж, що накладає певні обмеження на будівельників [1]. Прокладання підземних комунікацій з розриттям траншеї викликає значні соціальні проблеми та економічні витрати, які виникають у зв'язку з зупинкою транспортного руху, ускладнення вантажних та пасажирських перевезень. Тому безтраншейні методи прокладання підземних комунікацій набувають все більш широкого застосування, в тому числі при прокладанні трубопроводів великого діаметру, яке може виконуватись в комбінації з методами мікротонелювання [2]. Удосконалення технологій будівництва іде в різних напрямках. Один із шляхів націлений на підвищення ефективності системи керування траєкторією руху робочого органу в ґрунті підвищенням точності визначення його в ґрунті та створення приладів для індикації перешкод на шляху руху у вигляді кабелів та трубопроводів [3]. Ефективне прокладання підземних комунікацій безтраншейними методами забезпечується правильно підібраними технологіями створення горизонтально-спрямованих свердловин, яке розглядається в роботі [4]. Основним недоліком цих технологій є їх вартість, яка походить від високої вартості бурового обладнання та вартості виконання робіт. З різноманітних методів, доступних на ринку для отримання технологічних порожнин у ґрунті, найпростішим та найдешевшим є статичний прокол ґрунту [5]. Але це порівняння може бути справедливим лише для коротких ділянок траси у межах 25–30 м серед методів які утворюють прямолінійні свердловини. Прокладання трубопроводів на великі дистанції утворенням керованого лідерного проколу розглядається в розглядається авторами в [6]. Але характер наконечника та вплив його параметрів на процес не розглядається.

Загальні закономірності процесів проколу ґрунту та утворення горизонтально спрямованих свердловин описані в [7]. Процес взаємодії ґрунтопроколюючого робочого органу з ґрунтом було розглянуто в роботі [8]. Але проведені дослідження автором цієї роботи націлені тільки на підвищення ефективності процесу проникнення в ґрунт робочого органу з симетричним конічним наконечником, та не надають відповіді про підвищення точності проходки або зміни траєкторії руху робочого органу в ґрунті. По цієї ж причині результати досліджень в робіт [9] мають вузьке розповсюдження результатів тільки в межах коротких дистанцій. Не розглядається процес взаємодії асиметричного наконечника з ґрунтом при керованому проколі в роботі [10]. Руйнуючий вплив від радіального ущільнення ґрунту при створенні свердловини статичним методом на сусідні комунікації, основи доріг та фундаменти споруд розглядається в [11]. Але розрахунки розміру зони ущільнення ґрунту навколо свердловини не наводяться. Необхідність враховувати ущільнення ґрунту при прокладанні траси біля підземних споруд та комунікацій розглядається також в [12]. Але визначення сил, що діють на прилеглі комунікації від пружного стану ґрунту під час його ущільнення асиметричним наконечником не приводиться. Зменшити зону руйнування можливо використанням методу продавлювання ґрунту трубою. Тоді згідно до [13] ущільнення ґрунту на зовні відбуватися не буде. Однак отримані в роботі рекомендації стосуються лише робочих органів з кільцеподібними наконечниками. Дослідження по визначенню зусилля проколу ґрунту конічним наконечником наведені в [14]. Залежність лобового опору ґрунту від його геометричних параметрів наведено [15]. Слід визначити, що отримані в роботах [14, 15] розрахункові залежності мають емпіричний характер та не можуть бути використані для випадку проколу ґрунту робочим органом з асиметричним наконечником. Визначення силового приводу установок для проколу ґрунту асиметричним наконечником у вигляді скошеного циліндру розглядається в роботі [16]. На відміну від [16], в роботі [17] встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху робочого органу з таким наконечником було вирішено аналітичним шляхом з урахуванням відомих нормативних властивостей ґрунту. Вплив матеріалу труби на її вигін, який обумовлює раціональну траєкторію свердловини, розглядається в роботі [18]. Але досліджень по впливу на процес проколу ґрунту конічним асиметричним наконечником не наводиться.

Аналітичних моделей для розрахунку технологічних та конструктивних параметрів обладнання з асиметричним конічним наконечником при літературному пошуку не виявлено.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є встановлення закономірностей процесу проколу ґрунту робочим органом з асиметричним наконечником та на їх основі розробити технологічні та конструктивні теоретичні розрахункові залежності для установок безтраншейного прокладання підземних комунікацій.

Для досягнення поставленої мети необхідно рішення наступних задач:

- визначити силу опору ґрунту переміщенню та поперечну відхилюючу силу, які діють на асиметричний конічний наконечник;
- визначити величину відхилення головки з асиметричним конусом при її просуванні в масиві ґрунту;
- встановити розмір зони руйнування навколо асиметричного конічного наконечника та визначення сили тиску ґрунту на прилеглі підземні комунікації.

4. Матеріали та методи дослідження процесу проколу ґрунту ґрунтопроколюючим робочим органом з асиметричним конічним наконечником

В основі проведених теоретичних методів дослідження покладені положення теорій механіки ґрунтів та їх різання, проколу ґрунтів та традиційних методів аналізу результатів досліджень. Підтвердження достовірності результатів отриманих окремих положень теорії процесу відбувалося шляхом їх порівняння з практичними та експериментальними даними.

5. Результати дослідження процесу проколу ґрунту робочим органом з асиметричним конічним наконечником

5.1. Визначення сили опору ґрунту переміщенню та поперечної відхилюючої сили, які діють на асиметричний конічний наконечник

Розрахункова схема дії сил опору ґрунту на асиметричний конічний наконечник ґрунтопроколюючого робочого органу представлена на рис. 1.

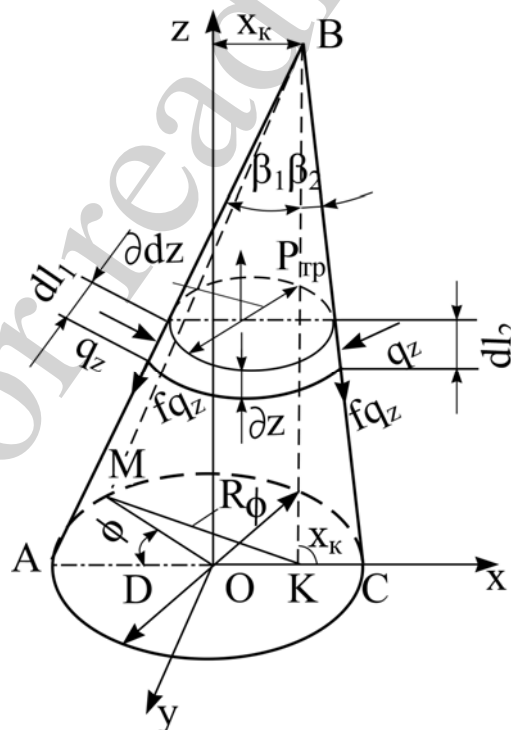


Рис. 1. Розрахункова схема до визначення дії сил опору ґрунту на наконечник з асиметричним конусом

Для розрахунку сили осьового зусилля опору ґрунту проколу та її залежності від величини зміщення вершини конусу, яку представимо у вигляді

відстані x_k від її проєкції на вісь x до точки C (рис. 1).

Згідно з отриманої раніш методики [17], спочатку необхідно визначити закономірність зміни щільності ґрунту по висоті конуса на основі закону рівності мас ґрунту до і після його проколу. Для цього необхідно визначити площі бокової поверхні асиметричного конуса з умови обмеження його загострення, при якому повинно забезпечуватися схід ґрунту зі стінок конуса. Для цього через його геометричні розміри розглянемо тангенси кутів відхилення вершини конуса та $\text{tg}\beta_2$, які мають вигляд:

$$\text{tg}\beta_1 = \frac{R + x_k}{H}; \quad \text{tg}\beta_2 = \frac{R - x_k}{H},$$

де R – радіус основи конуса; H – висота конуса; x_k – величина зміщення вершини конуса по вісі x .

Щоб не утворювалося ґрунтове ядро ущільнення при вершині конуса, коли гарантується схід ґрунту з утворюючої поверхні, його загострення повинно бути не менш, ніж $2\beta_1 \leq 50^\circ$ [5], тобто

$$\text{tg}\beta_1 = \frac{R + x_k}{H} \leq 0,466,$$

звідки

$$\frac{x_k}{H} \leq 0,466 - \frac{R}{H}; \quad \frac{x_k}{H} \leq 0,466 - \frac{R}{H},$$

якщо $x_k=0$, то $\frac{R}{H} \leq 0,466$, а якщо $x_k=R$, то $\frac{R}{H} \leq 0,233$.

Бічна (половинна) площа елементарного зрізаного конуса дорівнює:

$$\Delta S_{\delta_1} = \frac{\pi \cdot dl_1}{2} \left(\frac{d_z}{2} + \frac{d_z}{2} + \partial d_z \right);$$

$$\Delta S_{\delta_2} = \frac{\pi \cdot dl_2}{2} \left(\frac{d_z}{2} + \frac{d_z}{2} + \partial d_z \right), \quad (1)$$

де ∂d_z – елементарний приріст діаметра зрізаного конуса на висоті ∂z .

$$dl_1 = \frac{\partial z}{\cos\beta_1}; \quad dl_2 = \frac{\partial z}{\cos\beta_2}; \quad d_z = \frac{D}{H}(H - Z); \quad (2)$$

$$\cos \beta_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R + x_k}{H}\right)^2}};$$

$$\sin \beta_1 = \frac{\frac{R + x_k}{H}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R + x_k}{H}\right)^2}};$$
(3)

$$\cos \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta_2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - x_k}{H}\right)^2}};$$

$$\sin \beta_2 = \frac{\frac{R - x_k}{H}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R - x_k}{H}\right)^2}}.$$
(4)

Таким чином виділена площа буде дорівнювати:

$$\Delta S_{\beta_1} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D}{H} (H - z) \sqrt{1 + \left(\frac{R + x_k}{H}\right)^2} \cdot \partial z;$$
(5)

$$\Delta S_{\beta_2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D}{H} (H - z) \sqrt{1 + \left(\frac{R - x_k}{H}\right)^2} \cdot \partial z.$$
(6)

Визначимо закон зміни щільності ґрунту по висоті конуса на основі закону рівності мас ґрунту до і після проколу:

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_z^2) \rho_z = \frac{\pi}{4} \left[D^2 - \frac{D^2}{H^2} (H - z)^2 \right] \rho_z.$$
(7)

Звідки:

$$\rho_z = \frac{\rho_{\text{пр}}}{1 - \left(\frac{H - z}{H}\right)^2}.$$
(8)

Тоді нормальний тиск ґрунту в кожному поперечному перерізі конуса буде дорівнювати:

$$q_z = \frac{(1 + \omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_k} \left(\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} - \frac{1}{\rho_z} \right) =$$

$$= \frac{(1 + \omega) \cdot \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}} \left[1 - 1 + \left(\frac{H - z}{H} \right)^2 \right] = E_{\text{гр}} \cdot \left(\frac{H - z}{H} \right)^2, \quad (9)$$

де $E_{\text{гр}} = \frac{(1 + \omega) \cdot \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}}$ – компресійний модуль деформації ґрунту;

ω – природна вологість ґрунту;

C_k – коефіцієнт компресії ґрунту;

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

ρ_z – змінна щільність ґрунту по висоті конуса пропорційна зміні площі поперечного перерізу конуса;

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

Для визначення лобового опору проколюванню $P_{\text{пр}}$, представимо його в диференційному вигляді:

$$\partial P_{\text{пр}} = q_z \Delta S_{\sigma_1} \sin \beta + f q_z \Delta S_{\sigma_1} \cos \beta_1 +$$

$$+ q_z \Delta S_{\sigma_2} \sin \beta_2 + f q_z \Delta S_{\sigma_2} \cos \beta_2 =$$

$$= q_z \cdot \Delta S_{\sigma_1} (\sin \beta_1 + f \cos \beta_1) +$$

$$+ q_z \cdot \Delta S_{\sigma_2} (\sin \beta_2 + f \cos \beta_2). \quad (10)$$

Враховуючи вирази (3)-(6) після проміжних перетворень маємо:

$$\partial P_{\text{пр}} = \pi E_{\text{гр}} \frac{D}{H^3} \left(f + \frac{D}{2H} \right) (H - z)^3 \partial z. \quad (11)$$

тоді після інтегрування виразу (11) отримаємо:

$$P_{\text{пр}} = \pi E_{\text{гр}} \frac{D}{H^3} \left(f + \frac{D}{2H} \right) \int_0^H (H - z)^3 \partial z =$$

$$= \frac{\pi E_{\text{гр}} D H}{4} \left(f + \frac{D}{2H} \right). \quad (12)$$

Аналогічно було визначено поперечну (відхиляючу) силу P_x . Її диференційний вираз має вигляд:

$$\begin{aligned}
\partial P_x &= q_z \cdot \Delta S_{\sigma_1} (\cos \beta_1 - f \sin \beta_1) - \\
&- q_z \cdot \Delta S_{\sigma_2} (\cos \beta_2 - f \sin \beta_2) = \\
&= -\pi f E_{\text{гр}} \cdot \frac{D}{H^4} x_{\text{к}} (H - z)^3 \partial z.
\end{aligned}
\tag{13}$$

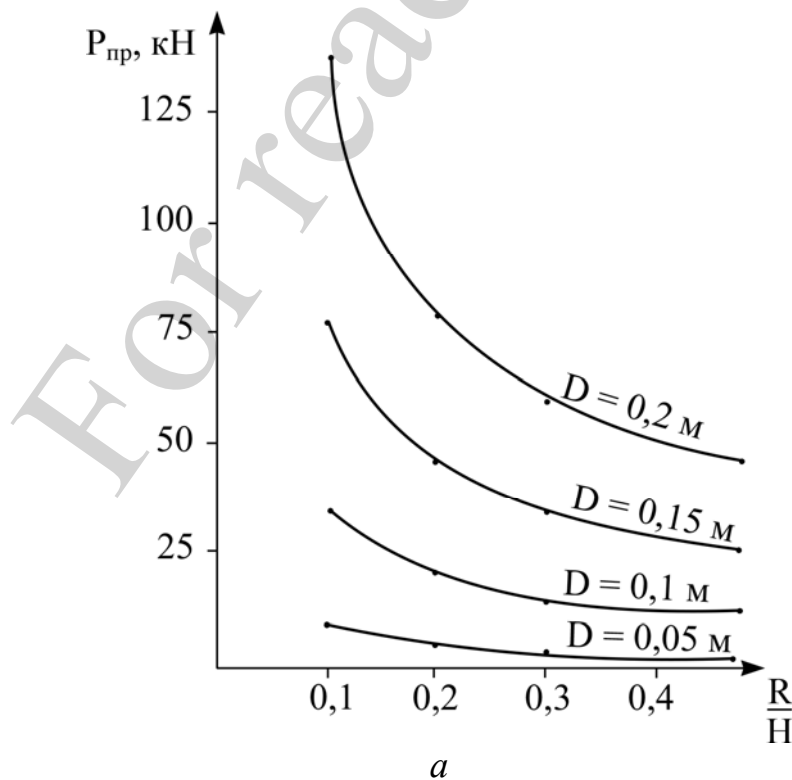
Інтегруючи вираз (13) отримаємо:

$$P_x = -\pi f E_{\text{гр}} \cdot \frac{D}{H^4} x_{\text{к}} \int_0^H (H - z)^3 \partial z = \frac{\pi f E_{\text{гр}}}{4} \cdot \frac{D}{H^4} x_{\text{к}} (H - z)^4 \Big|_0^H = \frac{\pi f E_{\text{гр}} D x_{\text{к}}}{4}.$$

Якщо $x_{\text{к}} = \frac{D}{2}$, то відхилююча сила буде:

$$P_x = f E_{\text{гр}} \cdot \frac{\pi D^2}{8}.
\tag{14}$$

Залежності сил лобового опору ґрунту (12) від величини загострення асиметричного конусу у вигляді відношення його радіусу основи, що дорівнює половині діаметру проколюючої головки до висоти $\frac{R}{H}$ для різних ґрунтів приведені на рис. 2.



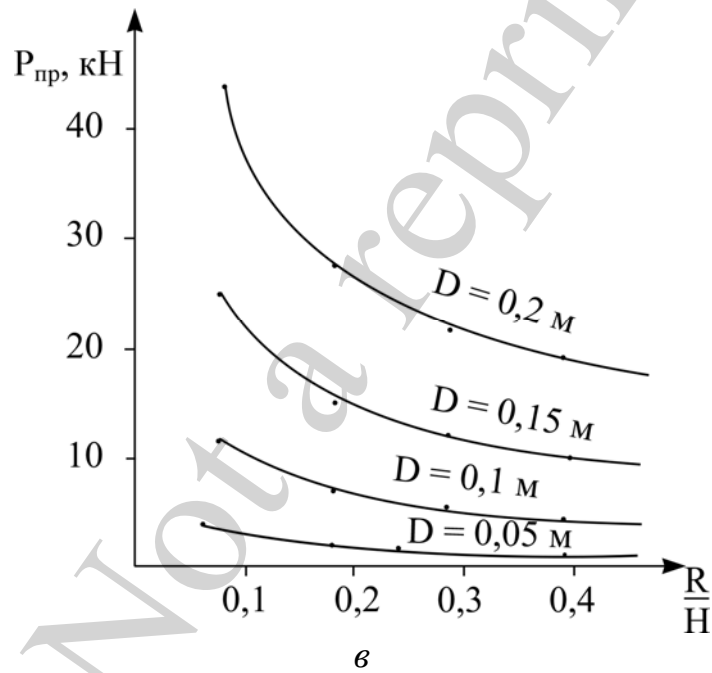
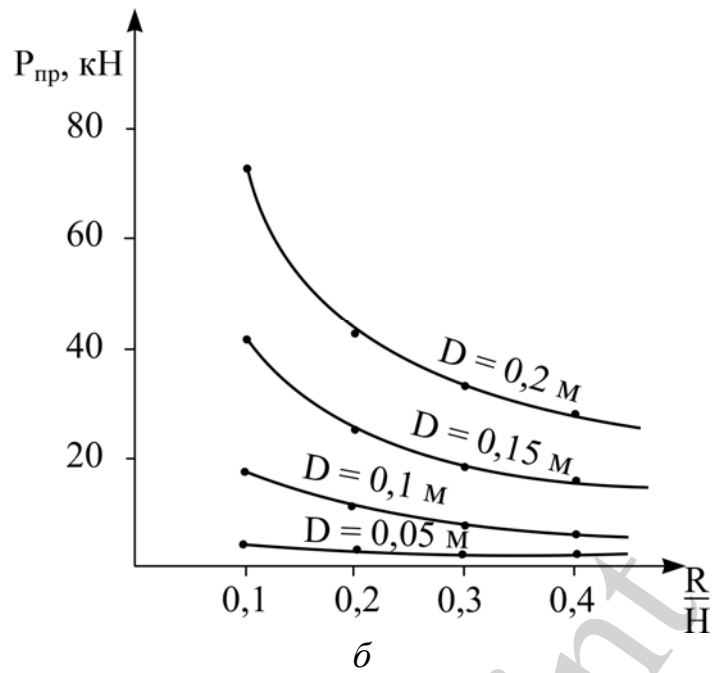


Рис. 2. Залежності сил лобового опору ґрунту від загострення асиметричного конусу для різних діаметрів проколюючої головки та різних ґрунтів: *a* – в твердому супіску; *б* – у напівтвердому суглинку; *в* – в туго пластичній глині

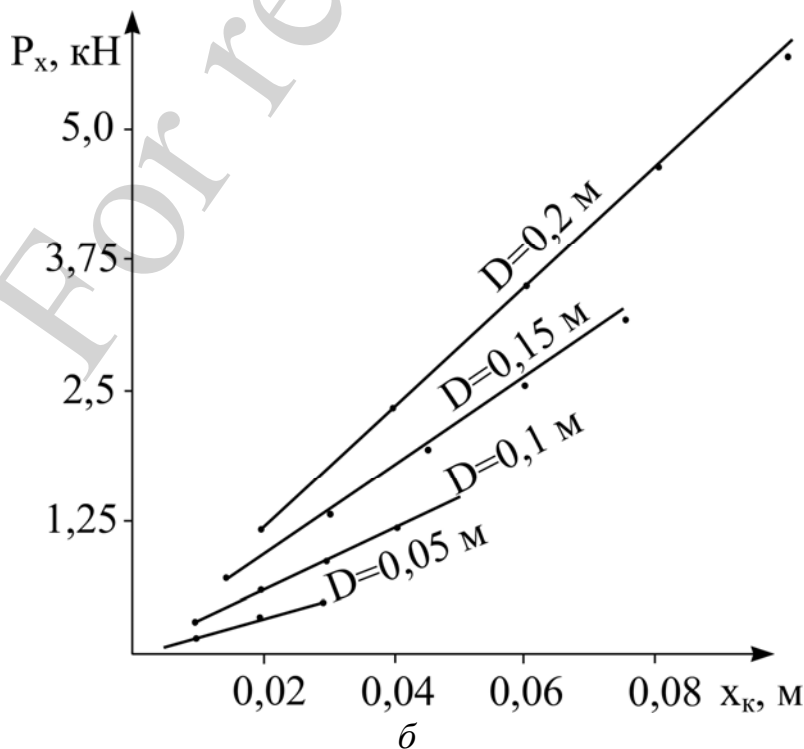
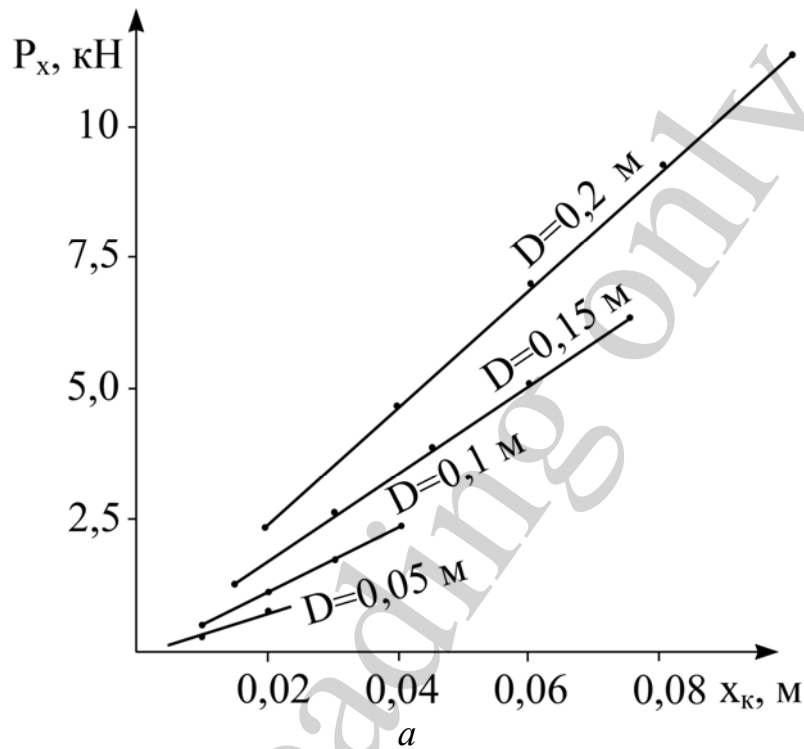
Залежності поперечної (відхиляючої) сили P_x лобового опору ґрунту (14) від величини зміщення вершини асиметричного конусу для різних ґрунтів та діаметрів проколюючої головки приведені на рис. 3.

Наведені графіки на рис. 2, 3 були отримані для найбільш поширених типів ґрантів, в яких може утворюватися комунікаційна порожнина шляхом їх проколювання статичним методом. В розрахунках закладені наступні вихідні дані [17]: модулі деформації ґрунтів: супіску $E_{гр}=1,36$ МПа, суглинку $E_{гр}=0,892$ МПа; глини $E_{гр}=0,63$ МПа. Також закладені сили тертя ґрунтів по

сталі: для супіску $f=0,532$, для суглинку $f=0,424$, для глини $f=0,325$.

Як видно з графіків на рис. 2, з збільшенням загострення конусу в межах 50° опір проколу ґрунту знижується в 2,2–2,5 рази. А з рис. 3 видно, що при відхиленні конусу на величину x_k з 0,02 м до 0,08 м, наприклад, при діаметрі свердловини 0,2 м, значення відхилюючої сили збільшується майже в три рази.

Також видно, що найбільший опір та відхилююча сила будуть при проколюванні твердого супіску. Це в 3,6 рази більше, ніж в тугопластичній глині та в 2 рази більше, ніж в напівтвердому суглинку.



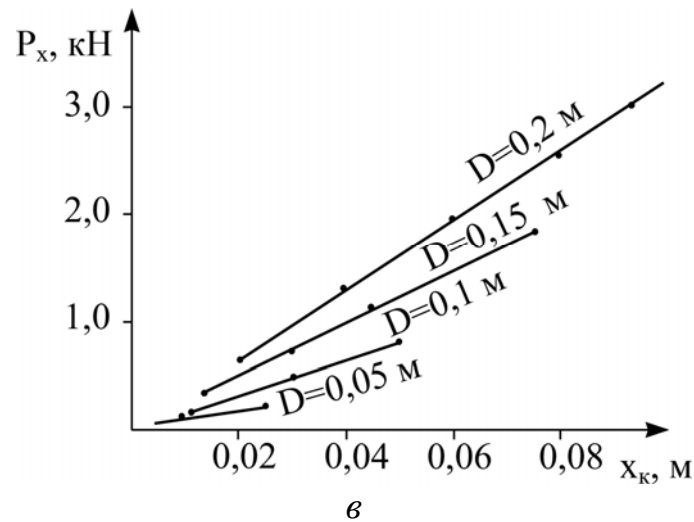


Рис. 3. Залежності поперечної (відхиляючої) сили P_x лобового опору ґрунту від величини зміщення вершини асиметричного конусу на відстань x_k та діаметрів проколюючої головки для ґрунтів: *a* – в твердому супіску; *б* – у напівтвердому суглинку; *в* – в тугопластичній глині

Отримані результати можуть бути використувані при виборі технічних характеристик силових установок відповідно до технологічних завдань та ґрунтового середовища, в якому треба прокласти інженерні комунікації.

5. 2. Визначення величини відхилення головки з асиметричним конусом при її просуванні в масиві ґрунту

У процесі обертання конічного асиметричного наконечника навколо своєї осі і дії на нього осьового зусилля наконечник рухається по прямолінійній траєкторії. Після припинення обертового руху наконечник під дією реакції ґрунту відхиляється в сторону фіксованого напрямку зміщення конусу. Як було встановлено в [17], його максимальне відхилення залежить від конструктивних параметрів наконечника і штовхаючі штанг, їх механічних властивостей та фізико-механічних властивостей ґрунту, що проколюється. Для цього наконечник з приводними штангами розглядається як балка на пружній основі, на яку діє реакція ґрунту. Рівняння для визначення прогину (відхилення) для такої задачі має вигляд [19]:

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{P_x}{8E_{\text{зр}}I\beta_n^3}, \quad (15)$$

де $E_{\text{зр}}$ – модуль пружності штанги при згині ($E_{\text{зр}}=2 \cdot 10^7$ Н/см²); I – момент інерції поперечного перерізу наконечника; β_n – коефіцієнт, що залежить від співвідношення жорсткості штанги і пружної основи (ґрунту), [19]:

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n}{4E_{\text{зр}}I}}, \quad (16)$$

де k_n – коефіцієнт постілі (основи) (для ґрунтів середньої щільності, $k_n=5-50$ Н/см²), [20].

Для кільцевидного перерізу робочого органу і з урахуванням залежностей (14) та (16) рівняння (15) після переутворювання прийме вид:

$$\Delta_{\text{пр}} = 1,96 \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{зг}}} \cdot \frac{fx_{\text{к}}}{D^2 \frac{\gamma^4 - 1}{\gamma^4} \beta_n^3}, \quad (17)$$

де $\gamma = \frac{D}{d}$ – відношення відповідно зовнішнього діаметра наконечника до внутрішнього діаметра.

Відповідно до залежності (14) відхилююча сила досягне свого максимального значення якщо конус буде заглиблений на усю його висоту. При цьому наконечник відхилиться від траєкторії прямолінійного руху на відстань $\Delta_{\text{пр}}$, (17). Щоб відхилитися наконечнику від траєкторії прямолінійного руху на деяку відстань S , йому необхідно пройти шлях без передачі крутного моменту (без обертання) довжиною L . Їх співвідношення в залежності від зміщення конусу можна записати як:

$$\frac{L}{S} = \frac{0,51HD^3 E_{\text{зг}} (\gamma^4 - 1) \beta_n^3}{fE_{\text{гр}} x_{\text{к}} \gamma^4}, \quad (18)$$

де L – довжина переміщення, S – поперечне відхилення.

Межі умови сходу ґрунту з утворюючої поверхні конусу можна записати у вигляді:

$$H = \frac{D}{2\lambda},$$

де $\lambda=0,1\dots0,5$, або $\frac{R}{H} = 0,1\dots0,5$.

Результати розрахунків відношення $\frac{L}{S}$ в залежності від зміщення вершини

асиметричного конуса $x_{\text{к}}$ та його висоти у вигляді співвідношення $\frac{R}{H}$ для

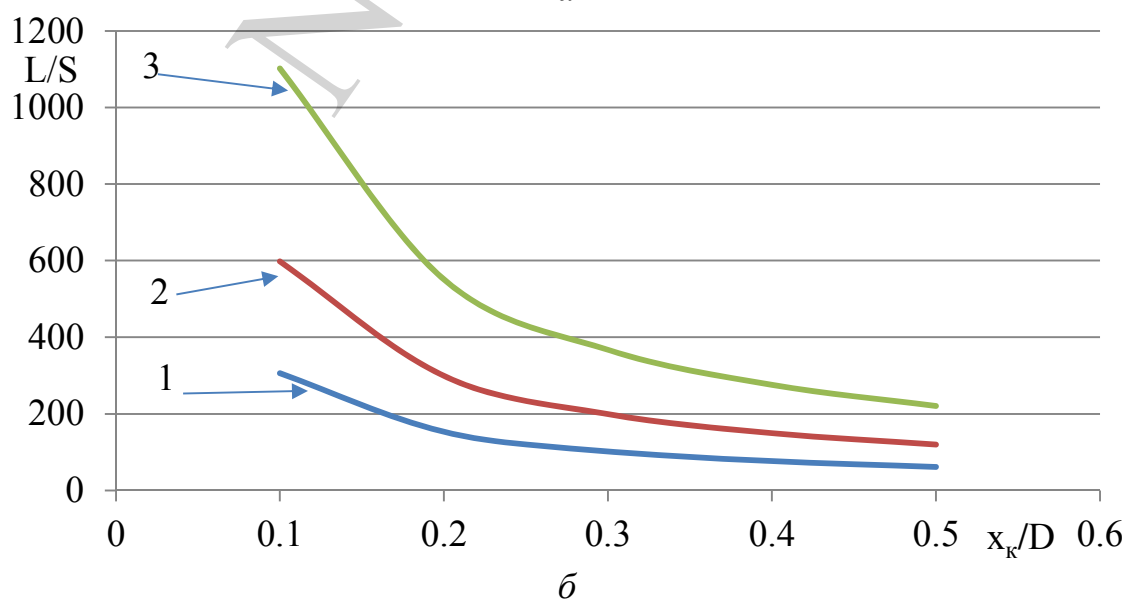
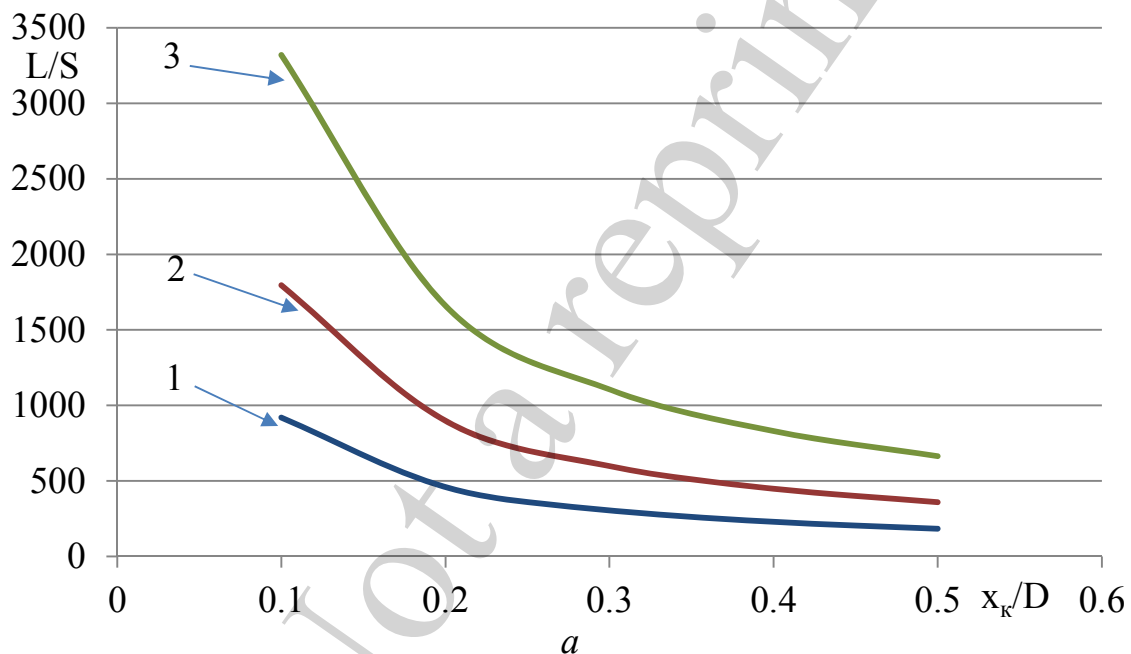
поширених типів ґрунтів представлені в графічному вигляді на рис. 4. В розрахунках коефіцієнт постілі β_n був прийнятим з умови: $k_n=0,3$ МПа, модуль пружності сталевий штанги $E_{\text{зг}}=2 \cdot 10^5$ МПа; момент інерції поперечного перерізу $I = 0,04 \cdot D^4$ м⁴.

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{0,3 \text{ МПа}}{4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,04 D^4}} = \frac{0,055}{D} \text{ м}^{-1}.$$

В розрахунках також були закладені наступні вихідні дані. Модулі деформації ґрунтів [20]: супіску – $E_{гр}=1,36$ МПа, суглинку – $E_{гр}=0,892$ МПа; глини – $E_{гр}=0,63$ МПа. Значення діаметрів: $D=0,05; 0,10; 0,15; 0,2$ м, та відношення $\gamma=1,5$.

З отриманого графіка (рис. 4) видно, що з ростом величини зміщення вершини конусу наконечника відхилення траєкторії збільшується. Найбільшого відхилення від прямої траєкторії руху проколююча головка досягає при більшому відхиленні вершини асиметричного наконечника порівняно з симетричним, тобто при меншому значенні зміщення x_k . Також можна бачити, що чим менший кут загострення конусу наконечника, тим меншим буде величина відхилення робочого органу.

Таким чином, в залежності від фізико-механічних властивостей ґрунту та пружності штовхаючої штанги можна визначити раціональну величину відхилення вершини асиметричного конусу наконечника проколюючої головки.



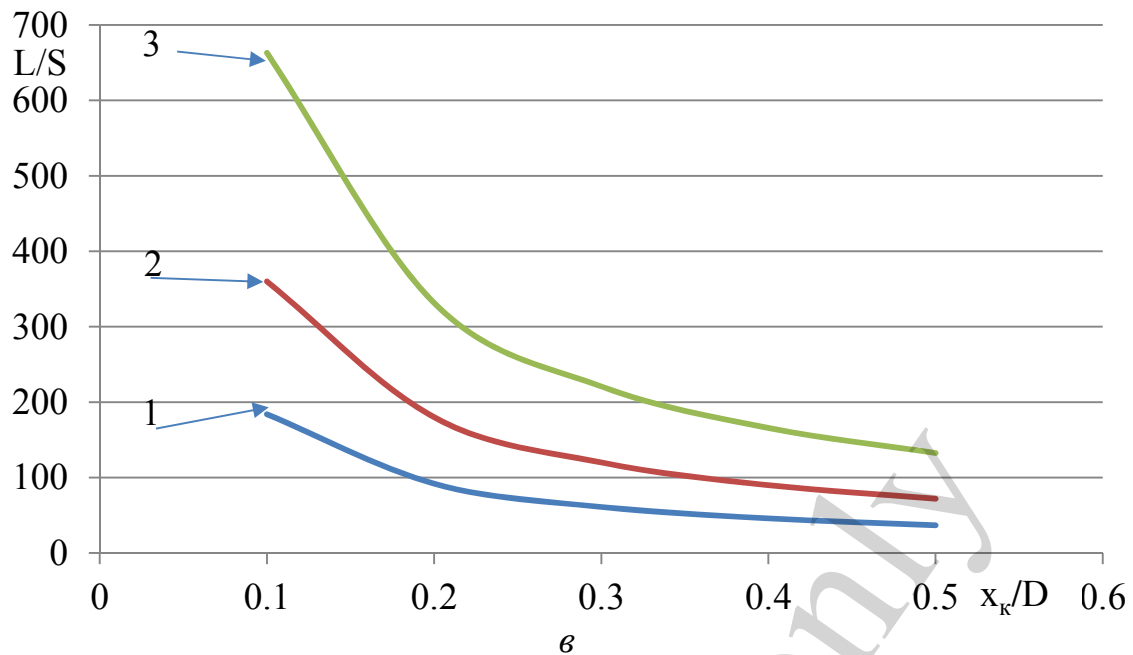


Рис. 4. Розрахунки відношення $\frac{L}{S}$ для поширених типів ґрунтів в залежності від зміщення вершини асиметричного конуса x_k для випадків: $a - \frac{R}{H} = 0,1$; $b - \frac{R}{H} = 0,3$; $\epsilon - \frac{R}{H} = 0,5$; 1 – твердий супісок; 2 – напівтвердий суглинок; 3 – тугопластична глина

5.3. Встановлення зони руйнування та визначення сили тиску ґрунту на прилеглі підземні комунікації

Конусний наконечник, у якого вершина зміщена на x_k відносно центра основи, має змінну довжину твірної конуса, яка залежить від змінного радіуса повороту R_ϕ (рис. 1).

Радіус R_ϕ визначимо із ΔOMK на основі теореми косинусів:

$$R_\phi = \sqrt{R^2 + x_k^2 + 2x_k R \cos \phi}. \quad (19)$$

Цей радіус змінюється по висоті конуса:

$$\begin{aligned} R_\phi &= \frac{H-z}{H} \sqrt{R^2 + x_k^2 + 2x_k R \cos \phi} R_\phi = \\ &= \sqrt{R^2 + x_k^2 + 2x_k R \cos \phi}, \end{aligned} \quad (20)$$

де $R = \frac{D}{2}$ – радіус основи конуса; H – висота конуса.

Визначимо величину зони руйнування ґрунту асиметричним конусом на

основі закону рівності мас ґрунту до і після проколу:

$$\frac{\pi D_p^2}{4} \rho_{\text{пр}} = \frac{\pi}{4} (D_p^2 - 4R_\phi^2) \rho_{\text{сер}}, \quad (21)$$

де $\rho_{\text{пр}}$ – природна щільність ґрунту до руйнування; $\rho_{\text{сер}}$ – середня щільність ґрунту у зоні руйнування після проколу [6]:

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{\lambda^2 \rho_{\text{пр}}}{\lambda^2 - 1}, \quad (22)$$

де $\lambda=4,0 \dots 6,0$ – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту і глибини проколу [6].

Із рівняння (2) з урахуванням (3) після проміжних перетворень визначимо величину зони руйнування ґрунту:

$$D_p = 2\lambda R_\phi = 2\lambda \frac{H-z}{H} \sqrt{R^2 + x_k^2 + 2x_k R \cos \phi}. \quad (23)$$

Тобто зона руйнування залежить від кута повороту ϕ , а це означає, що щільність ґрунту в кожному поздовжньому перерізі залежить від його кута повороту та відстані від основи конуса.

Максимальна величина зони руйнування буде при $z=0$. При цьому, якщо $x_k=0$; $D_p=2\lambda R$. Якщо $x_k=R$ і $\phi=0$; $D_p^{\text{max}} = 4\lambda R = 2\lambda D$.

Якщо $x_k=R$, а $\phi=180^\circ$; $D_p=0$.

Таким чином, якщо вершина конуса зміщена на величину $x_k=R$, то його зона руйнування у 2 рази більша за зону руйнування симетричного конуса з таким же радіусом основи.

Визначимо тиск ґрунту асиметричного конуса на підземні комунікації.

У першому наближенні закономірність зміни щільності ρ_x можна прийняти лінійною в залежності від відстані від бокової стінки отвору вздовж зони руйнування величиною D_p [5] (рис. 5).

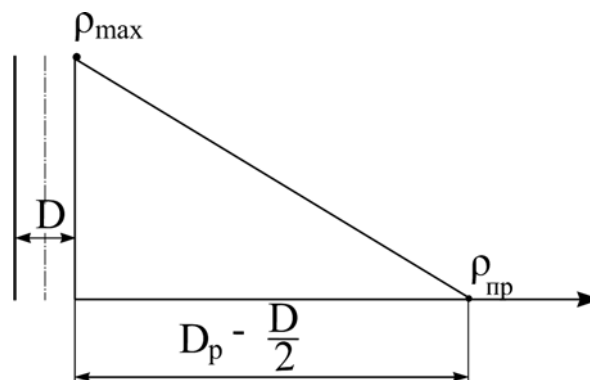


Рис. 5. Прийнята закономірність зміни щільності ґрунту вздовж зони руйнування

$$\rho_x = \rho_{\text{пр}} + \left(1 - \frac{x}{D_p - \frac{D}{2}} \right) (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{пр}}), \quad (24)$$

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

Залежність, яка відображає закономірність зміни тиску на відстані від асиметричного конічного наконечника, після перетворювань приймає вигляд:

$$q = \frac{(1 + \omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_k \rho_{\text{пр}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{пр}}}{\rho_x} \right) =$$

$$= E_{\text{гр}} \left[1 - \frac{\rho_{\text{пр}}}{\rho_{\text{пр}} + \left(1 - \frac{x}{D_p - \frac{D}{2}} \right) (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{пр}})} \right]. \quad (25)$$

Якщо урахувати, що

$$\rho_{\text{сеп}} = \frac{\rho_{\text{max}} + \rho_{\text{пр}}}{2} = \frac{\lambda^2 \rho_{\text{пр}}}{\lambda^2 - 1}, \quad (26)$$

То із рівності (27) можна визначити ρ_{max} .

Тоді тиск ущільненого ґрунту на підземні комунікації дорівнює:

$$q = E_{\text{гр}} \left[1 - \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{D_p - \frac{D}{2}} \right) \frac{2}{\lambda^2 - 1}} \right]. \quad (27)$$

Максимальний тиск на підземні комунікації буде діяти, якщо $x=0$

$$q_{\text{max}} = \frac{2E_{\text{гр}}}{\lambda^2 + 1}. \quad (28)$$

Для твердого супіску – $q_{\max}=(0,054\dots 0,066) E_{\text{гр}}$.

Для напівтвердого суглинку – $q_{\max}=(0,083\dots 0,103) E_{\text{гр}}$.

Для тугопластичної глини – $q_{\max}=(0,103\dots 0,118) E_{\text{гр}}$.

Якщо середня щільність ґрунту в зоні руйнування становить по експериментальних даних для піщано-глинистих ґрунтів $\rho_{\text{сеп}}=(1,05\dots 1,1) \rho_{\text{пр}}$ [5], то максимальний тиск на підземні комунікації становить $q_{\max}=(0,09\dots 0,17) E_{\text{гр}}$.

6. Обговорення результатів дослідження процесу керованого проколу ґрунту асиметричним конічним наконечника

Отримане уявлення про процеси проколу ґрунту надало можливість встановити розрахункові залежності для визначення складових сил опору ґрунту від просування наконечника у масиві – лобового опору (12) та поперечної сили (14). Як показали розрахунки лобового опору проколу ґрунту (рис. 2), процес відбувається з застосуванням дії на обладнання значних сил. Найбільший опір відбувається при проколюванні напівтвердого супіску, що в 3,6 рази більше, ніж в тугопластичній глині та фактично в 2 рази більш, ніж в напівтвердому суглинку. Також встановлено, що із збільшенням загострення конусу в межах 50° опір проколу ґрунту знижується в 2,2–2,5 рази.

Отримана аналітична залежність (14) для визначення відхиляючої сили дала можливість визначити (рис. 3), що при відхиленні конусу на величину з 0,02 м до 0,08 м при діаметрі свердловини 0,2 м, значення відхилюючої сили збільшується майже в три рази.

При визначенні величини відхилення робочого органу з асиметричним конічним наконечником (18) було враховано жорсткість конструкції робочого органу та властивості ґрунтового середовища у вигляді коефіцієнту постілі. З наведеного графіку (рис. 4) показано, що величина відхилення може відрізнятися більш, ніж в 4 рази в залежності від зміщення вершини конусу та типів ґрунту, що проколюється.

Визначення зони ущільнення ґрунту навколо асиметричного наконечника та руйнуючий вплив від напруженого стану ґрунту на прилеглі комунікації або інші підземні споруди, було встановлено з використанням закону збереження мас ґрунту до його ущільнення та після. Розрахункова залежність для визначення зони ущільнення для різних параметрів асиметричного конусу та ґрунтових умов описується формулою (23), а тиск напруженого ґрунту на прилеглі комунікації визначається формулою (27). Уявлення про їх значення має важливе значення для практичного використання статичного проколу ґрунту при прокладанні інженерних комунікацій по складній траєкторії.

Всі отримані залежності враховують параметри асиметричного конічного наконечника та нормативні дані про фізико-механічні властивості ґрунтів та мають аналітичний характер. Це є головною відзнакою від інших досліджень, які були присвячені процесу проколу ґрунту та мають емпіричний характер, що обмежує їх сферу використання [5, 8, 15, 16]. Запропоновані аналітичні залежності надають можливість провести всебічний якісний аналіз впливу головних факторів, які визначають особливості проколу ґрунту асиметричним конусом.

Про відповідність отриманих розрахункових значень реальним даним

свідчать практика застосування установок для статичного проколювання ґрунту та теоретичні і експериментальні дослідження інших авторів [5, 8, 15, 16, 21–23].

Отримані результати відносно існуючих машин і установок для безтраншейного прокладання дають можливість вдосконалення їх технологічних процесів та робочого обладнання. Надані рекомендації обмежуються умовами розробки талих ґрунтів, найбільш поширених його типах. Вони не стосуються умов прокладання комунікацій в мерзлих ґрунтах, в ґрунтах підвищеної твердості, високої вологості та в пісках. Їх розробка потребує додаткових засобів інтенсифікації робочих процесів, які вимагають відповідних подальших досліджень.

7. Висновки

1. Надане теоретичне обґрунтування та встановлені закономірності процесу проколу ґрунту полягли в основі створення залежностей для визначення складових сили опору ґрунту просуванню асиметричного конічного наконечника робочого органу. Отримані аналітичні залежності надали можливість визначити вплив на процес визначальних факторів, таких як конструктивні параметри робочого обладнання та фізико-механічні властивості ґрунтового середовища. Встановлено, що із збільшенням загострення конусу в межах 50° опір проколу ґрунту знижується в 2,2–2,5 рази. При відхиленні конусу на величину з 0,02 м до 0,08 м при діаметрі свердловини 0,2 м, значення відхиляючої сили збільшується майже в три рази. Найбільший опір та відхиляюча сила будуть при проколюванні твердого супіску, що в 3,6 рази більше, ніж в тугопластичній глині та фактично в 2 рази більший, ніж в напівтвердому суглинку.

2. Отримана розрахункова залежність для визначення відхиляючої сили дозволила визначити величину відхилення головки з асиметричним конічним наконечником. При цьому були враховані конструктивні особливості ґрунтопроколюючої головки та штовхаючої штанги, властивості матеріалу з якого вони зроблені та фізико-механічні властивості ґрунтів, що проколюються. Встановлено, що ефективне керування рухом головки в ґрунті можливе, якщо кут у вершині конусу наконечника буде меншим, ніж 50° . Це умова створення ядра ущільнення, яке за своєю формою наближається до симетричного конуса, на котрому врівноважуються сили в просторі, і які не можуть вплинути на процес відхилення наконечника.

3. Дано теоретичне обґрунтування процесу створення навколо асиметричного наконечника зони руйнування ґрунту та визначені її розміри. Встановлено, що з протилежного боку від зміщення конусу ця зона майже у 2 рази більша в порівнянні з типовим наконечником у вигляді симетричного конусу. В основу залежності для визначення закономірності зміни тиску ґрунту на відстані від бокової стінки отвору вздовж зони руйнування покладене лінійне рівняння. На цієї основі були отримані значення максимального тиску ґрунту на прилеглі комунікації, який визначається об'ємною деформацією кожного типу ґрунту, який досягає 0,06 МПа в тугопластичній глині та 0,09 МПа в твердому супіску.

Подяка

Колектив авторів висловлює щирю подяку співробітникам Харківського національного автомобільно-дорожнього університету та Рівненського Національного університету водного господарства та природокористування, які разом з авторами приймають участь у наукових дослідженнях по удосконаленню машин і установок для безтраншейного прокладання підземних комунікацій.

Література

1. Zwierzchowska, A., Kuliczowska, E. (2019). The selection of the optimum trenchless pipe laying technology with the use of fuzzy logic. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 84, 487–494. doi: <http://doi.org/10.1016/j.tust.2018.11.030>
2. Adams, E. (2007). Latest developments for the trenchless construction of pipelines. *Oil Gas-European Magazine*, 33, (2), 62–66.
3. Zhao, J., Ling, B. (2014). *Trenchless technology underground pipes*. Shanghai: Machinery Industry Press, 134.
4. Cohen, A., Ariaratnam, S. (2017). Developing a Successful Specification for Horizontal Directional Drilling Pipelines. *Planning and Design 2017*. Phoenix: 45. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784480878.050>
5. Ешуткин, Д. Н., Смирнов, Ю. М., Цой, В. М., Исаев, В. Л. (1990). *Высокопроизводительные гидропневматические ударные машины для прокладки инженерных коммуникаций*. Москва: Стройиздат, 176.
6. Кравець, С. В., Кованько, В. В., Лукянчук, О. П. (2015). Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв. *Рівне: НУВГП*, 322.
7. Kruse, G. (2009). The trenchless technique horizontal directional drilling. *Soil related risk and risk mitigation. 4th Pipeline Technology Conference*, 134–156.
8. Ромакин, Н. Е., Малкова, Н. В. (2007). Параметры рабочего инструмента для статического прокола грунта. *Строительные и дорожные машины*, 11, 31–33.
9. Kravets, S., Suponyev, V., Rieznikov, O., Kosiak, O., Nechydiuk, A., Klets, D., Chevychelova, O. (2018). Determination of the resistance of the cylindrical-tubular drill for trenchless laying of underground communications. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (93)), 64–70. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131838>
10. Tsung, N., Zheng, M., Najafi, M., Mehraban, S. (2016). 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*. Shanghai, 135. doi: <http://doi.org/10.1061/9780784479957.132>
11. Asperger, M., Jeremic, B. (2012). Examination of the Cavity Expansion Model: Predicting Hydrofracture During Horizontal Directional Drilling. *ECI 284: Theoretical Geomechanics. Term Project*, 256–267.
12. Raksha, S., Anofriev, P., Kuropiatnyk, O. (2019). Simulation modelling of the rolling stock axle test-bench. *E3S Web of Conferences*, 123, 01032. doi:

<http://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301032>

13. Perepechko, Y., Kireev, S., Sorokin, K., Imomnazarov, S. (2019). Use of Parallel Technologies for Numerical Simulations of Unsteady Soil Dynamics in Trenchless Borehole Drilling. *Parallel Computational Technologies*, 1063, 197–210. doi: http://doi.org/10.1007/978-3-030-28163-2_14

14. 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. *MATEC Web of Conferences*, 230, 01011. doi:10.1051/mateconf/201823001011

15. Земсков, В. М., Судаков, А. В. (2005). Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола. *Известия ТулГУ. Серия Подъемно-транспортные машины и оборудование*, 6, 35–38.

16. Гусев, И. В., Чубаров, Ф. Л. (2014). Применение управляемого прокола грунта при бестраншейной прокладке труб. *Потенциал современной науки*, 2, 30–33.

17. Lunys, O., Neduzha, L., Tatarinova, V. (2019). Stability research of the main-line locomotive movement. *Proc. of the 23rd Int. Sci. Conf. Transport Means 2019 pt III*. Palanga: Kaunas Univ. of Technology, 1341–1345.

18. Cherkashin, S. (2016). Installation of the Pipelines Made of Ductile Iron (DI) With the Usage Of Horizontal-directional Drilling Technique (HDD) For Water Supply Treatment Service and Sewerage Pipelines Construction and Reconstruction. *Procedia Engineering*, 165, 717–725. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.769>

19. Беляев, Н. М. (1962). *Сопротивление материалов*. Москва: Физматгиз, 608.

20. Гольдштейн, М. Н. (1979). *Механические свойства грунтов (напряжённно-деформированные и прочностные характеристики грунтов)*. Москва: Стройиздат, 304.

21. Хачатурян, С. Л. (2013). Фізичне моделювання та багатofакторний експеримент для визначення зусилля проколювання робочим органом активної дії. *Збірник наукових праць (галузево машинобудування, будівництво)*, 1 (36), 238–243.

22. Рогачёв, А. А. (2006). Формированте управленческого решения при определении режимов горных выработок на основании математического моделирования. *Известия ТулГУ. Серия «Экономика. Управление. Финансы»*, 3, 356–360.

23. Ромакин, Н. Е., Малкова, Н. В. (2006). Усилие внедрения и оптимальный угол заострения рабочего наконечника при статическом проколе грунта. *Строительные и дорожные машины*, 10, 35–39.