

УДК 624.132.3

**ВИЗНАЧЕННЯ РЕАКЦІЙ ҐРУНТУ І ВЕЛИЧИНИ ВІДХИЛЕННЯ ВІД ОСІ РУХУ ПРИ ЙОГО ПРОКОЛІ АСИМЕТРИЧНИМ НАКОНЕЧНИКОМ**

**С.В. Кравець, проф., д.т.н., Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, В.М. Супонев, доц., к.т.н., С.П. Балесний, асп., Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

*Анотація.* Під час проколу ґрунту часто виникає необхідність змінювати траєкторію руху. Запропоновано аналітичний спосіб визначення реакцій ґрунту і величини відхилення від прямолінійного руху робочого органа з асиметричним наконечником, який може бути використаний для керування траєкторією під час проколу.

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИЙ ГРУНТА И ВЕЛИЧИНЫ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ОСИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ЕГО ПРОКОЛЕ АСИММЕТРИЧНЫМ НАКОНЕЧНИКОМ**

**С.В. Кравец, проф., д.т.н., Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно, В.Н. Супонев, доц., к.т.н., С.П. Балесный, асп., Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

*Аннотация.* Во время прокола ґрунта часто возникает необходимость менять траекторию движения. Предлагается аналитический способ определения реакций ґрунта и величины отклонения от прямолинейного движения рабочего органа с асимметричным наконечником, который может быть использован для управления траекторией во время прокола.

*Ключевые слова:* математическая модель, бестраншейная технология, статический прокол ґрунта, инженерные коммуникации, прокалывающая головка, горизонтальная скважина, установка.

**DETERMINING SOIL REACTIONS AND THE VALUE OF DEVIATION FROM A LINEAR TRAJECTORY OF ASYMMETRICAL SOIL THRUST WORKING BODY**

**S. Kravets, DSc., Prof., National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, V. Suponey, PhD., Assoc. Prof., S. Balesniy, Postgraduate Student, Kharkiv National Automobile and Highway University**

*Abstract.* The construction of underground communications in urban conditions is very difficult due to the large number of existing communications. Thus, it is necessary to change the trajectory of the horizontal well during soil thrust boring. An analytical method for determining soil reactions and the deviation of the trajectory of an asymmetric soil thrust working body, which can be used to correct or control the trajectory during puncture, is suggested.

*Key words:* mathematical model, trenchless technologies, communication, horizontal well, soil thrust boring head, soil thrust boring plant.

**Вступ**

Безтраншейне прокладання інженерних комунікацій активно поширюється в усіх краї-

нах світу. Це пов'язано насамперед з розбудовою міст і необхідністю забезпечення житлових будівель і промислових споруд інженерними комунікаціями, які пов'язані з во-

допостачанням, газопостачанням, електропостачанням, забезпеченням телекомунікаційними системами та ін. Під час їх будівництва доведеться перетинати дороги, обходити підземні перешкоди у вигляді раніше прокладених мереж. Тому вдосконалення технологій будівництва та розробка спеціального робочого обладнання, які пов'язані з керуванням процесами, є актуальним завданням.

Серед існуючих технологій формування горизонтальних свердловин, які використовуються при розробці горизонтальних свердловин для подальшого прокладання в них інженерних комунікацій, є метод статичного проколу ґрунту. Головним недоліком цього методу є недостатня точність руху проколюючої головки у масиві. Для дотримання положення мережі своєї проектною осі необхідно постійно корегувати траєкторію руху проколюючої головки у ґрунті. Керування рухом робочого органа є можливим завдяки використанню скошеного наконечника головки, шляхом дії на нього поступального або поступально-обертального руху.

### Аналіз публікацій

Питання проколу ґрунту детально досліджені у роботах [1–5], а у таких працях як [6–8] запропоновані конструкції проколюючих наконечників, які в певних умовах забезпечують керування траєкторією руху. Однак у цих роботах розрахункові формули мають емпіричний характер та значні припущення, що призводить до суттєвого розходження з реальними значеннями, які виникають у конкретних ґрунтових умовах.

### Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є розробка аналітичного способу визначення реакцій ґрунту і величини відхилення від прямолінійної траєкторії руху асиметричного ґрунтопроколюючого наконечника.

### Аналітичний спосіб визначення величини відхилення ґрунтопроколюючого наконечника

Системний аналіз існуючих методів проколу ґрунту з можливістю корекції траєкторії руху проколюючої головки дозволив виявити основні принципи керування та конструктивні особливості робочого органа. На цій основі у

роботі запропоновано керування траєкторією проколу за рахунок сил опору ґрунту на лобову частину головки, яка має вигляд еліпса в перерізі циліндричного ствола площиною, нахиленою під кутом  $\beta$  до осі. Розрахункова схема дії сил опору ґрунту на наконечник проколюючої головки з нахиленою еліптичною площиною подана на рис. 1.

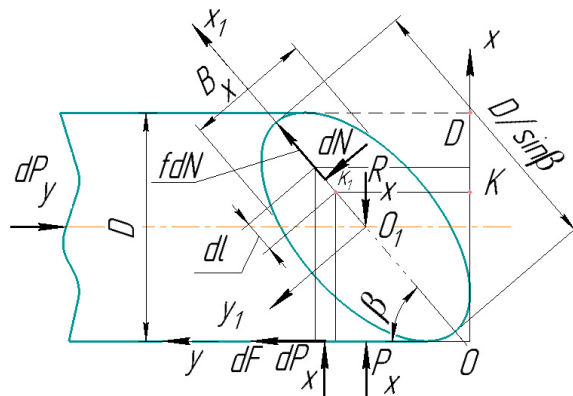


Рис. 1. Розрахункова схема наконечника з похилою площиною

Для розрахунку сили осьового зусилля опору ґрунту проколу необхідно встановити її залежність від площини зрізу циліндра, яка має форму еліпса, і від кута нахилу  $\beta$ . Для цього в напрямку осі  $OX_1$  зробимо переріз наконечника під кутом  $\beta$  до його осі та виділимо елементарну площину, довжина якої становить безкінечно мале значення  $dl$ . Значення її ширини  $B_x$  може бути визначене шляхом тригонометричних співвідношень до рівняння поперечного перерізу – еліпса

$$\begin{aligned}
 OK_1 - OO_1 &= \frac{x}{\sin \beta} - \frac{D}{2 \sin \beta} = \\
 &= \frac{1}{\sin \beta} \left( x - \frac{D}{2} \right) = x_1; \\
 B_x = 2y_1 &= 2 \sin \beta \sqrt{\left( \frac{D}{2 \sin \beta} \right)^2 - x_1^2} = \\
 &= 2 \sin \beta \sqrt{\frac{D^2}{4 \sin^2 \beta} - \frac{1}{\sin^2 \beta} \left( x - \frac{D}{2} \right)^2} = \\
 &= 2 \sqrt{(D-x)x},
 \end{aligned} \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр наконечника, м.

Для визначення осьової сили  $P_y$  залежно від кута нахилу  $\beta$  площини необхідно вирішити систему рівнянь балансу сил відносно координатних осей

$$\begin{cases} -dP_y + dN \sin\beta + fdN \cos\beta + fdP_x = 0 \\ dP_x - dN \cos\beta + fdN \sin\beta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Звідки

$$dP_x = dN \cos\beta - fdN \sin\beta, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} dP_y &= dN \sin\beta + fdN \cos\beta + \\ &+ fdN \cos\beta - f^2 dN \sin\beta, \end{aligned} \quad (4)$$

або

$$dP_y = \left[ (1 - f^2) + 2fctg\beta \right] qB_x dx, \quad (5)$$

$$P_y = 2 \int_0^D \left[ (1 - f^2) + 2fctg\beta \right] \sqrt{(D-x)x} q dx, \quad (6)$$

де  $f$  – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту;  $q$  – закон зміни тиску ґрунту на похилій площині.

Закономірність зміни тиску ґрунту на похилій площині визначимо на основі знання зміни площі поперечного перерізу ґрунту на цій площині. На основі закону рівності мас маємо

$$\frac{\pi D^2}{4} \rho_{пр} = B_x (D-x) \rho_x, \quad (7)$$

де  $\rho_{пр}$  – щільність ґрунту в природному стані;  $\rho_x$  – змінна щільність ґрунту на похилій площині.

Звідки

$$\rho_x = \frac{\pi D^2}{8 \sqrt{(D-x)x} (D-x)} \rho_{пр}. \quad (8)$$

Тоді

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{(1+\omega)\rho_{ТВ}}{C_k} \left( \frac{1}{\rho_{пр}} - \frac{1}{\rho_x} \right) = \frac{(1+\omega)\rho_{ТВ}}{C_k \rho_{пр}} \times \\ &\times \left[ 1 - \frac{8(D-x)\sqrt{(D-x)x}}{\pi D^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

і

$$\begin{aligned} P_y &= 2 \frac{(1+\omega)\rho_{ТВ}}{C_k \rho_{пр}} \left[ (1-f^2) + 2f \cdot ctg\beta \right] \times \\ &\times \int_0^D \left[ 1 - \frac{8(D-x)\sqrt{(D-x)x}}{\pi D^2} \right] \sqrt{(D-x)x} dx, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\omega$  – вологість ґрунту;  $\rho_{ТВ}$  – щільність твердої фази ґрунту (щільність ґрунту за умови, що в ньому відсутні пори);  $C_k$  – коефіцієнт компресії ґрунту.

Після інтегрування виразу (10) отримаємо

$$\begin{aligned} P_y &= 0,36 \frac{(1+\omega)\rho_{ТВ}}{C_k \rho_{пр}} \times \\ &\times \left[ (1-f^2) + 2f \cdot ctg\beta \right] D^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогічним чином отримаємо вираз для визначення  $P_x$ .

$$P_x = 0,36 \frac{(1+\omega)\rho_{ТВ}}{C_k \rho_{пр}} (ctg\beta - f) D^2, \quad (12)$$

$$\frac{P_y}{P_x} = \frac{(1-f^2) + 2fctg\beta}{ctg\beta - f}. \quad (13)$$

Залежності сил  $P_y$  і  $P_x$  для різних ґрунтів приведені на рис. 2.

З наведених графіків видно, як ці сили залежать від кута нахилу лобової поверхні головки, її діаметра та типу ґрунту.

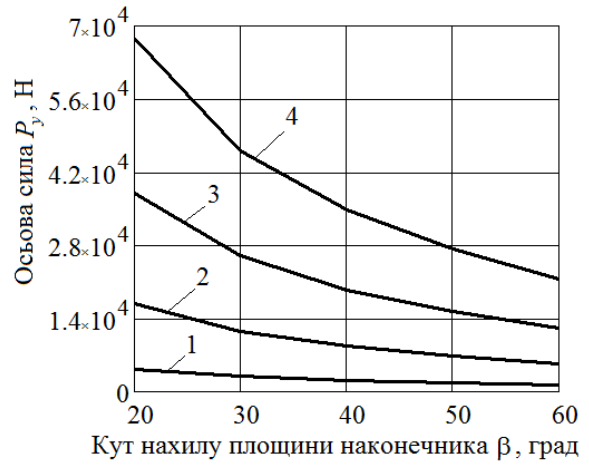
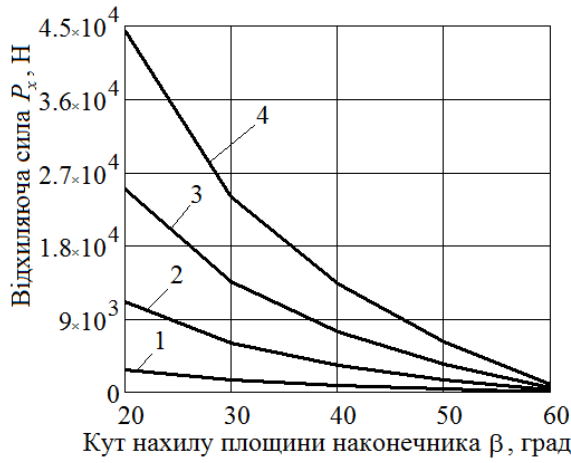
За визначених параметрів проколюючої головки можна отримати необхідні дані для розрахунку робочого обладнання для керованого проколу ґрунту.

Розглянемо умову руху ґрунту вгору по нижній еліптичній площині (рис. 1).

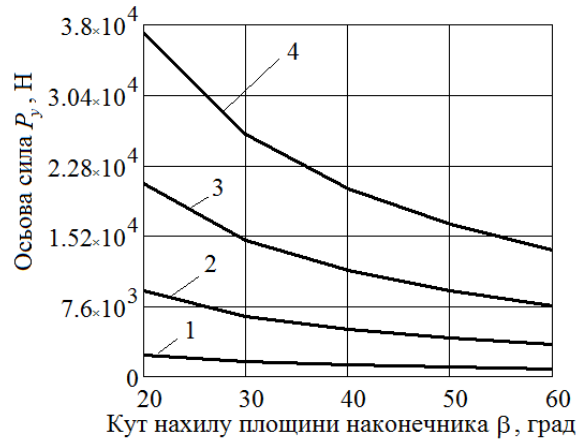
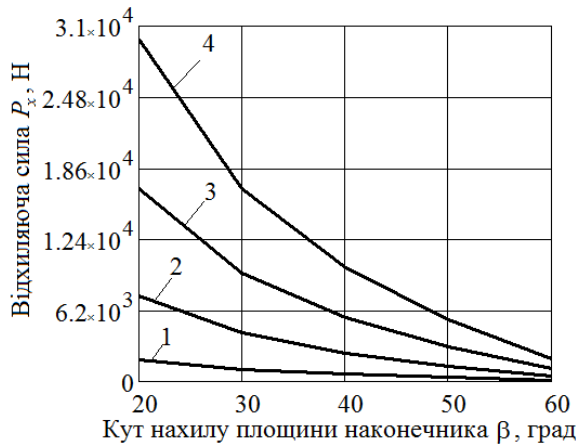
Активна сила  $R_y$  викликає реакцію зі сторони ґрунту  $R_y = P_y$ . Під дією цієї реакції ґрунт рухається вгору по нахиленій еліптичній площині. При цьому сумарна сила тертя ґрунту  $F_{тр}$ , яка спрямована у протилежний бік руху (реакції ґрунту  $R_y$ ), повинна бути більшою за силу тертя ґрунту та задовольняти

умову  $R_y \cos \beta \geq F_{тр}$ . Визначимо із цієї умови кут  $\beta$ .

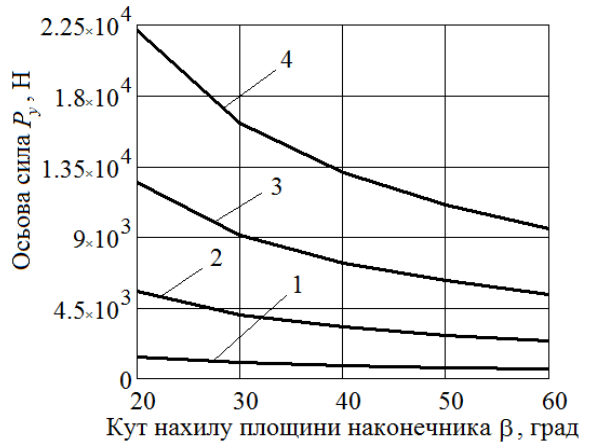
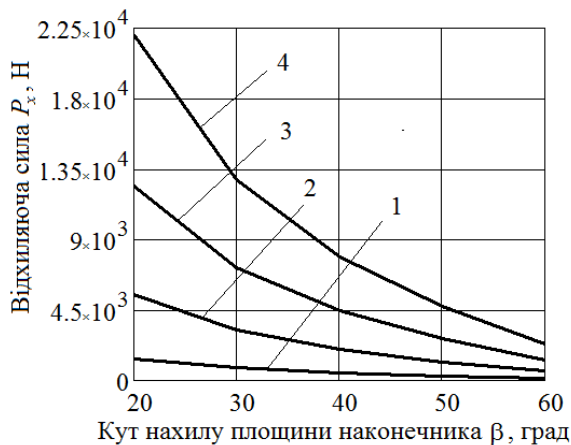
$$0,36E_{тр} \left[ (1 - f^2) + 2f \cdot \text{ctg} \beta \right] \times \times D^2 \cos \beta \geq F_{тр}. \quad (14)$$



а



б



в

Рис. 2. Залежності сил опору від кута нахилу для різних ґрунтів за значень діаметрів свердловини: а – супісок; б – суглинок; в – глина; 1 –  $D = 0,05$  м; 2 –  $D = 0,1$  м; 3 –  $D = 0,15$  м; 4 –  $D = 0,2$  м

$$F_{\text{тр}} = \frac{2f \cdot E_{\text{тр}}}{\sin \beta} \times \int_0^D \left[ 1 - \frac{8(D-x)\sqrt{(D-x)x}}{\pi D^2} \right] \times \sqrt{(D-x)x} dx = \frac{0,36f}{\sin \beta} E_{\text{тр}} D^2, \quad (15)$$

де  $E_{\text{тр}}$  – компресійний модуль деформації ґрунту,  $E_{\text{тр}} = \frac{(1 + \omega) \rho_{\text{ТВ}}}{C_{\text{к}} \rho_{\text{пр}}}$ .

Тоді

$$(1 - f^2 + 2f \text{ctg} \beta) \cos \beta \geq \frac{f}{\sin \beta}, \quad (16)$$

$$(1 - f^2) \sin \beta \sqrt{1 - \sin^2 \beta} + 2f(1 - \sin^2 \beta) \geq f. \quad (17)$$

Розв'язуючи нерівність (17), отримаємо умови сходження ґрунту зі скошеної поверхні, що забезпечує процес відхилення від прямолінійної траєкторії руху

$$\beta < \arcsin \sqrt{\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left( \frac{f}{1 + f^2} \right)^2}}. \quad (18)$$

Перед коренем необхідно поставити знак «+». У цьому випадку  $R_y$  буде набувати мінімального значення.

Залежність кута  $\beta$  від коефіцієнта тертя приведена на рис. 3.

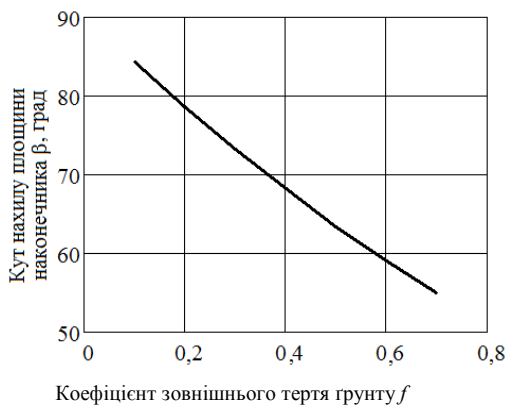


Рис. 3. Залежність кута нахилу площини наконечника від коефіцієнта зовнішнього тертя ґрунту

Визначимо чутливість (відхилення від траєкторії прямолінійного руху) наконечника від реакції ґрунту.

У процесі обертання асиметричного наконечника (свердлильної головки) навколо своєї осі й дії на нього осевого зусилля наконечник рухається по прямолінійній траєкторії. Чутливість наконечника на реакцію ґрунту  $R_x$  (рис. 1) вимірюється величиною його відхилення від траєкторії прямолінійного руху в процесі поступального руху. Для характеристики максимального відхилення необхідно знати рівняння згину осі наконечника, яке залежить від параметрів наконечника та фізико-механічних властивостей ґрунту. Наконечник із приводними штангами будемо розглядати як балку на пружній основі, на яку діє реакція ґрунту  $R_x = P_x$ . Розрахункова схема і рівняння для визначення прогину (відхилення) під силою  $R_x$  для такої задачі приведені в літературі [9].

$$\Delta_{\text{пр}} = \frac{R_x}{8E_{\text{зр}} I \cdot \beta_{\text{п}}^3}, \quad (19)$$

де  $E_{\text{зр}}$  – модуль пружності штанги на згин ( $E_{\text{зр}} = 2 \cdot 10^7$  Н/см<sup>2</sup>);  $I$  – момент інерції поперечного перерізу ствола головки

$$\beta_{\text{п}} = \sqrt[4]{\frac{k_{\text{п}}}{4E_{\text{зр}} I}}, \quad (20)$$

де  $k_{\text{п}}$  – коефіцієнт постілі (основи) (для ґрунтів середньої щільності  $k_{\text{п}} = 5 \div 50$  Н/см<sup>2</sup>). Для кільцевидного перерізу наконечника момент інерції дорівнює [10]

$$I = 0,05D^4 \frac{v^4 - 1}{v^4}, \quad (21)$$

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

Тоді, з урахуванням залежності (12), маємо

$$\Delta_{\text{пр}} = 0,9 \frac{E_{\text{тр}}}{E_{\text{зр}}} \cdot \frac{\text{ctg} \beta - f}{D^2 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_{\text{п}}^3}. \quad (22)$$

Після припинення обертального руху наконечника для навантаження його похилої площини силою  $R_x$  йому необхідно переміститися на відстань  $D \cdot \text{ctg} \beta$  (рис. 1). При цьому наконечник відхилиться від траєкторії прямолінійного руху на відстань  $\Delta_{\text{пр}}$ . Щоб наконечник відхилився від траєкторії прямолінійного руху на відстань  $S$ , йому необхідно пройти шлях без передачі крутного моменту (без обертання) довжиною  $L$ .

Тому

$$L = \frac{S \cdot E_{\text{зр}} D^3 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_{\text{п}}^3}{0,9 E_{\text{гр}} (1 - f \cdot \text{tg} \beta)} \quad (23)$$

або

$$\frac{L}{S} = \frac{E_{\text{зр}} D^3 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_{\text{п}}^3}{0,9 E_{\text{гр}} (1 - f \cdot \text{tg} \beta)} \quad (24)$$

Залежність відношення  $\frac{L}{S}$  від кута нахилу площини наконечника до горизонту  $\beta$  наведена на рис. 4.

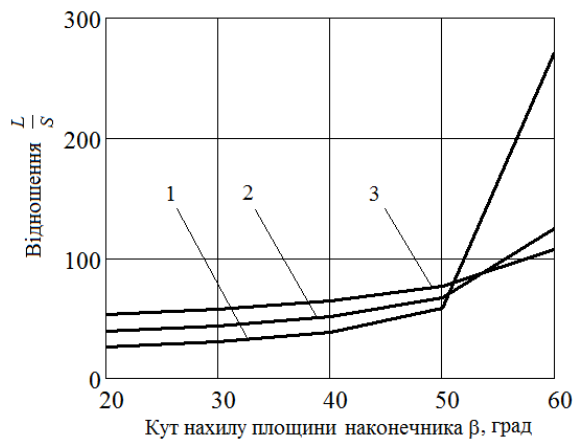


Рис. 4. Залежність відношення  $\frac{L}{S}$  від кута нахилу площадки наконечника до горизонту  $\beta$  за типом ґрунту: 1 – супісок; 2 – суглинок; 3 – глина

У розрахунку закладені такі вихідні дані: модуль пружності сталеві штанги  $E_{\text{зр}} = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 = 2 \cdot 10 \text{ Па}$ ; модулі деформації ґрунтів: супісок –  $E_{\text{гр}} = 1,39 \text{ МПа}$ ; су-

глинку –  $E_{\text{гр}} = 0,892 \text{ МПа}$ ; глини –  $E_{\text{гр}} = 0,631 \text{ МПа}$ ;  $D = 0,05; 0,10; 0,15; 0,2 \text{ м}$ ;  $v = 1,5$ ;  $I = 0,04 D^4$ .

$$\beta_{\text{п}} = \sqrt[4]{\frac{0,3 \text{ МПа}}{4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,04 D^4}} = \frac{0,055}{D}$$

Так, для супіску відношення  $\frac{L}{S}$  дорівнює:

$$\frac{L}{S} = \frac{21,3}{1 - 0,532 \text{tg} \beta} \quad (25)$$

Для суглинка

$$\frac{L}{S} = \frac{33,16}{1 - 0,424 \text{tg} \beta} \quad (26)$$

Для глини

$$\frac{L}{S} = \frac{46,88}{1 - 0,325 \text{tg} \beta} \quad (27)$$

З отриманого графіка видно, що зі зростанням значення кута нахилу площини наконечника відхилення траєкторії зменшується. Найбільшого відхилення від прямої траєкторії руху проколююча головка досягає за меншого кута нахилу площини, тобто у межах  $30^\circ$ – $40^\circ$  залежно від типу ґрунту. При куті нахилу більш ніж  $50^\circ$ – $60^\circ$  сходження ґрунту з площини припиняється, про що свідчать умови керування траєкторією руху головки (18), які відображені на графіку (рис. 3). При цьому на похилій поверхні виникає ядро ущільнення, яке за своєю формою наближається до симетричного конуса, на якому врівноважуються сили у просторі, які не можуть вплинути на процес відхилення наконечника.

Таким чином, залежно від фізико-механічних властивостей ґрунту та пружності штовхаючої штанги можна встановити раціональний кут нахилу площини зрізу проколюючої головки.

## Висновки

У роботі встановлені умови, за яких можливий процес керованого проколу ґрунту. Запропоновано конструкцію проколюючої го-

ловки зі скошеною лобовою площиною та встановлено для неї аналітичні залежності для розрахунку сил опору ґрунту при проколі залежно від кута похилу площадки та фізико-механічних властивостей ґрунту.

Також отримано аналітичну залежність розрахунку величини відхилення від прямолінійної траєкторії руху асиметричного накопичувача ґрунтопроколюючого робочого органу від пружних властивостей штовхаючої штанги та типу ґрунту.

Отримані результати можуть бути рекомендовані для розрахунку установок статичного проколу з керуванням або з корекцією траєкторії руху робочого органу у ґрунті.

### Література

1. Супонев В.Н. Бестраншейные технологии прокладки распределительных инженерных коммуникаций / В.Н. Супонев, Н.Д. Каслин, В.И. Олексин // Научный вестник строительства. – 2008. – №49. – С. 213–217.
2. Руднев В.К. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / С.В. Кравец, Н.Д. Каслин, В.К. Руднев, В.Н. Супонев. – Х.: Фавор, 2008. – 256 с.
3. Григорьев А.С. Обоснование выбора параметров продавливающих установок в зависимости от длины проходки / А.С. Григорьев // Сб. научных трудов ст-ов, магистров МГГУ. – 2004. – Вып. 4. – С. 133–136.
4. Ромакин Н.Е. Параметры рабочего инструмента для статического прокола ґрунта / Н.Е. Ромакин, Н.В. Малкова // Строительные и дорожные машины. – 2007. – № 11. – С. 31–33.
5. Земсков В.М. Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола / В.М. Земсков, А.В. Судаков // Известия ТулГУ. Сер. Подъемно-транспортные машины и оборудование. – 2005. – Вып. 6. – С. 35–38.
6. Гусев И.В. Применение управляемого прокола ґрунта при бестраншейной прокладке труб / И.В. Гусев, Ф.Л. Чубаров // Потенциал современной науки. – 2014. – №2. – С. 30–33.
7. Рогачёв А.А. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы исполнительного органа управляемой про-

кальвующей установки: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / А.А. Рогачев. – Тула, 2007. – 135 с.

8. Ленченко В.В. Выбор рациональных параметров снаряда при направленной прокладке скважины / В.В. Ленченко, Е.В. Меньшина, С.Е. Меньшин // Неделя горняка – 2001: доклад на симпозиуме. Семинар 20. – М.: МГУ, 2001.
9. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Физматгиз, 1962. – 608 с.
10. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Наукова думка, 1975. – 704 с.

### References

1. Suponev V.N., Kaslin N.D., Oleksin V.I. *Bestranshejnye tehnologii prokladki raspredelitel'nyh inzhenernyh kommunikacij* [Trenchless technologies for laying utility utilities]. *Naukovyi visnik budivnitsva*. - 2008. no. 49. pp. 213–217.
2. Kravets S.V., Kaslin N.D., Rudnev V.K., Suponev V.N. *Mashiny dlja bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij* [Machines for trenchless laying underground utilities]. Kharkov, Favor Publ., 2008. 256 p.
3. Grigor'ev A.S. *Obosnovanie vybora parametrov prodavlivajushhih ustanovok v zavisimosti ot dliny prohodki* [Justification of the choice of the parameters of the pushing machines in relation to the length of penetration]. *Sb. scientific works of universities, MSU masters*. 2004. vol. 4. pp. 133–136.
4. Romakin N.E., Malkov N.V. *Parametry rabocheho instrumenta dlja staticheskogo prokola grunta* [Parameters of the working tool for static penetration of the face] *Structural and road machines*. 2007. no. 11. pp. 31–33.
5. Zemskov V.M., Sudakov A.V. *Analiz issledovaniya lobovogo soprotivlenija pri bestranshejnoj prokladke truboprovodov metodom prokola* [Analysis of the study of drag for trenchless laying of pipelines by the puncture method]. *Izvestiya of the Tula State University. Ser. Hoisting-and-transport machines and equipment*. 2005. vol. 6. pp. 35–38.

6. Gusev I.V., Chubarov F.L. *Primenenie upravljajemogo prokola grunta pri bestranshejnoj prokladke trub* [Application of controlled puncture in trenchless pipe laying]. Potential of modern science. 2014. no. 2. pp. 30–33.
  7. Rogachjov A.A. *Obosnovanie konstruktivnyh parametrov i rezhimov raboty ispolnitel'nogo organa upravljajemoj prokalyvashhej ustanovki* [Substantiation of design parameters and operating modes of the executive body of the controlled piercing installation]: the author's abstract. dis. for scientific research. degree of Cand. those. Sciences: spec. 05.05.06 «Mining machines». Tula, 2007. 135 p.
  8. Lenchenko V.V., Menshina E.V., Men'shin S.E. *Vybor racional'nyh parametrov snarjada pri napravlennoj prokladke skvazhiny* [The choice of rational parameters of the projectile for directional well boring]. Report at the symposium «Miner's Week-2001». Seminar 20. Moscow, MSU Publ., 2001.
  9. Beljaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 608 p.
  10. Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniju materialov* [Reference book on the resistance of materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1975. 704 p.
- Рецензент: С.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
-