

УДК 624.132.3

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.172

УСТАНОВЛЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ВІДХИЛЕННЯ ГРУНТОПРОКОЛЮВАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНА З АСИМЕТРИЧНИМ НАКОНЕЧНИКОМ ПІД ЧАС КОРЕКЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ ЙОГО РУХУ

Супонєв В.М., Балесний С.П., Пімонов І.Г.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** У процесі статичного проколу ґрунту проколювальна головка може непередбачено змінювати напрямок руху. Для його корекції може бути використана головка з асиметричним наконечником. У роботі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень щодо визначення величини відхилення від закладеної траєкторії руху асиметричного ґрунтопроколювального робочого органа залежно від його геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей типових ґрунтів.*

***Ключові слова:** аналітична модель, безтраншейна технологія, статичне проколювання ґрунту, інженерні комунікації, проколювальна головка, горизонтальна свердловина.*

Вступ

Безтраншейне прокладання інженерних комунікацій активно поширюється в усіх країнах світу. Серед наявних методів формування свердловин для реалізації цієї технології найбільш популярним є метод проколювання ґрунту. Головним недоліком методу такого проколювання є недостатня точність руху проколювальної головки в масиві. Це вимагає постійного корегування траєкторії її руху. Управління рухом можливе шляхом використання головки з асиметричним наконечником та дії на неї поступального або поступально-обертального руху. Передача їхніх рухів від силової установки відбувається за допомогою набірних штовхальних штанг. Тому важливим є питання, щоб траєкторія руху була в межах допустимого прогину штанги. Якщо її згин вийде за ці межі, то може відбутися перелом штанги та процес проколювання буде втрачено.

Аналіз публікацій

Детальні дослідження питання процесу проколювання ґрунту наводяться в роботах [1–6], а в таких працях, як [7–9] запропоновані конструкції проколювальних наконечників, що за певних умов 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.

У роботах [10] наводиться аналітична модель визначення сил опору ґрунту проколю-

ванню головкою з асиметричним наконечником, а також визначається відхилювальна сила, яка водночас діє на неї. У дослідженнях [11] запропоновано модель керування процесом. Але недостатня доказова база в роботах [10] та [11] вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень щодо визначення виявлених теоретичних особливостей процесів керованого проколювання ґрунту.

Мета і постановка завдання

Метою цієї роботи є дослідження особливостей процесів керованого проколювання ґрунту ґрунтопроколювальним робочим органом з асиметричним наконечником. Завданням є встановлення величини відхилення робочого органа в різних ґрунтових умовах геометричного розміру асиметричного наконечника, яка представлена у вигляді похилої площини, що отримана від зрізаного під кутом циліндра.

Установлення величини відхилення ґрунтопроколювального робочого органа з асиметричним наконечником

Завдяки проведеним авторами дослідженням [10] було отримано рівняння для визначення прогину (відхилення) під дією відхилювальної сили R_x :

$$\Delta_{np} = \frac{R_x}{8E_{зг} I \beta_n^3}, \quad (1)$$

де $E_{зг}$ – модуль пружності штанги за умови згину ($E_{зг} = 2 \cdot 10^7$ Н/см²) [12]; I – момент інерції поперечного перерізу наконечника;

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{k_n}{4E_{32}I}}, \quad (2)$$

де k_n – коефіцієнт постелі (основи) для ґрунтів середньої щільності $k_n=5\dots 50$ Н/см².

Для кільцеподібного перерізу наконечника момент інерції дорівнює [8]:

$$I = 0,05D^4 \frac{v^4 - 1}{v^4}, \quad (3)$$

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

Тоді з урахуванням залежності (3) маємо

$$\Delta_{np} = 0,9 \frac{E_{ep}}{E_{32}} \times \frac{ctg\beta - f}{D^2 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_n^3}. \quad (4)$$

Щоб відхилитися наконечнику від траєкторії прямолінійного руху на відстань S , йому необхідно пройти шлях без передачі крутного моменту (без обертання) завдовжки L .

Тому

$$L = \frac{SE_{32}D^3 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_n^3}{0,9E_{ep}(1 - f \cdot tg\beta)}, \quad (5)$$

або

$$\frac{L}{S} = \frac{E_{32}D^3 \frac{v^4 - 1}{v^4} \beta_n^3}{0,9E_{ep}(1 - f \cdot tg\beta)}. \quad (6)$$

Залежність відношення L/S від кута нахилу площадки наконечника до горизонту β наведена на рис. 1.

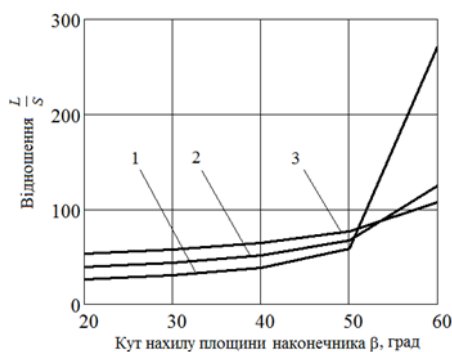


Рис. 1. Залежність відношення від кута нахилу площадки наконечника до горизонту β для різних ґрунтів: 1 – супісок; 2 – суглинок; 3 – глина

У розрахунку закладені такі вихідні дані [12]. Модуль пружності сталеві штанги $E_{ст} = 2 \cdot 10^7$ Н/см² = 2·10 Па; модулі деформації ґрунтів: супіску – $E_{гр} = 1,39$ МПа; суглинка – $E_{гр} = 0,892$ МПа; глини – $E_{гр} = 0,631$ МПа; $D = 0,05; 0,10; 0,15; 0,2$ м; $v = 1,5$; $I = 0,04 D^4$

$$\beta_n = \sqrt[4]{\frac{0,3Mna}{4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,04D^4}} = \frac{0,055}{D}.$$

З отриманого графіка видно, що із зростанням значення кута нахилу площини наконечника відхилення траєкторії зменшується. Найбільшого відхилення від прямої траєкторії руху проколювальна головка досягає за умови меншого кута нахилу площини, тобто в межах 30°–40° залежно від типу ґрунту. Якщо кут нахилу більший ніж 50°–60°, сходження ґрунту з площини припиняється, про що свідчать умови управління траєкторією руху головки (1), які відображені на графіку (рис. 1). До того ж на похилій поверхні виникає ядро ущільнення, яке за своєю формою наближається до симетричного конуса, на якому зрівноважуються сили в просторі, і які не можуть вплинути на процес відхилення наконечника.

Реалізація процесу проколювання ґрунту з керуванням руху головки з асиметричним наконечником зображено на рис. 2.



Рис. 2. Процес проколювання ґрунту експериментальною установкою з можливістю керування траєкторією руху головки в підземному просторі

Для дослідження процесів проколювання ґрунту було розроблено експериментальну модель універсальної ґрунтопроколювальної головки з можливістю заміни наконечників та контролю його рухом, схематичний склад якої наведено на рис. 3.

Зовнішній та внутрішній діаметри циліндричної частини відповідають розмірам стандартної сталеві труби, з якої вона була

зроблена, і дорівнюють 65 мм та 48 мм відповідно. Її довжина, згідно з розрахунковими даними, була прийнята 500 мм. Також у циліндричній частині передбачено відсік для розміщення датчика звукових коливань навігаційної системи. По периметру циліндра нарізані поздовжні щілини для випромінювання коливань на зовні.

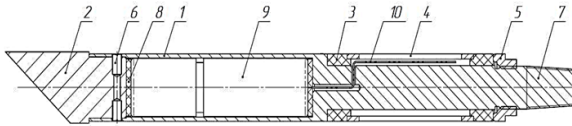


Рис. 3. Експериментальна модель ґрунтопроколювальної головки зі змінним наконечником та датчиком для контролю її положення в ґрунті: 1 – корпус головки; 2 – змінний наконечник; 3 – ізолятори; 4 – щілини випромінювача; 5 – гайка; 6 – штифт; 7 – хвостовик із різьбою для з'єднання зі штангою; 8 – прокладка; 9 – датчик сигналу; 10 – антена

Для контролю відхилення траєкторії проколювання від прямолінійної осі проектної траси під час проколювання та для визначення положення головки в ґрунті був застосований пошуковий прилад «СПРУТ-5М» і генератор частоти «ГІ СПРУТ-5М».

Результати експериментальних даних щодо заміру величини відхилення траєкторії руху проколювальної головки від проектної осі зі скошеним наконечником осі траси на дистанції 10 м та їхнє зіставлення з теоретичними розрахунками наведено в табл. 1.

Аналіз наведених даних експериментальних досліджень підтверджують результати теоретичних розрахунків щодо визначення величини відхилення головки в ґрунті від довжини ділянки проколювання.

Найбільше відхилення виникає за умови кута 25° , а найменше – якщо кут 55° і є майже втричі меншим у важкій глині, та в 1,4 раза в суглинку та глині. Також потрібно зазначити, що максимальне відхилення головки від траєкторії збільшується у важкій глині. Гірший процес керування відбувається у твердому супіску. Відхилення головки на 10 м у цих умовах відбулося, коли кут скосу головки 25° , майже вдвічі. Для порівняння, у суглинку відхилення відбулося меншим у 1,5 раза.

Процес визначення відхилення головки з асиметричним наконечником наводиться на фотографії головки на виході з ґрунту в приймальному котловані (див. рис. 3). Відхилення від початкового напрямку траєкторії проколювання наочно показано щодо вертикальної лінії, яка вказує на неї.

Похибка між експериментальними та розрахунковими даними лежить у межах 15 % для кутів 25 – 55 , яка визначається похибкою пошукового приладу «СПРУТ-5М» на глибині до 3 м і становить 1 см, що був використаний для визначення положення робочого органа в ґрунтового просторі.

Максимальне відхилення проколювальної головки досягається за умови кута скосу наконечника 25° у суглинку і досягає 44 см, що збігається з практичним уявленням процесу. Якщо кут нахилу більший ніж 60° – 70° , сходження ґрунту з площини припиняється, про що свідчать умови управління траєкторією руху головки, які було наведено раніше. До того ж на похилій поверхні виникає ядро ущільнення, що за своєю формою наближається до симетричного конуса, на якому врівноважуються сили в просторі, і які не можуть вплинути на процес відхилення наконечника.

Таблиця 1 – Максимальне відхилення проколювальної головки від типу ґрунту та кута скосу наконечника на дистанції 10 м

Кут нахилу	Відхилення штанги, см								
	Супісок			Суглинок			Глина		
	експ.	розн.	%	експ.	розн.	%	експ.	розн.	%
25°	41,0 $\pm 5,0$	35,3	11, 7	27,0 $\pm 4,0$	39,3	10,6	19,6 $\pm 3,0$	18,1	9,5
40°	28,5 $\pm 4,0$	26,0	10, 3	21,3 $\pm 3,0$	24,8	11,4	17,2 $\pm 2,5$	15,5	11,4
55°	12,5 $\pm 2,0$	11,2	10, 4	13,0 $\pm 3,0$	18,1	11,3	13,0 $\pm 2,0$	11,4	12,3
70°		-	-	-	-		2,8 $\pm 0,5$	2,3	24



Рис. 3. Заміри відхилення руху головки з асиметричним наконечником на виході в приймальному котловані

Висновки

Проведеними дослідженнями встановлені закономірності процесу проколювання ґрунту асиметричним наконечником у формі похилої площини. Установлено, що найбільше відхилення головки від дії поперечної складової сили опору ґрунту, яка виникає в разі занурення робочого органу в ґрунт, якщо кут 25° ; а найменше – якщо кут 55° і є майже втричі меншим у важкій глині, та в 1,4 раза в суглинку та глині.

Експериментально підтверджено, що максимальне відхилення головки зі скошеним наконечником досягається за умови менших кутів нахилу лобової поверхні, а найменша величина відбувається в глині. Так, у разі дистанції проколювання 10 м для кута 25° у супіску головка відхиляється на 40 мм, а в глині на 20 мм. У той самий час, якщо кут становить 55° , відхилення головки в цих же умовах становить 14 мм та 13 мм відповідно. Якщо кут 70° , вплив скосу лобової поверхні наконечника на процес втрачається.

Література

1. Супонев В.Н., Каслин Н.Д., Олексин В.И. Бестраншейные технологии прокладки распределительных инженерных коммуникаций. Научный вестник строительства. 2008. № 499. С. 213–217.
2. Руднев В.К., Кравец С.В., Каслин Н.Д., Супонев В.Н. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций / под ред. В.К. Руднева. Харьков: Фавор, 2008. 256 с.
3. Григорьев А.С. Обоснование выбора параметров продавливающих установок в зависимости от длины проходки. Сб. научных трудов ст-ов, магистров МГГУ, Москва, 2004. Вып. 4. С. 133–136.
4. Ромакин Н.Е., Малкова Н.В. Параметры рабочего инструмента для статического прокола

грута. Строительные и дорожные машины. 2007. № 11. С. 31–33.

5. Земсков В.М., Судаков А.В. Анализ исследования лобового сопротивления при бестраншейной прокладке трубопроводов методом прокола. Известия ТулГУ. Серия «Подъемно-транспортные машины и оборудование». Тула: ТулГУ, 2005. Вып. 6. С. 35–38.
6. Гусев И.В., Чубаров Ф.Л. Применение управляемого прокола ґрунта при бестраншейной прокладке труб. Потенциал современной науки. 2014. № 2. С. 30–33.
7. Кравец С.П., Супонев В.М., Балесний С.П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху при його проколі асиметричним наконечником. Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. 2017. Вып. 41. С. 155–163.
8. Рогачёв А.А. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы исполнительного органа управляемой прокалывающей установки: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. тех. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины». Тула, 2007. 135 с.
9. Ленченко В.В., Меньшина Е.В., Меньшин С.Е. Выбор рациональных параметров снаряда при направленной прокладке скважины. Доклад на симпозиуме «Неделя горняка – 2001» (29 янв.–2 фев.). Семинар 20. Москва: МГУ.
10. Супонев В.М., Балесний С.П. Рівняння траєкторії корекції руху головки в ґрунті та його експериментальна перевірка. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин: сб. наук. пр. Придніпровської академії будівництва і архітектури. Серія: «Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні машини і обладнання». 2019. № 107. С. 94–102. (Directory of Research Journals Indexing, Research Bib).
11. Супонев В.М. Керування процесом корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту. Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. 2018. № 43. С. 125–131.
12. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. Москва: Физматгиз, 1962.

References

1. Suponev V.N., Kaslin N.D., Oleksin V.I. Bestranshejnye tekhnologii prokladki raspredelitel'nyh inzhenernyh kommunikacij. Naukovij visnik budivnictva. 2008. № 499. S. 213–217.
2. Rudnev V.K., Kravec S.V., Kaslin N.D., Suponev V.N. Mashiny dlya bestranshej-noj prokladki podzemnyh kommunikacij /pod red. V.K. Rudneva. Har'kov: Favor, 2008. 256 s.
3. Grigor'ev A.S. Obosnovanie vybora parametrov prodavlivayushchih ustanovok v zavisimosti ot dliny prohodki. Sb. nauchnyh trudov st-ov,

- magistrov MGGU, Moskva, 2004. Vyp. 4. С. 133–136.
4. Romakin N.E., Malkova N.V. Parametry rabocheho instrumenta dlya staticheskogo prokola gruta. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2007. № 11. S. 31–33.
 5. Zemskov V.M., Sudakov A.V. Analiz issledovaniya lobovogo soprotivleniya pri bestransheynoy prokladke truboprovodov metodom prokola. Izvestiya TulGU. Seriya Pod'emno-transportnye mashiny i oborudovanie. Tula: TulGU, 2005. Vyp. 6. S. 35–38.
 6. Gusev I.V., Chubarov F.L. Primenenie upravlyаемого prokola grunta pri bestransheynoy prokladke trub. Potencial sovremennoy nauki. 2014. № 2. S. 30–33.
 7. Kravec' S.P., Suponev V.M., Balesnij S.P. Vstanovleniya reakcij rruntu i velichini vidhileniya vid os'ovogo ruhu pri jogo prokoli asimetricnim nakonechnikom. Avtomobil'nyj transport: sb. nauch. tr. 2017. Vyp. 41. S. 155–163.
 8. Rogachyov A.A. Obosnovanie konstruktivnyh parametrov i rezhimov raboty ispolnitel'nogo organa upravlyаемой prokalyvayushchej ustanovki: avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tekhn. nauk: spec. 05.05.06 «Gornye mashiny». Tula, 2007. 135 s.
 9. Lenchenko V.V., Men'shina E.V., Men'shin S.E. Vybory racional'nyh parametrov snaryada pri napravlennoy prokladke skvazhiny. Doklad na simpoziume «Nedelya gornyaka – 2001» (29 yanv. - 2 fev.). Seminar 20. Moskva: MGU.
 10. Suponev V.M., Balesnij S.P. Rivnyannya traektorii korektsii ruhu golovki v rrunti ta jogo eksperimental'na perevirka. Budivnictvo. Materialoznavstvo. Mashinobuduvannya. Intensifikaciya robochih procesiv budivel'nih ta dorozhnih mashin: sb. nauk. pr. Pridniprov's'koї akademii budivnictva i arhitekturi. Seriya: "Pidjomno-transportni, budivel'ni, dorozhni mashini i obladnannya". 2019. № 107. S. 94–102. (Directory of Research Journals Indexing, Research Bib).
 11. Suponev V.M. Keruvannya procesom korektsii traektorii ruhu robochogo organu pri statichnomu prokoli rruntu. Avtomobil'nyj transport: sb. nauch. tr. 2018. № 43. S. 125–131.
 12. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov. Moskva: Fizmatgiz, 1962.

Супонев Володимир Миколайович, доктор технічних наук, доцент, +38050-30-199-58
 E-mail: v-suponev@ukr.net,
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>
https://www.researchgate.net/profile/Vladimir_Suponev,
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Балесний Сергій Петрович, аспірант,
 +38099-13-984-32,
 E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет.
Пімонов Ігор Георгійович, кандидат технічних наук, доцент, +38050-21-70-524,
 E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
 Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Establishing the value of the deflection of the soil-piercing working body with an asymmetric tip when correcting the airway of movement

Abstract. *Trenchless laying of engineering communications is actively used in all countries of the world. Among the existing methods of formation of wells for the implementation of these technologies, the most popular is the method of ground penetration. The main disadvantage of this method is the poor accuracy of movement of the piercing head in the array. This requires constant adjustments to the trajectory of its movement. This process can be controlled by using a head with an asymmetrical tip and acting on it with translational and rotational motion. The transmission of these movements from the power unit by means of type-setting push rods. Therefore, it is important to choose a trajectory such that the deflection of the bar will be within the permissible stress range. If the bend goes beyond these limits, the rod may break and the puncture process will be interrupted. The conducted studies have established the regularities of the process of puncturing the soil with a head with an asymmetric tip in the form of an inclined flat surface. It has been established that the greatest deviation of the head from the action of the transverse component of the soil resistance force, which occurs when moving such a working body in the soil, will occur at an angle of inclination of the front surface of 25°, and the smallest deviation will occur at an angle of 55°. In addition, it was found that in heavy clay, deflection will occur almost 3 times worse than in a soup and 1.4 times worse than in a loam. It has been experimentally confirmed that at a distance of 10 m the puncture with a head with an inclined forehead surface in sandy loam was 40 mm, and in clay 20 mm. At an angle of inclination of 70°, a constant core of soil compaction is formed and the process of controlling the movement of the head stops.*

Key words: *analytical model, strandless technologists, static soil puncture, utilities, piercing head, horizontal hollow.*

Vladimir Suponyev, PhD, Associate Professor, +38050-30-199-58, E-mail: v-suponev@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>
https://www.researchgate.net/profile/Vladimir_Suponev, Kharkiv National Automobile and Highway University.

Sergiy Balesniy, +38099-13-984-32,
E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
Kharkiv National Automobile and Highway
University.

Igor Pimonov, PhD, Associate Professor,
+38050-21-70-524,
E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
Kharkiv National Automobile and Highway
University.

**Установление величины отклонения
грунтопрокалывающего рабочего органа с
асимметрическим наконечником при
коррекции траектории движения**

Аннотация. Бестраншейная прокладка инженерных коммуникаций активно применяется во всех странах мира. Среди существующих методов формирования скважин для реализации этих технологий наиболее популярным является метод прокола грунта. Главным недостатком этого метода является плохая точность движения прокалывающей головки в массиве. Это требует проводить постоянную корректировку траектории её движения. Управление этим процессом возможно путём применения головки с асимметричным наконечником и воздействия на неё поступательного и вращательного движения. Передача этих движений от силового агрегата посредством наборных толкающих штанг. Поэтому важным является задача выбора такой траектории движения, при которой прогин штанги будет в пределах допустимых напряжений. Если изгиб выйдет за эти пределы, то может произойти поломка штанги и процесс прокола будет прерван. Проведенными исследованиями установлены закономерности процесса прокола грунта головкой с асимметричным наконечником в форме наклонной плоской поверхности. Установлено наибольшее отклонение головки от действия

поперечной составляющей силы сопротивления грунта, которая возникает при перемещении такого рабочего органа в грунте будет происходить при угле наклона лобовой поверхности 25° , а наименьшее отклонение будет происходить при угле 55° . Кроме того установлено, что в тяжёлой глине отклонение будет происходить почти в 3 раза хуже, чем в супеске и в 1,4 раза хуже, чем суглинке. Экспериментально подтверждено, что при дистанции прокола 10 м головкой со наклонной лобовой поверхностью в супеске составило 40 мм, а в глине 20 мм. При угле наклона 70° образуется постоянноё ядро уплотнения грунта и процесс управления движения головкой прекращается.

Ключевые слова: аналитическая модель, бестраншейные технологии, статический прокол грунта, инженерные коммуникации, прокалывающая головка, горизонтальная скважина.

¹**Супонев Владимир Николаевич**,
доктор технических наук, доцент,
+38050-30-199-58, E-mail: v-suponev@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>,
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет,
https://www.researchgate.net/profile/Vladimir_Suponev.

²**Балесный Сергей Петрович**, аспирант,
+38099-13-984-32, E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет.

³**Пимонов Игорь Георгиевич**, кандидат техниче-
ских наук, доцент, +38050-21-70-524,
E-mail: kaf_bdm@ukr.net,
Харьковский национальный автомобильно-
дорожный университет.