

КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КОРЕКЦІЇ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ РОБОЧОГО ОРГАНУ ПРИ СТАТИЧНОМУ ПРОКОЛІ ҐРУНТУ

Супонев В. М.¹,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Під час горизонтального проколу ґрунту установками статичної дії виникає необхідність корегувати траєкторію руху робочого органу з конусним наконечником. В роботі розкривається можливість керування траєкторією руху за допомогою робочого органу з адаптованим наконечником та визначаються умови корекції траєкторії його руху.

Ключові слова: безтраншейні технології, статичний прокол ґрунту, інженерні комунікації, проколююча головка, корекція траєкторії руху.

Вступ

Серед існуючих технологій формування горизонтальних свердловин, які використовуються при безтраншейному прокладанні інженерних комунікацій, є метод статичного проколу ґрунту. Головним недоліком цього методу є недостатня точність руху проколюючої головки у масиві. Для дотримання горизонтальної свердловини своєї проектної осі необхідно постійно корегувати траєкторію руху проколюючої головки у ґрунті.

Одним з технічних рішень проблеми керування проколом є використання установок з робочим органом з адаптованим наконечником: з конічною формою для прямолінійного руху та асиметричною для його відхилення у просторі. Його впровадження в будівництві дозволить в разі збільшити довжину підземних прольотів проколу, що значно покращить ефективність безтраншейного прокладання підземних комунікацій.

Аналіз публікацій

Відомо, що для зміни напрямку руху у процесі роботи машини горизонтально-спрямованого буріння (ГСБ) під час формування лідерної свердловини із криволінійною траєкторією використовується бурова головка з асиметричною лобовою поверхнею [1, 2].

При статичному задавлюванні цієї головки у ґрунт виникає поперечна сила від реакції ґрунту, яка змінює траєкторію її руху в бік зміщення лобової поверхні. Вивченню цього процесу присвячено цілий ряд робіт [3–6].

Вплив криволінійної траєкторії свердловини на просування крізь неї трубопроводів наведено в роботах [7–10].

Мета і постановка завдання

Метою роботи є обґрунтування можливості корекції траєкторії руху робочого органу при статичному проколі ґрунту за допомогою оперативної зміни форми його лобової поверхні з конусної на асиметричну шляхом поступального та поступально-обертального руху навколо своєї осі.

Відповідно до поставленої мети слід визначитися з технологічною можливістю утворення свердловини у ґрунті для безтраншейного прокладання підземних комунікацій з керування процесу корекції траєкторії руху робочого органу у ґрунті та визначити умови її максимального відхилення.

Керування процесом статичного проколу ґрунту

Встановлено, якщо форму наконечника проколюючої головки буде можливим оперативно змінювати та обертати, то отримується можливість керування траєкторією її руху у ґрунті (рис. 1). Реалізація цієї ідеї підтверджується технічними рішеннями [11, 12]. Оскільки призначенням малогабаритних установок для статичного проколу ґрунту є утворення свердловини з максимальним наближенням її траєкторії до прямої лінії, то, завдяки корекції руху ґрунтопроколюючої головки, вирішується питання збільшення довжини підземних прольотів проколу в декілька разів, а саме з 15–20 м гарантованої точності до 50–100 м. З цієї дистанції починається ефективне використання більш складних та дорогих машин ГСБ. Таким чином питання щодо збільшення дистанції проколу ґрунту установками статичної дії за рахунок корекції руху ґрунтопроколюючої установки у ґрунті є актуальною задачею наукового та практичного значення.

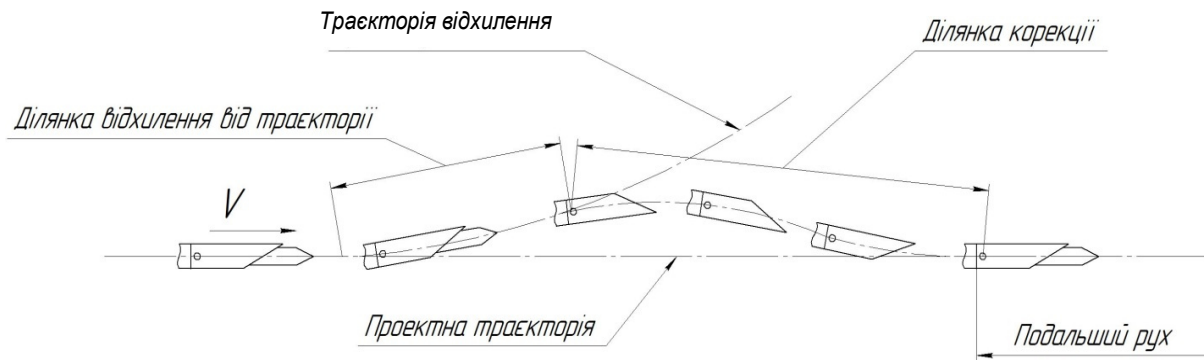


Рис. 1. Принцип корекції траєкторії руху проколюючої головки

Якою повинна бути траєкторія у разі корекції руху проколюючої головки? Для відповіді на це питання розглянемо усі фактори, які впливають на цей процес, згідно з наведеною схемою, відображеною на рис. 1. Перш за все, треба мати можливість встановити критичне відхилення робочого органу від початкової траєкторії, за якого подальший рух стає неможливим з причини критичного згину труби або штовхаючої штанги, коли її деформування може набути стан пластичної деформації. По-друге, відомо, що поперечна сила, яка відхиляє рух головки у ґрунті, залежить від кута нахилу зрізу асиметричного наконечника. Це визначає загальне відхилення руху від початкової осі та довжину ділянки корекції проколу. По-третє, на відхилення руху впливає щільність ґрунту, яка визначається його фізико-механічними властивостями. По-четверте, при визначенні траєкторії руху слід враховувати жорсткість штанги, пружність якої визначається властивостями матеріалу штанг та формою її поперечного перерізу.

Для вирішення першого питання існують сучасні навігаційні технології, які дозволяють визначити координати місця знаходження головки у ґрунті з достатньо високою точністю. У процесі керування бурінням свердловини машинами ГСБ використовують електромагнітні, лазерні та кабельні методи локації таких відомих виробників, як DigI Trax, Spot-d-Nek, Pipe Hawk GPR та інші [2]. Але це достатньо складні та дорогі пристрої. Для корегування руху проколюючої головки на відносно невеликих глибинах можна використовувати вітчизняний пошуковий прилад СПРУТ-5 Дніпровської фірми «КРОМ», який має достатньо високу точність визначення її місцезнаходження, яка становить до 2 см на глибині до 3 м. Поперечне відхилення на першому етапі визначається вимогами

до точності проколу. Допускається відхилення від проектної точки виходу проколюючої головки у прийомному котловані по горизонту у межах ± 40 см, а по вертикалі ± 20 см. Якщо відхилення сталося у процесі проколу, а відстань до прийомного котловану ще є достатньо великою, то можна провести корекцію проколу.

Розрахунок траєкторії руху робочого органу з адаптованим наконечником у процесі створення свердловини

Для встановлення умови ефективного керування траєкторією руху проколюючої головки розглянемо технологічну схему її просування у ґрунті (рис. 2), з якої видно, що процес корекції руху проколюючої головки відбувається не одночасно, а поетапно. На першому етапі форма наконечника змінюється з конуса на асиметричну лобову поверхню, орієнтовану в бік початкової прямолінійної траєкторії руху. При цьому відхилення від проектної осі буде відбуватися з початкової точки B до максимального відхилення від траєкторії у точці C . Це слід враховувати при встановленні точки критичного відхилення $H_{\text{від}}$. Після того, як робочий орган досягне точки D , подальший рух головки потребує зміни положення скошеної головки на 180° , аж доки траєкторія руху головки не досягне проектного напрямку у точці E . Далі наконечник головки повинен змінити форму асиметричної лобової поверхні на конусний наконечник та пересуватися далі у прямому русі. Якщо відхилення знов досягне свого критичного значення, процес корекції треба повторити знову.

З наведеного виникають питання: яким може бути критичне відхилення від проектної траєкторії, яке максимальне відхилення лінії може виникнути та на якій відстані може відбутися корекція траєкторії руху?

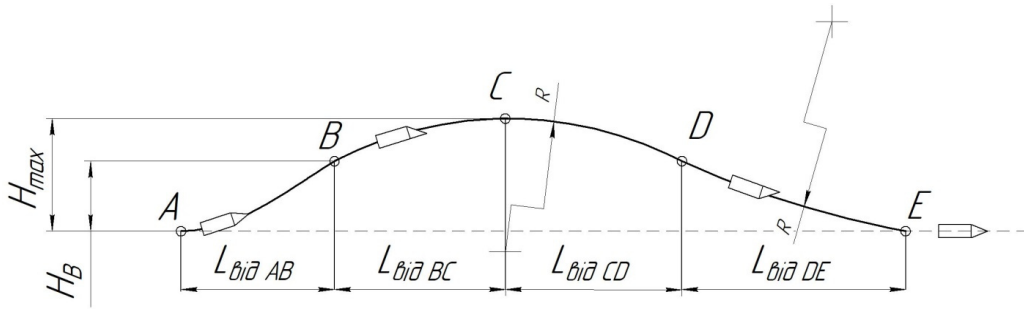


Рис. 2. Схема для розрахунку траєкторії проколу ґрунту

Для відповіді на ці питання приймаємо, що траєкторія проколу повинна відповідати лінії допустимого прогину труби, з якої виготовляють захисні футляри або штовхаючі штанги.

Задача має складний характер, тому для її вирішення пропонується прийняти умову, що штангу зроблено з цільної труби, а її внутрішній та зовнішній згини є рівними між собою, й описуються радіусами кривизни R (рис. 3), а точка торкання двох кіл D знаходиться на відстані від початкової осі, що дорівнює половині дозволеної величини відхилення штанг $H_{тр}$ у точці C . Місце торкання з віссю припускаємо у вигляді точки контакту E .

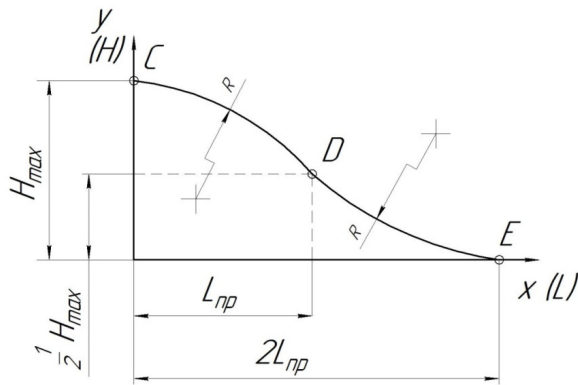


Рис. 3. Схема до розрахунку прогину методом радіусів

Враховуючи вищевикладене, можна використати теорію про середньгеометричну, суть якої полягає в тому, що відрізок прямої, перпендикулярно проведеної з довільної точки кола на діаметр цього кола, є середньгеометричною відрізків, на котрі ця пряма поділяє діаметр кола. Теорема пояснюється рисунком 4, з якого випливає, що

$$x = \sqrt{(2R - f) \cdot f} = \sqrt{2Rf - f^2}. \quad (1)$$

Якщо траєкторія руху змінюється кілька разів на одній площині, то її схема відхилення матиме вигляд, поданий на рис. 4.

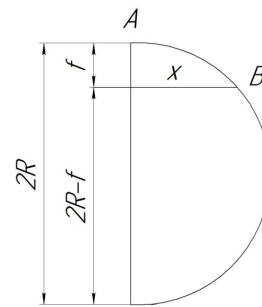


Рис. 4. Схема до теореми про середньгеометричну

Вирішуючи це рівняння відносно f -прогину консольної балки АВ, отримаємо

$$f = R - \sqrt{R^2 - x^2}. \quad (2)$$

Оскільки x в нашому випадку дорівнює $\frac{1}{2}L$, а максимальний прогин f досягається при гранично допустимому радіусі згину труби R_{\min} , отримаємо

$$f_{\max} = R_{\min} - \sqrt{R_{\min}^2 - \frac{1}{4}L^2}. \quad (3)$$

Довжина прогину трубопроводу може бути визначена з формули (3). Визначимо допустимий радіус згину штанги, виготовленої з труби. Оскільки консольна балка на ділянці АВ зазнає чистого згину, то, згідно [13], він може бути записаний у вигляді

$$\frac{1}{R_{\min}} = \frac{M(x)}{EI}, \quad (4)$$

звідки

$$R_{\min} = \frac{EI}{M(x)}, \quad (5)$$

де I – момент інерції перетину труби із зовнішнім радіусом і внутрішнім

$$I = \frac{\pi}{4}(r_1^4 - r_2^4). \quad (6)$$

Припустимий згинальний момент $M(x)_{\max}$ визначається гранично допустимим напруженням матеріалу трубопроводу $[\sigma_u]$ і дорівнює

$$M(x)_{\max} = W[\sigma_u] = \frac{\pi D^3(1 - \alpha^4)}{32}(\sigma_u), \quad (7)$$

де W – статичний момент перетину труби

$$W = \frac{\pi D^3(1 - \alpha^4)}{32}, \quad (8)$$

де α – відношення внутрішнього діаметра трубопроводу d до зовнішнього D .

Підставляючи в початкову формулу вирази (6), (7) та (8), отримуємо граничний радіус згину

$$R_{\min} = \frac{8E(r_1^4 - r_2^2)}{D^3(1 - \alpha^4)[\sigma_u]}. \quad (9)$$

Після перетворювань остаточно отримаємо

$$R_{\min} = \frac{ED}{2[\sigma_u]}. \quad (10)$$

Визначивши за (10) граничний згин трубопроводу на ділянці АВ, можна отримати граничну величину відхилення штанги від осі проколу

$$H_{\max} = 2f_{\max}. \quad (11)$$

Цей випадок відповідає мінімальній довжині лінії прогину штанги L_{\min} , а відповідно, мінімальній довжині ділянки корекції траєкторії

$$L_{\min} = 2\sqrt{R_{\min} \cdot H_{\max} - \frac{1}{4}H_{\max}^2}. \quad (12)$$

Знаючи величину мінімальної довжини прогину штанги, нескладно встановити, за якого зусилля заглиблення P_{\max} вона досягається. Для цього запишемо рівняння для визначення максимально припустимого моменту від дії поперечної сили, прикладеної до кінця консольної балки (рис. 5).

$$M(x)_{\max} = \frac{qL_{\min}^2}{8} + P_{\max} \frac{L_{\min}}{2} \leq W[\sigma_u], \quad (13)$$

де q – погонна вага труби.

Звідки

$$P_{\max} = \frac{2W[\sigma_u]}{L_{\min}} - \frac{qL_{\min}}{4}. \quad (14)$$

Для порівняння розрахункових даних з реальними було проведено експериментальну імітацію укладання сталюого трубопроводу діаметром 159 мм з товщиною стінки труби 6 мм. Фіксована висота підйому трубопроводу складала 1,66 м. Відповідні дані були закладені у формули для розрахунку лінії прогину, отримані теоретичним шляхом.

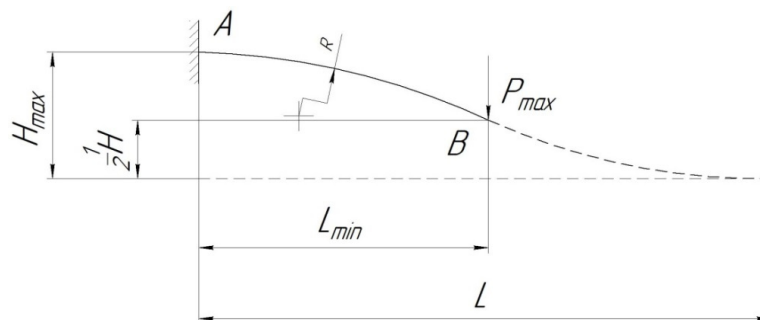


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення допустимого зусилля задавлювання трубопроводу

З графічного зображення ліній прогину трубопроводу можна зробити висновок, що використане у теоретичних розрахунках рівняння пружної лінії з достатньо великою вірогідністю узгоджується з реальними результатами. Максимальне відхилення не перевищує 15 %.

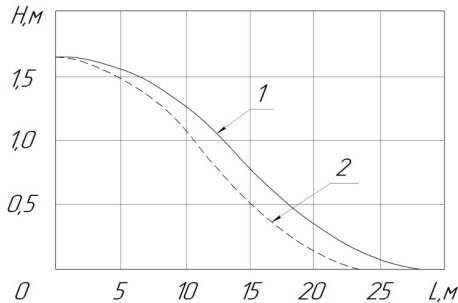


Рис. 6. Лінії прогину сталевих трубопроводу діаметром 159 мм: 1 – за експериментальними даними; 2 – за методом радіусів

Згідно з отриманими уявленнями про напружений стан труб або штанг, отримуємо допустиме відхилення від осі проколу. Якщо уявити, що траєкторія руху головки відносно цієї лінії може проходити з різним радіусом, то можна визначити зону ефективності корекції траєкторії руху (рис. 7), тобто ту траєкторію, радіус якої максимально наближається до допустимої лінії згину штанги. Якщо радіус прогину штанги буде значно більшим, то це приведе до збільшення величини відхилення H_{max} за межі допустимого та збільшенню довжини ділянки корекції $L_{зг}$, на яку можна не встигнути вивести головку до первинної осі.

Прагнення скоротити величини відхилення та довжини ділянки корекції може призвести до потрапляння штанг або труб при їх просуванні в небезпечну зону їх роботи.

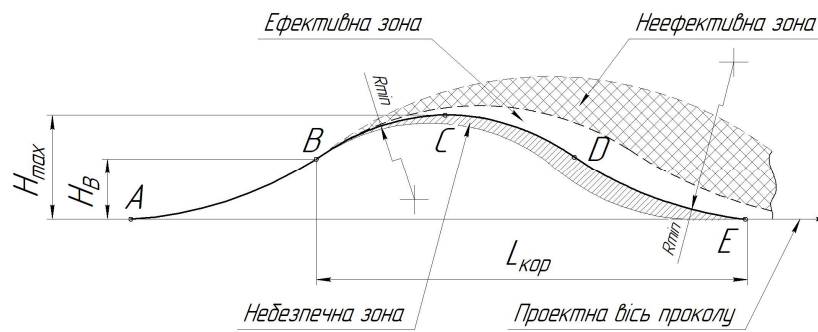


Рис. 7. Зони ефективності корекції траєкторії проколу ґрунту

Їх згин може перейти межу критичного значення та отримати остаточне деформування, що є недопустимим. Переробка браку в такому випадку призводить до великих непередбачуваних витрат.

Управління процесом корекції та вибір траєкторії проколу визначається кутом зрізу наконечника проколюючої головки та залежить від типу ґрунту, в якому розробляється свердловина. Можливі відхилення головки залежно від цих факторів були досліджені у роботі [6] та подані у графічному вигляді на рис. 8.

Враховуючи, що відхилення має незначні величини у межах 30–40 мм на ділянці 10 м, для корекції процесу з цих умов знадобиться ділянка понад 15–20 м. Таким чином, можна припустити, що на ділянці проколу довжиною до 100 м таких ділянок корекції може виникнути до 3–4 разів.

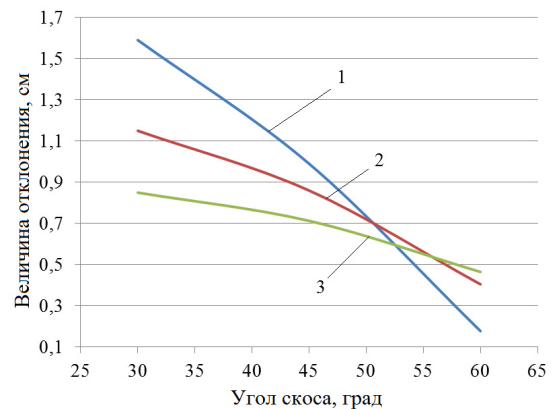


Рис. 8. Залежність відхилення головки від кута скосу наконечника: 1 – у супіску; 2 – у суглинку; 3 – у глині

Висновки

Встановлено, що у процесі керування траєкторією проколу ґрунту, крім фізико-механічних властивостей ґрунту та кута скосу асиметричної лобової поверхні робочого

органу, треба враховувати умову збереження штовхаючих штанг або захисних футлярів від пошкодження у вигляді остаточного деформування при згині під час їх просування по ділянці проколу із криволінійною траєкторією.

Якщо припустити, що згин труби, з якої виготовлений захисний футляр або штанга буде йти по радіусу, можна визначити допустимі значення радіуса згину та, відповідно, довжину ділянки корекції траєкторії руху проколюючої головки у ґрунті залежно від величини відхилення трубопроводу від осьового напрямку, за якого буде гарантоване безпечне просування штанги або трубопроводу крізь утворену свердловину.

Встановлено, що у разі відхилення сталевого трубопроводу діаметром 159 мм та стінкою 6 мм теоретична довжина ділянки повернення траєкторії руху від максимального її відхилення на 1,66 м до осі повинна бути 23 м. Експериментальними дослідженнями було встановлено, що ця довжина склала 27 м. Розбіжність між ними не перевищує 15 %, що можна вважати достатнім для практичного використання при керуванні процесом корекції траєкторії проколу ґрунту.

Література

1. Супонев В. Н., Каслин Н. Д., Олексин В. И. Бестраншейные технологии прокладки распределительных инженерных коммуникаций. *Научный вестник строительства*. 2008. №49. С. 213-217.
2. Руднев В. К. Кравец С. В., Каслин Н. Д., Супонев В. Н. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учебн. пособие под ред. Руднева В. К. Харьков: ООО «Фавор», 2008. 256 с.
3. Гусев И. В., Чубаров Ф. Л. Применение управляемого прокола грунта при бестраншейной прокладке труб. *Потенциал современной науки*. № 2, 2014. С. 30-33.
4. 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.
5. Ленченко В.В., Меньшина Е. В., Меньшин С. Е. Выбор рациональных параметров снаряда при направленной прокладке скважины. *Доклад на симпозиуме «Неделя горняка – 2001». Семинар 20*. М., МГУ 29 янв.- 2 фев. 2001.
6. Кравец С. В., Супонев В. М., Балесний С. П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осьового руху при його проколі асиметричним наконечником. *Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. Выпуск 41*, 2017. Харьков, ХНАДУ. С.155-163.
7. Erez A. State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations / Erez Allouche, Samuel Ariaratnam // American Society of Civil Engineers. 2012. 8 p.
8. Chehab A. G. Moor I. D. One-dimensional calculation for axial pullback for axial pullback distributions in pipes during directional drilling installations *OttavaGeo*. 2007. P. 1140-1154.
9. Huey D.P., Hair J.D., McLeod K.B. Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. North American Society for Trenchless Technology. 1996. 24 p.
10. Bennett R.D., Ariratham S.T. Horizontal Directional Drilling Good Practices Guidelines. NASTT. 2008. 10 p.
11. Пат. 95501 Україна. Установка для керованого проколу ґрунту. Опубл. 25.12.2014.
12. Пат.116258 Україна. Пілотна ґрунтопроколююча головка для керованого проколу опубл.10.05.2017.
13. Ободовский Б. А., Ханин С. Е. Сопrotивление материалов в примерах и задачах. Харьков, Харьковский университет. 1971. 384 С.

References

1. Suponev V. N. Kaslin N. D., Olexin V. I. (2008) Bestransheyyny tehnologiyi prokladky inzhenernih kommunikacij [Bestranšejnye technology of laying inzhenernyh kommuniacij] *Naukovy visnik budivnictva*. 499, 213-217 [in Ukrainian].
2. Rudnev V. K., Kravet's S. V., Suponev V. N. (2008) Mashiny dly bestransheynoy prokladki podzemnih comunikacij [Machines for laying bestranšejnoj of kommunikacij] pod. red. Rudnev V. K. Harkiv: ООО «Favor», 256.
3. Gusev I. V., Chubarov F. L. (2014). Primenenie upravlyemogo prokola grunta pri bestransheynoy prokladke trub. [Application managed puncture in trenchless pipe laying] *Potencial sovremennoy nauki*. 2, 30-33 [in Russian].
4. Rogachov A. A., (2007) Obosnovanie konstruktivnih parametrov i rejimov raboty ispolnitel'nogo organa upravlyemoy prokalivavushey ustanovy [The rationale for the design parameters and modes of prokalivavushey managed installation]: avtoreferat na soiskanie nach. stepeny kand. teh. nauk: spec. 05.05.06. «Gornyy mashini». Tula,135. [in Russian].
5. Lenchenko V. V. Menshinina E. V, Menshinin S. E. (2001). Vibor racional'nyh parametrov snaryda pri napravlenoy prokladke skvajiny [Select racionalnyh settings of projectile in prokladke wells] *Doclad na simposiumi «Nedeliy gornyaka - 2001» Seminar 20*. -M., MGU, 29 yanv. – 2 fev. [in Russian].
6. Kravets S. P., Suponev V. N., Balesnyy S.P. (2017). Vstanovlenny reakciy gruntu I velichiny vidhilenny vid os'ovogo ruhu pru yogo prokoli asimetrichnim naconechnicom [Opredelenie grunta reakcii s veličiny for dviženiâ oseвого that's when ego Pierce assimetričnym tip] *Аvтомобильный транспорт. Sbornik nauchnih trudov*. Harkiv HNADU, 41, 155-163. [in Ukrainian].

7. Erez A. (2012). State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations. Erez Allouche, Samuel Ariaratnam *American Society of Civil Engineers*. 8 p.
8. Chehab A. G. Moor I. D. (2007). One-dimensional calculation for axial pullback for axial pullback distributions in pipes during directional drilling installations. *OttavaGeo*. P. 1140-1154.
9. Huey D. P. Hair, J. D., McLeod K. B (1996) Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. *North American Society for Trenchless Technology*. – 24 p.
10. Bennett R. D. Ariratham, S. T. – (2008) Horizontal Directional Drilling Good Practices Guidelines. *NASTT*. – 10 p.
11. Pat. 95501 Ukraina. Ustanovka dly kerovanogo prokolu gruntu Opubl. 25.12.2014.
12. Pat. 116258 Ukraina. Pilotna grunoprokoluucha golovka dly kerovanogo prokolu gruntu. Opubl. 10.05.2017.
13. Obodovsky B. A., Hanin S. E. (1971) Soprotilvenie materialov v primerah i zadachah Harkivskiy universitet, 384.

Супонев Володимир Миколайович¹, к.т.н., доц. кафедри будівельних і дорожніх машин, тел. +38 099-378-04-51, e-mail: shasyana@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Managing the process of correction of the working body movement trajectory at the static soil puncture

Abstract. *One of the most effective methods for the formation of horizontal wells for trenchless laying of underground utilities is the puncture of the soil with a cone-cylindrical tip. One of the major drawbacks of the method is the high probability of its deviation from the project trajectory. The reason for this may be different soil density in height, stony inclusions, not accurate positioning of the working body in the initial stage of the process. This disadvantage significantly reduces the scope of application of the puncture method at short distances within 15 ... 20 m. It is possible to increase this distance by promptly correcting the trajectory of the working body in the ground. The paper reveals the possibility of controlling the trajectory of the working body movement by adapting the shape of its tip, and determines the conditions for motion correction when the soil puncture process is continuous. The originality of the solution includes the following. In case of deviation of the working body movement from a given trajectory, the traditional conical shape of the tip is replaced by an asymmetrical one, which is acted upon by the transverse force from the soil reaction. This force in turn leads to a change in the direction of the working body movement towards the displacement of the asymmetric tip. Previously it was found that the deviation of the working body is influenced by both the angle of inclination of the frontal surface of the tip and the properties of the soil. Given these circum-*

stances, you can control the trajectory of the well in the process of its formation. It has been established that the trajectory of the soil puncture will be the most effective in the case of its tendency to the minimum length of the correction area. In its turn, the curvature of the axis of the borehole should not be less than the allowable values of bending stresses in the pipes that occur when they are pulled through curvilinear sections. A method for calculating the effective puncture trajectory, which is based on determining the allowable stresses in pipelines during their bending, is proposed. The bending line of the pipeline was taken as part of a circle. The results of the calculation according to the obtained method showed that, for example, when a steel pipeline with a diameter of 159 mm with a wall thickness of 6 mm deviates, the theoretical length of the section for correcting the movement path of the working body from the maximum deflection point of 1.66 m to the point of contact with the project path should be 23 m. Experimental studies have proven that the length of the section for this case was 27 m. The discrepancy between the experimental data and theoretical values does not exceed 15 %, which can be considered as the basis for practical use in controlling the process of the soil puncture path. The obtained recommendations for the management of the puncture allow expanding the area of effective application for a distance of up to 100 m. In this case, the correction of the movement of the working body in the soil can be up to 4-5 times.

Key words: *trenchless technologies, static soil puncture, engineering communications, puncturing working body, movement path correction.*

Vladimir Suponyev¹, PhD., Assoc. Prof.,
tel.: +38 050-30-199-58, e-mail: v-suponev@ukr.net
¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho street, Kharkiv, 61002, Ukraine,

Управление процессом коррекции траектории движения рабочего органа при статическом проколе грунта

Анотация. *При горизонтальном проколе грунта установками статического действия возникает необходимость коррекции траектории движения рабочего органа с конусным наконечником. В работе раскрывается возможность управления траекторией движения с помощью рабочего органа с адаптированным наконечником и определяются условия коррекции его движения.*

Ключевые слова: *бестраншейные технологии, статический прокол грунта, инженерные коммуникации, прокалывающий рабочий орган, коррекция траектории движения.*

Супонев Владимир Николаевич¹, к.т.н., доц. каф. строительных и дорожных машин,
тел. +38 050-30-199-58, e-mail: v-suponev@ukr.net
¹Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина, г. Харьков, 61002, ул. Ярослава Мудрого, 25.