

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13>

УДК 624.132.3

- <sup>1</sup> СУПОНЕВ В. М., доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації, випробувань, сервісу будівельних і дорожніх машин  
e-mail: [y-suponev@ukr.net](mailto:y-suponev@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>
- <sup>1</sup> РАГУЛІН В. М., кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова  
e-mail: [ragulinrvn@ukr.net](mailto:ragulinrvn@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>
- <sup>2</sup> ТХОРУК Є. І., кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин  
e-mail: [ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua](mailto:ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>
- <sup>2</sup> КРАВЕЦЬ С. В., доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин  
e-mail: [s.v.kravets@nuwm.edu.ua](mailto:s.v.kravets@nuwm.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4063-1942>
- <sup>1</sup> ЛЕМЕЦЬ О. О., аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова  
e-mail: [m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua](mailto:m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-9736>
- <sup>1</sup> КУЛІКОВ М. О., магістрант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова  
e-mail: [Nikitakulikovgg@gmail.com](mailto:Nikitakulikovgg@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6871-3812>
- <sup>1</sup> *Харківський національний автомобільно-дорожній університет*  
вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002
- <sup>2</sup> *Національний університет водного господарства та природокористування*  
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000

## РІВНЯННЯ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ ГОЛОВКИ В ҐРУНТІ З УМОВИ ЇЇ КОРЕКЦІЇ ТА ЇЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

Основним обмеженням методу є відхилення траєкторії руху інструменту від проектною траєкторії через різні фактори, такі як неоднорідність ґрунту та неточності позиціонування. Це обмежує застосування методу короткими відстанями до 15–20 м. Для підвищення точності проколу пропонується корекція траєкторії робочого органу шляхом адаптації геометрії наконечника (головки). У разі відхилення від проектною траєкторії використовується наконечник з асиметричною геометрією, що створює контрольований дисбаланс сил взаємодії з ґрунтом. Це дозволяє цілеспрямовано керувати рухом головки під час проколу, дозволяючи коригувати траєкторію без переривання процесу та без додаткового втручання в систему.

Проведене дослідження призвело до розробки математичної бази, що включає відповідні рівняння для корекції траєкторії робочого органу. Були враховані ключові параметри, такі як тип ґрунту, його фізичні властивості та кут нахилу наконечника. Отримані співвідношення дозволяють прогнозувати поведінку системи та надають можливість покращити точність проколу за різних умов експлуатації.

Аналіз експериментальних даних показав, що найбільші відхилення траєкторії відбуваються при менших кутах нахилу наконечника, тоді як зі збільшенням кута цей ефект поступово зменшується. Крім того, глинисті ґрунти демонструють найменші відхилення порівняно з іншими типами ґрунтів. Зокрема, на відстані 10 м та куті нахилу 25° відхилення в супіску становило близько 40 мм, тоді як у глині – приблизно 20 мм. При збільшенні кута до 55° ці значення зменшуються до 14 мм у супіску та 13 мм у глині відповідно. Подальше збільшення кута до 70° показало, що вплив кута нахилу стає незначним і більше не впливає суттєво на відхилення траєкторії. Водночас розбіжність між експериментальними результатами та теоретичними розрахунками не перевищує 15%, що свідчить про достатню точність запропонованої моделі та підтверджує її адекватність у реальних умовах експлуатації.

Отримані результати відкривають нові можливості для підвищення точності та ефективності прокладання підземних комунікацій. Зокрема, вони дозволяють збільшити довжину проколу без втрати керованості процесу та розширюють можливості застосування методу статичного проколу в складних інженерно-геологічних умовах, забезпечуючи більш надійне та передбачуване виконання операцій.



**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** безтраншейна технологія, статичний прокол ґрунту, інженерні комунікації, робочий орган, що проколює, корекція траєкторії руху, бурова штанга, свердловина.

**Як цитувати:** Супонев В. М., Рагулін В. М., Тхорук Є. І., Кравець С. В., Лемець О. О., Куліков М. О. Рівняння траєкторії руху головки в ґрунті з умови її корекції та їх експериментальна перевірка. *Машинобудування*. 2026. Вип. 37. С. 153-163. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13>

### Вступ

Під час горизонтально-спрямованого проколу ґрунту малогабаритними установками статичної дії виникає потреба коригувати траєкторію руху робочого органу. Відхилення робочого органу з конусним наконечником можуть відбуватися з різних причин: не точним

розташуванням установки щодо осі на початку проколу; при зустрічі робочого органу з деяким шаром щільнішого ґрунту; за рахунок вигину довгої штанги та діаметру. Тому коригування траєкторії проколу необхідне і пошук ефективних рішень є актуальним.

### Аналіз публікацій

Горизонтально направлене буріння (ГНБ) – це технологія безтраншейної прокладки трубопроводів, яка швидко розповсюджується останніми роками по усьому світі. [1]. ГНБ широко використовується для прокладання нафтогазопроводів, силових кабелів та інших комунікаційних мереж [2]. До суттєвих переваг цієї технології можна віднести високу ефективність, екологічність та скорочення обсягу земляних робіт. Це зробило технологію ГНБ більш важливою для великомасштабних інфраструктурних проєктів [3]. Вона поєднує в собі безліч технологій та обладнання [4]. Процес прокладання трубопроводу складається з пілотного буріння, попереднього розширення та зворотного протягування трубопровідної нитки у створену свердловину [5]. Точність прогнозування навантажень на всіх етапах процесу впливає на вибір бурової установки і проєктування міцності трубопроводу та його бурових штанг, що має значення для забезпечення безпечної та надійного прокладання трубопроводів [6]. Зокрема, при збільшенні кількості великомасштабних проєктів з прокладання трубопроводів великої довжини і великих діаметрів трубопроводів, якщо розрахунок навантаження зворотного протягування труби неточний, легко може статися застрягання трубопроводу, що призведе до значних економічних втрат [3].

Сили, що діють на штангу при проколі або трубопроводу під час його протягування, складні. Розрахунок

навантажень при протяжці вимагає знання трибології, а також механіки рідини, пружності та ґрунтів. Навантаження, що діють під час протягування трубопроводу можна умовно поділити на частини [7,8]: (1) сила тертя між трубопроводом і поверхнею землі або роликотом, (2) сила тертя між трубопроводом і стінкою свердловини (включаючи силу тертя, викликану чистою вагою трубопроводу та ефектом вигину). Результируюча цих сил у напрямку зворотного ходу складає навантаження зворотного ходу. На основі цього існують розроблені практичні методики [8], що стимулюють підвищення ефективності ГНБ технології [9].

Ще траєкторія свердловини ГНБ зазвичай включає прямі та вигнуті ділянки [10]. Коли трубопровід перетинає вигнуту ділянку [11], через зміну напрямку пілотної свердловини, зовнішнє навантаження, яке прикладена до стінки свердловини, збільшується, що відомо, як ефект лебідки [11]. Збільшення зовнішнього навантаження призводить до додаткових навантажень при зворотньому ході. Модель PRCI [12] та модель ASTM [11] враховують вплив ефекту лебідки [13]. Крім того, сила опору бурового розчину моделі ASTM розраховується з урахуванням балансу сил, що діють на зазор рідини в свердловині через різницю тисків і бічних сил зсуву, що діють на стінки труби і свердловини [14].

В даний час існують деякі недоліки досліджень прогину бурової штанги і труби при використанні технології ГНБ.

Існуючи розрахунок не враховують зміни якості ґрунту в навколишньому просторі при статичному проколі ґрунту та його впливу на процеси формування лідерної свердловини та її розширення були розглянуті в роботі [8] та [9]. Вплив фізико-механічних властивостей трубопроводу, що затягується у свердловину на її траєкторію наводиться в роботах [16] та доведено дослідженнями [17]. Важливість дотримання проектно вказується в [18]. Характер траєкторії свердловини з умови надійної роботи бурових штанг розглядається в роботі [17]. Важливість

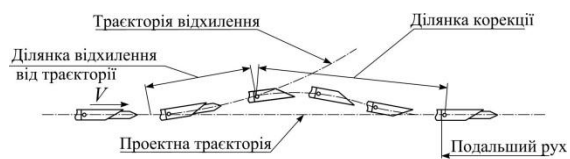
дотримання траєкторії проколу з умови зберігання цілості штанг наводиться в роботі [19]. Напрями удосконалення керування процесу статичного проколу ґрунту та конструкції бурової головки показано в роботах [20] та [21].

Метою роботи є теоретичне обґрунтування методології оперативної корекції траєкторії проколу ґрунту та її експериментальна перевірка, які дозволять виробити вимоги до конструкцій: проколюючої голівки, апаратури за її розташуванням у масиві ґрунту та силового блоку її переміщення та коригування.

### Встановлення рівняння руху ґрунтопроколюючої головки в ґрунті

Відомо, що для зміни напрямку руху під час роботи машини горизонтально-спрямованого буріння (ГСБ) під час формування лідерної свердловини з криволінійною траєкторією використовується бурова головка зі скошеною лобовою поверхнею. При статичному задавлюванні цієї головки в ґрунт виникає поперечна сила від реакції ґрунту, яка зміщує її рух у протилежний бік від скосу лобової поверхні [8-10].

Сучасні технології дозволяють визначити координати місця знаходження головки у ґрунті з досить високою точністю. При керуванні бурінням свердловини машинами ГСБ використовують зазвичай електромагнітні, лазерні та кабельні методи локації таких відомих виробників, як DigiTrax, Spot-d-Nek, PipeHawkGPR та інші. Це досить складні та дорогі пристрої. Для коригування рухом головки, що проколює, на відносно невеликих глибинах можна використовувати вітчизняну пошукову установку СПРУТ- 5 Дніпровської фірми "КРОМ", яка має досить високу точність визначення її місцезнаходження, яка становить до 2 см на глибині до 3 м.



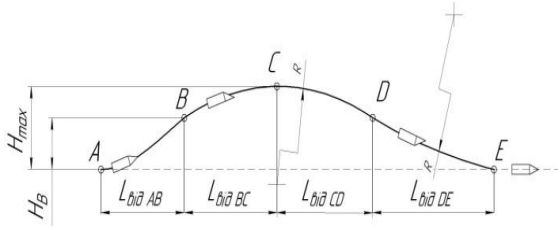
**Рис. 1** – Принцип корекції траєкторії руху головки в ґрунті

**Fig. 1** – Principle of correction of the trajectory of the head movement in the soil

Таким чином, якщо форму наконечника головки, що проколює, буде можливим оперативно змінювати і обертати, то можна буде коригувати траєкторію її руху в ґрунті (рис. 1). Вирішення цього питання дозволить збільшити довжину підземних прольотів проколу високоефективним статичним методом у кілька разів, а саме від 15 або 20 м гарантованої точності до 100 м. Саме після 100 м починається ефективне використання більш складних і дорогих машин ГСБ.

Встановлено, що використання проколюючого органу зі скошеною поверхнею дозволяє керувати траєкторією його руху та проводити проколи деякою криволінійною траєкторією [8, 9, 10]. Для прямолінійного проколу ґрунту застосовні лише симетричні робочі органи, для корекції проколу – головка зі скошеною поверхнею.

Допускається відхилення від проектної точки виходу проколюючої головки в котловані, що приймається, по горизонту в межах  $\pm 40$  см, а по вертикалі  $\pm 20$  см при прольоті проколу до 20 м. Якщо відстань від точки критичного відхилення до приймального котловану ще є досить великим, то необхідно провести корекцію проколу. Для встановлення умови ефективної траєкторії руху проколюючої голівки розглянемо схему її просування в ґрунті (рис.2), з якої видно, що процес корекції руху проколюючої голівки відбувається не одночасно, а поступово.

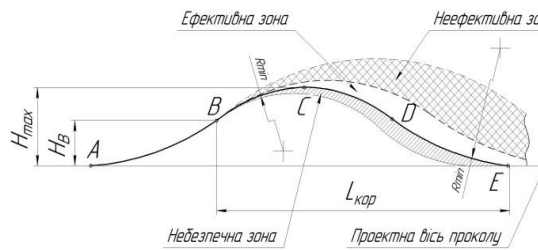


**Рис. 2** – Схема для розрахунку траєкторії проколу ґрунту

**Fig. 2** – Scheme for calculating the trajectory of soil puncture

При цьому відхилення від проектної осі відбуватиметься з вихідної точки до максимального відхилення від траєкторії в точці С. Це слід враховувати при встановленні точки критичного відхилення  $H_{від}$ . Подальший рух головки потребує зміни положення скошеної поверхні на  $180^\circ$  доти, поки траєкторія руху головки не досягне проектного напрямку в точці Е. Далі наконечник головки повинен змінити свою скошену форму на конусну і пересуватися далі в прямому напрямку. Якщо відхилення знову сягне свого критичного значення, процес корекції треба повторити знову. З наведеного постають питання: яким може бути критичне відхилення від проектної траєкторії, яке максимальне відхилення лінії може виникнути і на якій відстані може відбутися корекція траєкторії руху? Для відповіді на ці питання треба встановити фактори, що впливають на процеси роботи обладнання та встановити лінію траєкторії проколу ґрунту під час її корекції.

Відображена схема руху головки на рисунку 2 визначається формою наконечника головки, що проколює, а її траєкторія встановлює лінію прогину штовхаючих штанг. Прагнення скоротити величини відхилення та довжини ділянки корекції може привести роботу штанг до безпечної зони корекції, коли вона може зламатися (рис. 3).

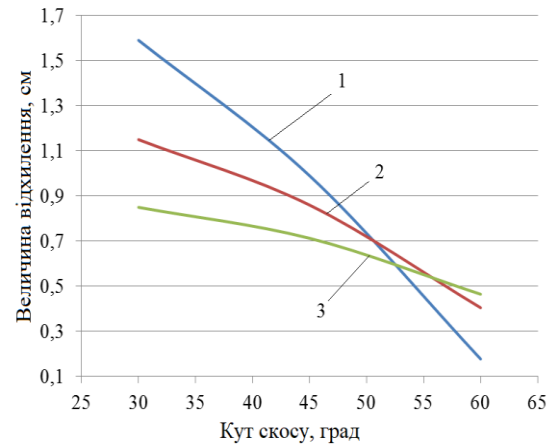


**Рис. 3** – Зони ефективності траєкторії проколу ґрунту

**Fig. 3** – Soil penetration trajectory efficiency zones

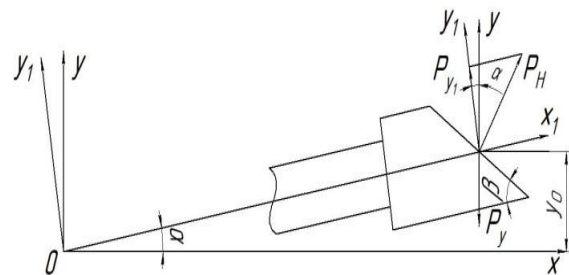
Управління процесом корекції та вибір траєкторії проколу визначається кутом скосу наконечника проколюючої голівки та залежить від типу ґрунту в якому розробляється свердловина. Значення відхилення голівки в залежності від цих факторів були досліджені в роботі [10] і можуть бути представлені у графічному вигляді, наведеному на рисунку 4.

Якщо в процесі проколу головка снаряда в напрямку нормальному до осі проколу ОХ відхилилася на деяку величину, необхідно ввести в дію елемент головки зі скошеною поверхнею так, щоб виникла відхиляюча сила в протилежному напрямку відхилення  $y_0$  (див. рис. 5).



**Рис. 4** – Залежність відхилення голівки від кута скосу наконечника: 1 - у супіску; 2 - у суглинці; 3 - в глині

**Fig. 4** – Dependence of the head deflection on the bevel angle of the tip: 1 - in sandy loam; 2 - in loam; 3 - in clay



**Рис. 5** – Сили на голівці, що відхиляється

**Fig. 5** – Forces on the deflecting head

Виходячи з другого закону Ньютона та результатів досліджень [11] рівняння руху головки снаряда в напрямку осі ОУ матиме вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_y (1-\lambda) \cos \alpha \quad (1)$$

Результати, отримані в роботі [11] дозволяють встановити коефіцієнт  $\lambda$ :

$$\lambda = 1 - \frac{2mL(1-Ktg\beta)}{Pn} \quad (2)$$

де  $K$  та  $n$  – різні чисельні значення для різних типів ґрунтів:

для супісї:  $K=21,3$ ;  $n = 0,532$ ;

для суглинку:  $K = 33,6$ ;  $n = 0,425$ ;

для глини:  $K = 46,88$ ;  $n=0,325$ .

Підставляючи (2) у (1) диференціальне рівняння набуде вигляду:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{2L(1-ktg\beta)}{t_1^2 n} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{L}\right)^2} \quad (3)$$

де  $L$  і  $t_1$  – довжина однієї секції проколюючого механізму і час проколу відповідно;

$\beta$  – Кут скосу елемента головки;

$k_i^n$  – коефіцієнти, що характеризують фізичні властивості ґрунту, що залежать від кута скосу  $\beta$ ;

$\alpha$  – кут між напрямком проколу та віссю штанги з проколюючою головкою;

$m$  – маса головки снаряда;

$y_0$  – відхилення головки снаряда від напрямку проколу у нормальному напрямку.

У початковий момент часу необхідно знайти рішення диференціального рівняння (3) за початкових умов

$$y|_{t=0} = y_0, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

Крайова задача (3) і (4) є нелінійним завданням, і її рішення може бути отримане за допомогою кінцевих різниць. Отримане рішення  $y_1$  буде величиною, на яку відхилиться головка снаряда у напрямку, протилежному спочатку заданому відхиленню  $y_0$  при проходженні однієї штанги механізму, що проколює.

Для визначення відхилення  $y_2$  під час проходження другої штанги механізму необхідно вирішити рівняння (3) з початковими умовами

$$y|_{t=0} = y_1; \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

Цей процес необхідно продовжувати п раз і отримати величину

$$y_0 - y_1 - y^2 - \dots - y_n = \bar{y} \quad (6)$$

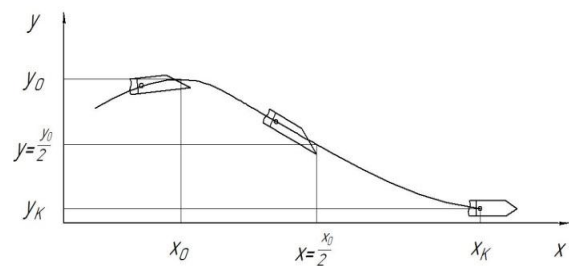
Знаючи величину  $y_0$  і  $\bar{y}$ , а також кількість штанг проколюючого механізму, використаних при цьому, можна визначити траєкторію, радіус якої максимально наближається до допустимої лінії згинання штанги. При ймовірності досягнення граничної величини відхилення  $y_0 - \bar{y}$  необхідно проколюючу головку снаряда повернути на  $180^\circ$  навколо осі штанги та продовжити процес проколу

Для розрахунку подальшої траєкторії проколу необхідно вирішувати рівняння (3) із початковими умовами

$$y|_{t=0} = \bar{y}, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

В результаті обчислень отримаємо значення  $y_k$  (див. рис. 6).

Виходячи з результатів, отриманих раніше (див. рис. 3), візьмемо  $y|_{t=0} = \frac{y_0}{2}$



**Рис. 6** – Рівняння траєкторією руху головки снаряда

**Fig. 6** – Equation of the trajectory of the projectile head

Після повороту головки, що проколює, на  $180^\circ$  при значенні відхилення  $y = \frac{y_0}{2}$  (див. рис.6) подальший розрахунок траєкторії руху головки снаряда здійснюється відповідно до рівняння [2] з початковими умовами

$$y|_{t=0} = \frac{y_0}{2}, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Для першої з доданих штанг та для всіх наступних з оновленими початковими умовами. В результаті отримуємо наступну послідовність значень

$$y_k = \frac{y_0}{2} - y_1 - y_2 - \dots - y_n - y_{n+1} - \dots - y_{n+k} \quad (9)$$

Процес проколу необхідно продовжувати доти, доки величина відхилення  $u_k$  від осі проколу буде досить малою.

Враховуючи, що відхилення незначної величини в 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 при проколі завдовжки до 100 м таких ділянок корекції може виникнути до 3-4 штук. А це означає, що установка проколу повинна мати два приводи руху: подання та обертання. Конструкція наконечника ґрунтопроколюючої головки при цьому повинна в потрібний час змінювати свою форму з конусної на скошену. Кут нахилу площини у цьому положенні повинен відповідати умові створення ефективної лінії траєкторії руху головки, яка залежить від типу ґрунту, що розробляється. Така конструкція установки та робочого обладнання пропонується авторами у патентах [20, 21].

Перевірка теоретичних положень, отриманих у роботі, пов'язаних із впливом кута нахилу скошеного наконечника на величину відхилення траєкторії руху проколюючої головки від проектної осі проводилася за розробленою методикою проведення польових досліджень з експериментальною моделлю установки та робочим органом, представленими на рис. 7.

Результати експериментальних вимірювань величини відхилення головки на дистанції 10 м для різних кутів нахилу лобової поверхні до осі наконечника та їх порівняння з розрахунковими даними представлені у таблиці.

Змінні наконечники та вимір їх величини відхилення на виході в приймальному котловані представлені на рисунку 8.



**Рис. 7** – Експериментальна установка для проколу ґрунту  
**Fig. 7** – Experimental setup for soil puncture



**Рис. 8** – Перевірка величини відхилення головки від проектного напрямку:  
а – експериментальні наконечники;  
б – відхилення головки на виході  
**Fig. 8** – Checking the magnitude of the head deviation from the design direction:  
а – experimental tips;  
б – head deviation at the exit

Таблиця 1.  
Результати вимірів величин відхилення  
Table 1.  
Results of measurements of deviation values

Кут нахилу скосу	Величина відхилення головки, см								
	Супесь			Суглинок			Глина		
	Експеримент	Розрахунок	%	Експеримент	Розрахунок	%	Експеримент	Розрахунок	%
25°	40	35	12	44	39	11	20	18	9
40°	29	26	10	28	25	11	17	15	12
55°	14	11	12	16	18	11	13	11	15
70°	-	-	-	-	-	-	3	2	33

З аналізу наведених у таблиці даних встановлено, що відхилення між теоретичними розрахунками та експериментально отриманими результатами не перевищує

15%, що свідчить про задовільну узгодженість моделі з практичними спостереженнями та підтверджує її придатність для подальшого використання в інженерних розрахунках. Водночас найбільший відсоток розбіжності зафіксовано при значенні кута

70°, що можна пояснити тим, що за таких умов вплив цього кута на процес керування рухом робочої головки в ґрунтовому середовищі практично нівелюється або стає незначним, унаслідок чого знижується точність прогнозування її поведінки.

### Висновки

1. Отримані результати можуть бути рекомендовані для практичного застосування при виборі параметрів ґрунтопроколюючої головки і схеми приводу силової установки. Методологія оперативної корекції траєкторії проколу ґрунту має враховувати: фізико-механічні властивості ґрунту, кут нахилу скошеної поверхні наконечника проколюючої головки, податливість та вигин штанг.

2. Для реалізації процесу корекції рекомендовано проколюючу головку робити з адаптованим наконечником, а установку з рухами – подачі та подачі з обертанням.

3. Натурні дослідження з експериментальним зразком установки підтвердили теоретичні припущення про величину відхилення головки, що проколює, в залежності від типу ґрунту в якому розробляється свердловина і від величини кута скосу лобового майданчика наконечника.

4. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що максимальне відхилення досягається при менших кутах нахилу майданчика, а найменша величина відхилення відбувається у глині. Так, при довжині дистанції проколу 10 м для кута нахилу 25° в супіску головка відхилиться на 40 мм, а в глині на 20 мм. У той же час при вугіллі 55° відхилення головки в тих же умовах склало 14 і 13 мм відповідно. При куті 70° вплив скосу лобової поверхні наконечника на процес втрачається.

5. За результатами дослідження отримано рівняння руху робочого органу, що проколює, в ґрунті на ділянці корекції траєкторії, яка дає можливість вибрати параметри робочого органу для конкретних ґрунтових умов, за яких буде гарантована раціональна довжина ділянки корекції у разі відхилення головки від напрямку її руху.

### Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувалась етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

### Список використаної літератури

- 1 Наукові основи та практика створення мінімальноенергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті: монографія / В. М. Супонев, С. В. Кравець, О. П. Посмітюха, С. П. Балесний. Харків : ХНАДУ, 2021. 304 с.
- 2 Tong, H.; Shao, Y. Mechanical Analysis of DS in Horizontal Directional Drilling. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063145>
- 3 Theoretical Analysis of Drilling Fluid Flow for Maxi-Horizontal Directional Drilling / Wang, Z. Y.; Hu, C. M.; Li, L.; Yang, C.; Liang, H. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.* 2024. iss 15. 04024050. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1608>
- 4 Ehm, G. The changing pipeline industry. *Pipes Pipelines Int.* 2016. iss 20. Pp. 20–22.
- 5 Polak M. A. Analysis of polyethylene pipe behaviour in horizontal directional drilling field tests. *Can. J. Civ. Eng.* 2005. iss 32. Pp. 665–677.
- 6 Determination of Pipe Pullback Loads in Horizontal Directional Drilling Using an Advanced Computational Dynamic Model / Yang C. J.; Zhu W. D.; Zhang W. H.; Zhu X. H.; Ren G. X. *J. Eng. Mech.* 2014. iss 140. 0401406. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000749)
- 7 Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods—A critical review / Cai L. X., Xu G., Polak M. A., Knight M. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2017. iss 69. Pp. 85–93.

- 8 Cheng E., Polak M. A. Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2007. iss 22. Pp. 633–643.
- 9 Technical Expertise Application of Driscopipe in Directional Drilling and River Crossings / Phillips Driscopipe Company. Brownwood, TX, USA, 1993.
- 10 Drillpath T. M. Drillpath Theory and User's Manual. Infracore LLC : Houston, TX, USA, 1996.
- 11 ASTM F 1962-20. Standard Guide for the Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit under Obstacles, Including River Crossings. West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- 12 GB 50424-2015. Code for Construction of Oil and Gas Pipeline Crossing Project. CNPC : Beijing, China, 2015.
- 13 Polak, M.A.; Lasheen, A. Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2001, 16, 47–55. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00020-2)
- 14 Huey, D.P.; Hair, J.D.; McLeod, K.B. Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. *In Proceedings of the International No-Dig Conference, New Orleans, LA, USA, 31 March–3 April 1996.*
- 15 Cai, L.; Polak, M.A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2019, 83, 313–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.014>
- 16 Suponyev V., Kravets S., Balesnyi S., Shevchenko V., Yefymenko A., Ragulin V. Determination of the regularities of the soil punching process by the working body with the asymmetric tip. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 2/1(110). С. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230256> .
- 17 Кравець С. П., Супонев В. М., Балесний С. П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху при його проколі асиметричним наконечником. Автомобільний транспорт. 2017. Вип. 41. Харків : ХНАДУ. С. 155-163. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.155>
- 18 Rheological Properties of Clay-Based Drilling Fluids and Evaluation of Their Hole-Cleaning Performances in Horizontal Directional Drilling / Deng S., Kang C., Bayat A., Kuru E., Osbak M., Barr K., Trovato C. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2020. no. 11. 04020031. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000475)
- 19 Fluidic Drag Estimation in Horizontal Directional Drilling Based on Flow Equations / Faghieh A., Yi Y. L., Bayat A., Osbak M. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2015. no 6. 04015006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000200)
- 20 Установка для керованого проколу ґрунту : пат. 95501 Україна: МПК E02F 5/18 (2006.01). № 95501; заявл. 10.07.14; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. С. 6.
- 21 Пілотна ґрунтопроколююча головка для керованого проколу : пат. 12583; заявл. 09.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

**Отримано: 07.04.2026 / Переглянуто: 11.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026**

<sup>1</sup>**SUPONYEV V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation, Testing, and Service of Construction and Road Machinery

email: [y-suponev@ukr.net](mailto:y-suponev@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>

<sup>1</sup>**RAGULIN V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery named after A. M. Kholodov

e-mail: [ragulinrvn@ukr.net](mailto:ragulinrvn@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>

<sup>2</sup>**TKHORUK Y.**, PhD (Engineering), Professor Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment

e-mail: [ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua](mailto:ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>

<sup>2</sup>**KRAVETS S.**, DSci (Engineering), Professor Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment

e-mail: [s.v.kravets@nuwm.edu.ua](mailto:s.v.kravets@nuwm.edu.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4063-1942>

<sup>1</sup>**LEMETS O.**, postgraduate student of the Department of Construction and Road Machinery  
email: [m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua](mailto:m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-9736>

<sup>1</sup>**KULIKOV M.**, master's student of the Department of Construction and Road Machinery  
e-mail: [Nikitakulikovgg@gmail.com](mailto:Nikitakulikovgg@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6871-3812>

<sup>1</sup>*Kharkiv National Automobile and Highway University*

Yaroslava Mudrogo str. 25, 61002, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>*National University of Water and Environmental Engineering*

Soborna str. 11, 33000, Rivne, Ukraine

## EQUATIONS OF THE TRAJECTORY OF THE HEAD'S MOTION IN THE GROUND WITH THE CONDITION OF ITS CORRECTION AND THEIR EXPERIMENTAL VERIFICATION

The primary limitation of the method is the deviation of the tool trajectory from the design path due to various factors, such as soil heterogeneity and positioning inaccuracies. This restricts the application of the method to short distances of up to 15–20 m.

To improve puncture accuracy, trajectory correction of the working body is proposed through adaptation of the tip (head) geometry.

In the event of deviation from the design trajectory, a tip with an asymmetric geometry is employed, generating a controlled imbalance of interaction forces with the soil. This enables purposeful control of the head motion during puncturing, allowing trajectory correction without interrupting the process and without additional intervention in the system.

The conducted research resulted in the development of a mathematical framework, including corresponding equations for trajectory correction of the working body. Key parameters such as soil type, its physical properties, and the inclination angle of the tip were taken into account. The obtained relationships allow prediction of system behavior and provide the capability to improve puncture accuracy under various operating conditions.

Analysis of experimental data showed that the largest trajectory deviations occur at smaller inclination angles of the tip, whereas with increasing angle this effect gradually decreases. In addition, clay soils exhibit the smallest deviations compared to other soil types. In particular, at a distance of 10 m and an inclination angle of 25°, the deviation in sandy loam was about 40 mm, while in clay it was approximately 20 mm. When the angle increases to 55°, these values decrease to 14 mm in sandy loam and 13 mm in clay, respectively. Further increase of the angle to 70° demonstrated that the influence of the inclination angle becomes negligible and no longer significantly affects trajectory deviation. At the same time, the discrepancy between experimental results and theoretical calculations does not exceed 15%, indicating sufficient accuracy of the proposed model and confirming its adequacy under real operating conditions.

The obtained results open new opportunities for improving the accuracy and efficiency of underground utility installation. In particular, they enable an increase in puncture length without loss of process controllability and expand the applicability of the static puncture method in complex engineering-geological conditions, ensuring more reliable and predictable execution of operations.

**KEYWORDS:** *trenchless technology, static soil puncturing, utility infrastructure, penetrating tool, trajectory correction, drill rod, borehole.*

**In cites:** Suponyev V., Ragulin V., Tkhoruk Y., Kravets S., Lemets O., Kulikov M. (2026). Equations of the trajectory of the head's motion in the ground with the condition of its correction and their experimental verification. *Engineering*, (37), 153-163. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13> ( in Ukraine)

### Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication

### References

- 1 Suponyev, VM, Kravets, SV, Posmitiukha, OP & Balesnyi, SP 2021, *Naukovi osnovy ta praktyka stvorennia minimalnoenerhoiemnykh robochykh orhaniv dlia formuvannia komunikatsiinykh porozhnyn v grunti* [Scientific Foundations and Practice of Creating Minimally Energy-Consuming Working Bodies for Forming Communication Cavities in Soil], KhNADU, Kharkiv. (in Ukrainian).
- 2 Tong, H.; Shao, Y. (2022) Mechanical Analysis of DS in Horizontal Directional Drilling. *Appl. Sci.* 12, 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063145>
- 3 Wang, Z.Y.; Hu, C.M.; Li, L.; Yang, C.; Liang, H. (2024) Theoretical Analysis of Drilling Fluid Flow for Maxi-Horizontal Directional Drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15, 04024050. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1608>
- 4 Ehm, G. (2016) The changing pipeline industry. *Pipes Pipelines Int.* 20, 20–22.
- 5 Polak, M.A. (2005) Analysis of polyethylene pipe behaviour in horizontal directional drilling field tests. *Can. J. Civ. Eng.* 32, 665–677.
- 6 Yang, C.J.; Zhu, W.D.; Zhang, W.H.; Zhu, X.H.; Ren, G.X. (2014) Determination of Pipe Pullback Loads in Horizontal Directional Drilling Using an Advanced Computational Dynamic Model. *J. Eng. Mech.* 140, 0401406. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000749)
- 7 Cai, L.X.; Xu, G.; Polak, M.A.; Knight, M. (2017) Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods—A critical review. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 69, 85–93.
- 8 Cheng, E.; Polak, M.A. (2007) Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 22, 633–643.
- 9 Phillips Driscopipe Company. (1993) *Technical Expertise Application of Driscopipe in Directional Drilling and River Crossings*; Phillips Driscopipe Company: Brownwood, TX, USA.
- 10 Drillpath, T.M. (1996) *Drillpath Theory and User's Manual*; Infracore LLC: Houston, TX, USA.
- 11 *ASTM F 1962-20*; (2020) Standard Guide for the Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit under Obstacles, Including River Crossings. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- 12 *GB 50424-2015*; (2015) Code for Construction of Oil and Gas Pipeline Crossing Project. CNPC: Beijing, China.
- 13 Polak, M.A.; Lasheen, A. (2001) Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 16, 47–55. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00020-2)
- 14 Huey, D.P.; Hair, J.D.; McLeod, K.B. (1996) Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. *In Proceedings of the International No-Dig Conference, New Orleans, LA, USA, 31 March–3 April 1996.*
- 15 Cai, L.; Polak, M.A. (2019) A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 83, 313–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.014>
- 16 Suponyev V., Kravets S., Balesnyi S., Shevchenko V., Yefymenko A., Ragulin V. Determination of the regularities of the soil punching process by the working body with the asymmetric tip. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. № 2/1(110). С. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230256> ( in Ukraine).
- 17 Kravets S.P., Suponyev V.M., Balesnyi S.P. (2017) Establishing Soil Reactions and the Magnitude of Deviations from Axial Movement During Piercing with an Asymmetric Tip. *Automotive*

*Transport*. Iss. 41. Kharkiv: KhNADU. P. 155-163. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.155> (in Ukrainian).

18 Deng, S.; Kang, C.; Bayat, A.; Kuru, E.; Osbak, M.; Barr, K.; Trovato, C. Rheological Properties of Clay-Based Drilling Fluids and Evaluation of Their Hole-Cleaning Performances in Horizontal Directional Drilling. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2020, 11, 04020031. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000475)

19 Faghieh, A.; Yi, Y.L.; Bayat, A.; Osbak, M. Fluidic Drag Estimation in Horizontal Directional Drilling Based on Flow Equations. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2015, 6, 04015006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000200)

20 Penchuk, VO, Belytsky, DH, Suponyev, VM, Oleksin, VI & Balesnyi, SP 2006, Ustanovka dlia kerovanoho prokolu hruntu [Device for Controlled Soil Piercing], Patent UA 95501. IPC E02F 5/18 (2006.01) ( in Ukraine).

21 Penchuk, VO, Suponyev, VM, Balesnyi, SP, Oleksin, VI, Shchukin, OV, Sidorov, VV & Usik, SV 2016, Pilotna hruntoprokoliuiucha holovka dlia kerovanoho prokolu [Pilot Soil-Piercing Head for Controlled Piercing], UA Patent 12583 ( in Ukraine).

**Submission received: 04.07.2026/Revised: 05.11.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026**