

УДК 621.87

Аналітичний огляд розробок та вдосконалення робочого органу кабелеукладача при безтраншейному прокладанні кабелів

Ігор Русан¹, Євгеній Коротков²

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Повітрофлотський проспект 31, Київ, Україна, 03680

¹rusan.iv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2901-752X>,

²korotkovgenij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0253-8296>

Received: 09.09.2020; Accepted: 09.11.2020

<https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0402>

Анотація. В статті проведено аналітичний огляд наукових розробок щодо вдосконалення процесу кабелеукладання загалом і конкретно робочого органу кабелеукладача при безтраншейному прокладанні кабелів у різних геологічних умовах.

Використовуючи патентну документацію проведено пошук і аналіз матеріалів з удосконалення робочого органу кабелеукладача та основних переваг безтраншейного прокладання кабелів.

Завданням безтраншейного прокладання є: прокладання мереж водопостачання, каналізації, газопроводу; прокладання кабелів електропостачання, телефонних і оптоволоконних кабельних ліній зв'язку та сигналізації; прокладання на дні річок та водоймищ; прокладання в гірських місцевостях; заміна зношених комунікацій на нові.

У статті проаналізовано вдосконалення конструкції кабелеукладачів з активними землерийними робочими органами (ЗРО), принцип дії яких заснований на безтраншейному способі, що мають обмежену швидкість робочого руху та відносну швидкість робочого органу, складність конструкції та низьку експлуатаційну надійність.

Ключові слова: землерийний робочий орган, кабель, кабелеукладач, ґрунт, безтраншейний спосіб, опір переміщення.

ВСТУП

Прокладка підземних інженерних мереж завжди було одним із найскладніших процесів будівельних робіт, особливо в урбанізованому середовищі.

Якщо прокладання мереж на вільних територіях було обмежене проблемами збе-

реження природного, як ґрунтового так і рослинного середовища, то в містах основною проблемою стає територіальна обмеженість. Звичайні методи потребують робіт з переміщення великого об'єму ґрунту та широкий спектр технічного забезпечення.

Технологія безтраншейного прокладання за допомогою ножових кабелеукладачів з пасивним робочим органом визначає поопераційну послідовність і основні вимоги до прокладання силових кабелів у землі на глибині 1-1,2 м від поверхні. Кабелеукладачі з пасивним ножом забезпечують ефективно прокладання в суглинних, глинистих, піщаних і інших ґрунтах I-III категорій.

Сучасні кабелеукладачі забезпечують прокладання кабелів практично у будь-яких умовах, дозволяють проходити у болотах, ярах і нешироких водних перешкодах у вигляді мілководних річок і струмків.

Основні переваги безтраншейного прокладання кабелів: високі робочі швидкості прокладання (до 5 км/год), різке зменшення об'єму земляних робіт, збереження гумусового шару ґрунту на поверхні землі, можливість використання в обвальних ґрунтах, а також в ґрунтах з твердими включеннями і високим рівнем ґрунтових вод [1, 11].

МЕТА

Мета роботи полягає в обґрунтуванні можливості вдосконалення конструкції робочого органу кабелеукладача, а саме активного землерийного робочого органу, принцип дії якого ґрунтується на безтран-

шейному способі та в аналізі обмеженої швидкості робочого руху та робочого органу машини.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Безтраншейне укладання інженерних мереж в ґрунт – це найменший вплив на природне середовище, швидкість, мінімально необхідне технічне забезпечення, маневреність і доступність для різних ґрунтових умов.

Безтраншейне укладання інженерних мереж в ґрунт – це ефективна технологія, яка надає можливість не руйнувати верхній шар ґрунту під час проведення підземних робіт. Така технологія дозволяє не тільки зменшувати матеріальні витрати, але й скорочувати час виконання робіт.

Існують різні види технічного забезпечення процесу безтраншейного укладання в залежності від умов проведення робіт.

За даними попередніх досліджень найперспективнішими є безтраншейні причіпні кабелеукладачі з пасивними землерийними робочими органами. Однак, незважаючи на вказані переваги, безтраншейний спосіб будівництва ще не набув широкого розповсюдження. Це пояснюється тим, що традиційні робочі органи безтраншейних укладачів працюють за принципом розрізання і запресування ґрунту в стінки щілини, що нарізується.

На сьогодні найбільшого поширення в світі отримали безтраншейні укладачі з землерийними робочими органами (ЗРО) шириною 100...120 мм для укладання лінії зв'язку і 150...200 мм для укладання лінійно-протяжних об'єктів (ЛПО). Найбільш ймовірна критична глибина розробки ґрунту для заданої ширини захвату знаходиться в межах $h_{кр} = 0,3...0,5$ м для кабелеукладачів і $h_{кр} = 0,4...0,8$ м для інших укладачів ЛПО. Максимальна глибина розробки ґрунту кабелеукладачами та найпоширенішими безтраншейними укладачами іншого призначення складає відповідно 0,9...1,2 м і 1,8...1,9 м, а номінальна глибина на 0,2 м менша. На основі порівняння критичної та номінальної глибин можна стверджувати, що всі традиційні ЗРО безтраншейних ук-

ладачів працюють, як правило, з утворенням закритичної зони, в якій ґрунт піддається техногенному впливу. Тому такі робочі органи не можуть захистити навколишнє середовище від переущільнення і бути енергозберігаючими.

Детальніший аналіз показав, що повністю всім функціональним вимогам не відповідає жоден із традиційних ЗРО – у вигляді несучого стояка з суцільною різальною частиною, які застосовуються як робочі органи безтраншейних укладачів ЛПО. Але такий робочий орган, як і всі традиційні конструкції, здійснюють техногенний вплив на навколишнє ґрунтове середовище, що призводить до негативних наслідків. Визначальна причина техногенної небезпеки робочих процесів безтраншейних укладачів закладена в конструкції ЗРО, яка не дозволяє усунути з процесу різання закритичної зони, тому що критична глибина розробки ґрунту для такої конструкції ножа менша, ніж необхідна глибина укладання підземного об'єкту [2, 6, 9, 12].

Згідно патентного дослідження № 67382 (2012 р.), за авторством Сукача М.К. «Спосіб прокладання кабелів по дну річок та мілководних водоймищ» було доведено, що для прокладання підводних ліній зв'язку використовують спеціальні судна та різні типи ножових кабелеукладачів. Такі кабелеукладачі знайшли широке використання при переходах через річки та болота. При переходах через невеликі річки та канали кабель прокладають механізованою колоною, ніяких додаткових механізмів і пристосувань не потрібно. В цьому патенті була запропонована екскаваторна навіска зі зсувною віссю стріли [13, 14].

Якщо попередні дослідження спрямовані на можливість проведення робіт у складних природних умовах, то наступне дослідження характеризує сам процес дії робочого органу та його конструкцію.

Згідно патентного дослідження № 13987 (1997 р.), за авторством Чеченева М. П., Ракка С. М та Боровика М. О. «Активний робочий орган кабелеукладача» було доведено, що активний робочий орган кабелеукладача, який включає ніж, що складається з жорстко закріпленого на рамі корпусу з

рухомим лезом, кабеленаправляючого вузла, привід коливань леза, який відрізняється тим, що лезо виконано складовим з декількох парних частин, розділених по довжині, рознесених по напрямку прорізуваної щілини і має можливість коливатися в протилежних напрямках в площині, перпендикулярній напрямку прорізання щілини, а привід коливань частин лез виконаний у вигляді багатопозиційного механізму з кількістю виходів, відповідних кількості частин лез і з обмежувачами амплітуди крутильних коливань приводних валів [15].

Для будівництва підземних комунікацій безтраншейним способом застосовують машини з активними та пасивно-активними та пасивними землерийними робочими органами (ЗРО).

Активні ЗРО сприймають енергію від одного або декількох джерел енергії, що встановлені на робочому органі та розробляють ґрунтове середовище за рахунок цієї енергії. Наприклад вібраційні, віброударні, імпульсні тощо. Метою активізації є зниження опору переміщення ЗРО або збільшення зусилля їхньої дії на середовище [3, 10].

Машини з вібраційними і віброударними робочими інструментами отримали найбільше поширення для прокладання комунікаційних об'єктів. Максимальний ефект від вібрації виникає у випадку, коли швидкості поступального руху і розповсюдження хвильових процесів у ґрунті збігаються за напрямком. Зі збільшенням швидкості поступального руху машини та глибини різання ґрунту ефективність вібрації при незмінних параметрах активізації знижується. Крім того, відомо, що вібраційні ножі працюють за традиційним принципом ущільнення ґрунту в бокові стінки і дно щілини, що призводить до зниження природної пористості ґрунту по довжині траси. Внаслідок цього знижується водопроникність щілини, погіршується структура ґрунту в підземних горизонтах і водно-повітряний режим родючого шару, що суперечить агротехнічним вимогам.

Отже, застосування вібраційних машин для прокладання підземних комунікацій призводить або до обмеження робочої

швидкості руху при незмінних параметрах активізації, або до збільшення енергоємності робочого процесу, або ж до погіршення структури і водно-повітряного режиму підземних горизонтів, до ускладнення конструкції робочих органів [4].

Пасивно-активні ЗРО розробляють щілину як за рахунок тягового зусилля тягача, так і за рахунок енергії автономного джерела інтенсифікатора. Як інтенсифікатори використовуються рідина, газ, повітря тощо, а також механічні пристрої, такі як, підземні фрези. Інтенсифікація пасивно-ножових робочих органів дозволяє знизити опір переміщенню безтраншейних укладачів на 20...50%. Але в зв'язку з тим, що пасивно-активні робочі органи мають активну частину, їм властиві недоліки активних ЗРО.

Пасивні ножі традиційної конструкції, виконані у вигляді несучого стояка з суцільною різальною частиною по глибині та ширині захвату отримали найбільше застосування на безтраншейних укладачах через простоту конструкцій, відсутність забивання твердими породами, високу продуктивність і надійність. Проте для їх переміщення потрібне велике тягове зусилля [3, 12].

Якщо зона сколювання ґрунту утворюється умовами вільного виходу ґрунту на верхню поверхню, то критична зона ущільнення, навпаки, утворюється через відсутність таких умов (вихід ґрунту із зони різання). Для усунення критичної зони руйнування ґрунту і покращення якості його обробки в зоні дії робочого органу необхідно створити умови для вільного виходу стружки ґрунту із будь-якого підземного горизонту в напрямку верхньої поверхні або іншого вільного простору в межах щілини, що формується. Якщо $H \geq h_{кр}$, то такі умови можуть бути створені при поярусній розробці середовища.

Поярусна схема розробки дозволяє зменшити енергоємність і динаміку робочого процесу порівняно з одноярусною схемою розробки щілини (глибина різання у три і більше разів перевищує його ширину).

Зниження енергоємності багоярусної схеми розробки базується на положенні, що кожний ярус робочого органу, отже і енер-

гоємність процесу при оптимальній кількості ярусів менші, ніж для традиційних ЗРО (Рис. 1) [3, 8].

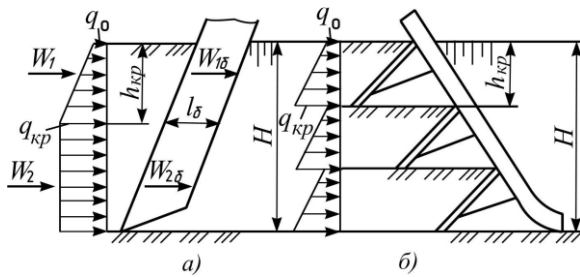


Рис. 1. Характерні епюри розподілу нормального тиску на лобову поверхню робочого органа по глибині: *a* – для традиційної конструкції; *б* – для багаторушної конструкції

Fig. 1. Characteristic plots of the distribution of normal pressure on the frontal surface of the working body by depth: *a* – for a traditional design; *b* – for multi-storey construction

Безтраншейні укладачі з одноярусними ножами прокладають підземні комунікації на глибину, яка перевищує критичну глибину різання [3, 5]. Тому максимальний опір переміщенню для традиційного одноярусного ножа складається із опорів переміщенню в докритичній ($W_1 + W_{1b}$) для $h_1 = h_{kp}$ і в закритичній ($W_2 + W_{2b}$ для $h_2 = H - h_{kp}$) зонах:

$$W = W_1 + W_2 + W_{1b} + W_{2b}, \quad (1)$$

де W_1 , W_2 – лобовий опір переміщенню ножа в докритичній і закритичній зонах; W_{1b} , W_{2b} – опори від тертя ґрунту по бічних стінках ножа в докритичній і закритичній зонах.

$$W + W = b \cdot [(1 - f \cdot f) + (f + f) \operatorname{ctg} \alpha] \cdot q \cdot h + q \cdot b \cdot (H - h) \quad (2)$$

де b – ширина (товщина) ножа;

f – коефіцієнт зовнішнього тертя ґрунту ($f = \operatorname{tg} \varphi$, де φ – кут зовнішнього тертя ґрунту);

f_{on} – коефіцієнт опору переміщенню опор ножа;

α_p – кут різання ножа;

h_{kp} – критична глибина різання ґрунту;

H – повна глибина різання ґрунту ножом;

q_{kp} – критичний тиск ґрунту на ніж на глибині $h \geq h_{kp}$;

$q_{сеп}$ – середній нормальний тиск ґрунту на лобову площину ножа на глибині $h \leq h_{kp}$.

$$q_{сеп} = \frac{q_0 + q_{kp}}{2}, \quad (3)$$

$$q_0 = c \cdot (A_1 - 1) \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad (4)$$

де c, φ_0 – відповідно коефіцієнт зчеплення і кут внутрішнього тертя ґрунту.

$$A_1 = \frac{\cos \varphi \cdot (\cos \varphi + \sqrt{\sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi}) \cdot (\sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_a + \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_0 \cdot \sin^2 \varphi_a})}{\cos^2 \varphi_0 \cdot (1 - \sin \varphi_0)}, \quad (5)$$

$$\text{де } \varphi_a = \pi - \alpha_p - \frac{\varphi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_0};$$

$$W_{1b} = \frac{f \cdot \gamma_{ep} \cdot h_{kp}^2}{\sin \alpha_p} \cdot l_b \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \frac{\varphi_0}{2}), \quad (6)$$

де γ_{ep} – питома сила тяжіння ґрунту; l_b – довжина бічних стінок ножа.

$$W_{2b} = q_{сеп,б} \frac{2 \cdot f \cdot l_b}{\sin \alpha_p} \cdot (H - h_{kp}), \quad (7)$$

$$q_{сеп,б} = \frac{q_{\min} + q_{\max}}{2}, \quad (8)$$

де $q_{\min}, q_{\max}$ – відповідно мінімальний та максимальний тиск ґрунту на бічні стінки ножа на глибині закритичної зони.

$$q_{\min} = 2c \cdot \operatorname{tg}(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}), \quad (9)$$

$$q_{\max} = \frac{B_q + \sqrt{B_q^2 - 4 \cdot A_q \cdot C_q}}{2A_q} \quad (10)$$

Зі зменшенням глибини різання відсоток зменшення тягового зусилля зменшується, тому що при заглибленні основного ножа в закритичну зону питомий опір різанню зростає через ущільнення ґрунту в бічні стінки щілини.

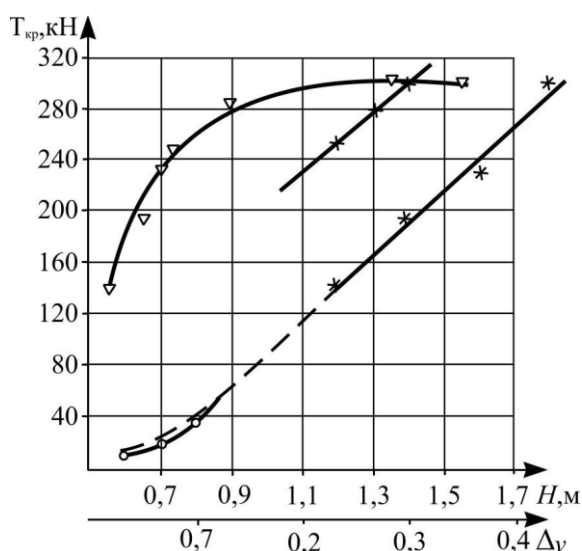


Рис. 2. Залежність тягового зусилля на гаку і величини буксування дрепоукладача від глибини щілини, що нарізується

Fig. 2. The dependence of the traction force on the hook and the amount of slippage of the drainer on the depth of the cut slit

У такому випадку можна зробити висновок, що необхідна оптимізація форми і параметрів основного ножа при застосуванні до двоярусної схеми розробки, яка направлена на усунення закритичної зони [5, 7].

Тягове зусилля неосновного ножа (Рис. 2) зі збільшенням глибини різання від 0,6 до 0,85 м зростає за параболічним законом від 9,2 до 55 кН. Критична глибина різання дорівнює 0,80...0,85 м при куті різання 20...25° і ширині неосновного ножа 0,22 м. Двоярусна схема розробки щілини дозволяє знизити щільність бічних стінок з 7...10 до 3...5 ударів динамічного щільноміра, зменшити динамічні навантаження на робоче обладнання, покращити тягово-зчіпні влас-

тивості ходового обладнання, підвищити плавність ходу дрепоукладача і якість робочого процесу.

ВИСНОВКИ

Аналіз зарубіжних і вітчизняних досліджень та розробок показав, що значна частина із традиційних ЗРО у вигляді несучого стояка з суцільною різальною частиною, які застосовуються як робочі органи безтраншейних укладачів ЛПО потребує додаткових досліджень, як і у вивченні конструктивних можливостей, так і в характері застосування.

Безтраншейний спосіб дозволяє зменшити об'єм земляних робіт до мінімуму та в 3...5 разів підвищити робочу швидкість і продуктивність робочого процесу; зберегти родючий шар ґрунту без проведення рекультиваційних робіт; укласти комунікаційні об'єкти в обвальних і спливаючих ґрунтах з твердими включеннями з розміром поперечника більше 350 мм і високим рівнем ґрунтових вод; спростити конструкцію та збільшити надійність робочого обладнання; підвищити рівень механізації праці; знизити собівартість будівництва.

Водночас, цей спосіб не дозволяє вирішити проблему техногенного впливу робочого процесу на ґрунтове середовище. Крім того, стримуючим фактором є великий опір переміщення безтраншейних укладачів (до 400 кН при укладанні дренажу в зоні осушення на глибину до 1,8 м). Використання додаткових тягачів або збільшення їхньої маси й потужності веде до подорожчання будівництва, збільшує непродуктивні енерговитрати.

Згідно з результатами аналізу, можна зробити висновок, що дослідження цієї теми на сьогодні є актуальною.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зухба А. Г. Перспективы применения бес-траншейных и траншейных технологий укладки линий связи в прочных грунтах / Гірн., буд., дор. і меліор. машини: Наук.-техн. зб. – К.: КДТУБіА, 1997, вип. 51. С. 73-80.

2. **Кравець С. В., Нечидюк А. А., Косяк О. В.** Машины для прокладання підземних комунікацій (наукові основи створення). – Рівне, 2018. – 271 с.
3. **Кравець С. В.** Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. – Рівне: Видавництво РДТУ, 1999. – 277с.
4. **Ткачук В. Ф., Романовский А. Л., Кравец С. В.** Тенденции развития рабочих органов бестраншейных дреноукладчиков В. ш.: Гидромелиорация и гидротехническое строительство. – 1988 вып. 16, С. 90-93.
5. **Бондаренко О. В.** Будівництво та монтаж волоконно-оптичних систем передачі: підручник [для студентів вищ. навч. закл.] / Бондаренко О. В., Андреев В. О., Панюта І.М. – Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2014. – 228 с.
6. **Ветров Ю. О., Власов В. В.** Машины для земляных работ. Приклады расчета: Навч. посібник – К: ІСДО, 1995. – 304с.
7. **Баладинский В. Л., Смирнов В. Н., Фомин А. В.** Теория разрушения рабочих сред: Учебное пособие для специалистов и студентов. – Киев: КГТУСиА 1999. – 230с.
8. **Фомін А. В., Пелевін Л. Є.** Зменшення опорів ґрунту зубу розпушника в режимі заглиблення робочого органа. Вестник харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2014 р. - № 65-66. – С. 256-263.
9. **Зеленин А. Н.** Машины для земляных работ. М.: Машиностроение. 1975. – 424 с.
10. **Кравець С. В.** Теорія руйнування робочих середовищ. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, - 2008, - 124 с.
11. **Ветров Ю.А.** Машины для специальных земляных работ. Учеб. Пособие. – К.: Вища школа. – 1980. – 192 с.
12. **Ушацкий С. А., Шейко Ю. П. та ін.** Організація будівництва. Підручник. – К.: Кондор, 2007. – 521 с.
13. **Баладинский В. Л., Сукач М. К.** Подводные строительные работы. – К.: ИСМО, 1999. – 223 С.
14. **Сайт «База патентів України».** – Спосіб доступу: uapatents.com.
15. **ДСТУ 3575-97.** Патентні дослідження. Основні положення та порядок проведення.

tekhnohoyi ukladky lynyi svyazy v prochnykh hruntakh., Nr.51, 73-80 (in Russian).
2. **Kravets S. V., Nechydiuk A. A., Kosiak O. V.,** (2018). Mashyny dlia prokladannia pidzemnykh komunikatsii (naukovi osnovy stvorennia), 271 (in Ukrainian).
3. **Kravets S. V.,** (1999). Gruntozakhsni ta enerhozberihaiuchi mashyny dlia prokladky pidzemnykh komunikatsii. RDTU, 277 (in Ukrainian).
4. **Tkachuk V. F., Romanovskiy A. L., Kravets S. V.,** (1988). Tendentsyy razvytyia rabochykh orhanov bestransheinykh drenoukladchykov V. sh., no 16, 90-93. [in Russian]
5. **Bondarenko O. V.,** (2014). Budivnytstvo ta montazh volokonno-optychnykh system peredachi. ONAZ im. O. S. Popova, 228 (in Ukrainian).
6. **Vietrov Yu. O., Vlasov V. V.,** (1995). Mashyny dlia zemlianykh rob. Pryklady rozrakhunku. ISDO, 304. (in Ukrainian).
7. **Baladynskiy V. L., Smyrnov V. N., Fomyn A. V.,** (1999). Teoriya razrusheniya rabochykh sred. KHTUSyA, 230. (in Ukrainian)
8. **Fomin A. V., Pelevin L. Ie.,** (2014). Zmenshennia oporiv gruntu zubu rozpushnyka v rezhymy zahlyblennia robochoho orhana. Vestnyk kharkovskoho natsyonalnoho avtomobylno-dorozhnoho unyversyteta, 66, 256-263. (in Ukrainian)
9. **Zelenyn A. N.,** (1975). Mashyny dlia zemlianykh robot. Mashynostroenye, 424. (in Russian).
10. **Kravets S. V.,** (2008). Teoriia ruinuвання robochykh seredovysch. NUVHP, 124. (in Ukrainian).
11. **Vetrov Yu. A.,** (1980). Mashyny dlia spetsyalnykh zemlianykh robot. Vyshcha shkola, 192. (in Ukrainian).
12. **Ushatskyi S. A., Sheiko Yu. P. & oth.,** (2007). Orhanizatsiia budivnytstva. Kondor, 521. [in Ukrainian]
13. **Baladynskiy V. L., Sukach M. K.,** (1999). Podvodnye stroytelnye raboty. YSMO, 223. (in Russian).
14. **Sait «Baza patentiv Ukrainy».** Sposib dostupu: uapatents.com. (in Ukrainian).
15. **DSTU 3575-97.** Patentni doslidzhennia. Osnovni polozhennia ta poriadok provedennia. (in Ukrainian).

REFERENCES

1. **Zukhba A. H.,** (1997). Perspektyvy pryimeneniya bestransheinykh y transheinykh

Analytical review of developments and improvements of the working body of the cable-layer at trenchless laying of cables

Igor Rusan, Yevhenii Korotkov

*Kyiv National University of
Construction and Architecture*

Abstract. The article provides an analytical review of scientific developments to improve the process of cable laying in general and specifically the working body of the cable layer in the trenchless laying of cables in different geological conditions.

Using the patent documentation, the search and analysis of materials for the improvement of the working body of the cable-layer and the main advantages of trenchless cable laying were carried out.

The task of trenchless laying is: laying of water supply networks, sewerage, gas pipeline; laying of

power supply cables, telephone and fiber-optic cable communication and alarm lines; laying on the bottom of rivers and reservoirs; laying in mountainous areas; replacement of worn-out communications with new ones.

The article analyzes the improvement of the design of cable-laying with active earth-moving working bodies (ZRO), the principle of operation of which is based on the trenchless method, which has limited working speed and relative working speed, design complexity and low operational reliability.

Keywords: earthmoving working body, cable, cable-layer, soil, trenchless method, resistance to movement.