

УДК 624.132.6;621.879.48

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.118

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО МІСЦЯ ВСТАНОВЛЕННЯ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОГО ВУЗЛА БЕЗКІВШЕВОГО РОТОРНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ТРАНШЕЙНОГО ЕКСКАВАТОРА

Мусяйко В. Д.<sup>1</sup>, Коваль А. Б.<sup>1</sup>, Олейнікова О. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний транспортний університет

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* В роботі обґрунтовано та підтверджено наукову гіпотезу про можливість розвантаження від ґрунту безківшевих роторних робочих органів траншейних екскаваторів використанням сили напору потоку розробленого ґрунту, що транспортується ротором із забою; визначено раціональне місце встановлення розвантажувального вузла робочого органу.

*Ключові слова:* ґрунт, екскаватор, напір, розвантаження, ротор, сила.

### Вступ

Збільшення з року в рік обсягів земляних робіт, виконуваних траншейними екскаваторами по спорудженню протяжних виїмок у ґрунті для трубних транспортних комунікацій різних розмірів та траншей іншого технологічного призначення, приводить до необхідності їх удосконалення, створення нових високопродуктивних машин принципово нової конструкції.

Для виконання всього комплексу робіт спроектовані та виготовлені та використовуються універсальні землерийні машини безперервної дії. Широкого поширення набули машини з ланцюговими робочими органами, як ківшевими, так і скребковими, а також із роторними, як ківшевими, так останнім часом і безківшевими.

Огляд конструкцій існуючих траншейних екскаваторів і аналіз можливих шляхів підвищення продуктивності дозволили встановити їх достатню досконалість [1–5]. Збільшення продуктивності машин цього типу, у межах одного типорозміру, як показали дослідження, має обмеження, що накладаються рядом факторів. Найбільш перспективними, на наш погляд, слід вважати машини з безківшевими робочими органами.

### Аналіз публікацій

Аналізуючи показники роботи ланцюгових і роторних траншейних екскаваторів, можна відзначити, що у роторних, за даними досліджень МБІ [1, 2], розподіл потужності двигуна між роботою копання, підйому ґрунту і переміщення машини більш сприятливий, ніж ланцюгових. Так, за даними М.Г. Домбровського [3], на роботу копання у них за швидкості ходу 100 м /год. витрача-

ється від 78 % до 81,2 % потужності у малих машин і до 67–69 % у великих проти, відповідно, 64–66 % і 39–41 % у ланцюгових траншеєкопачів. За збільшення швидкості ходу до 200 м/год. ці цифри становлять 66–70 % і 53–54 % у роторних машин проти 53–55 % і 31–34 % у ланцюгових відповідно. Витрати енергії в зазначених межах пояснюються більш високими витратами на підйом ґрунту і переміщення робочого органу (ланцюга) в ланцюгових машинах. Для них за великої потужності силової установки цей показник досягає 36–38 %, тобто наближається до витрат енергії на копання ґрунту. Це пояснюється значними витратами енергії на подолання сил тертя в численних шарнірах ланцюгового робочого органу, значними просипами ґрунту на дно відкопаної виїмки та великими втратами потужності на переміщення ґрунту скребками по забою. У роторних траншеєкопачів витрата енергії на підйом та переміщення ґрунту, навіть для найпотужніших машин, не перевищує 7–9 %. Крім того, на перевагу роторних машин вказує і той факт, що за умов рівної встановленої потужності й ємності ковшів вага ланцюгових траншеєкопачів вище ваги роторних на 12–15 %, а продуктивність у 1,7–2 рази нижче, ніж роторних. Зусилля копання, що реалізуються на робочих органах однакових за потужністю машин, у роторних теж вище, ніж у ланцюгових [4]; отже роторними машинами можна розробляти більш міцні ґрунти. Слід зазначити також порівняно низьку енергоємність розробки ґрунту роторними робочими органами [5].

Відомі конструкції безківшевих роторних робочих органів (БРРО) траншейних машин, наприклад ЕТР-132, ЕТР-134, ТМК-3. Осно-

вною перевагою даного типу робочих органів виступає підвищена, у порівнянні з ківшевыми, продуктивність по виносу ґрунту із забою. Висока продуктивність забезпечується транспортуванням ґрунту із забою безперервним потоком за рахунок його тертя по робочих поверхнях ротора. Збільшення продуктивності машини є можливим також і за рахунок підвищення частоти обертання ротора, оскільки примусове його розвантаження, що використовується в конструкціях БРРО, знімає обмеження на величину швидкості різання ґрунту. Тому, з точки зору вирішення питання підвищення продуктивності траншейних екскаваторів, для дослідження вибрано конструкції безківшених роторних робочих органів.

### Мета і постановка завдання

Метою роботи є підвищення ефективності роботи траншейних екскаваторів, обладнаних безківшевыми роторними робочими органами, шляхом удосконалення процесу розвантаження їх роторів від розробленого ґрунту.

Для досягнення поставленої мети необхідно розкрити фізичну суть копання ґрунту безківшевым роторним робочим органом і на

основі виконаних досліджень визначити раціональне місце встановлення розвантажувального вузла безківшевого ротора.

### Виклад основного матеріалу

Роторний робочий орган безківшевого типу (рис. 1) являє собою вертикальний диск 1, на якому по периметру перпендикулярно площині диска встановлені поперечні траверси 2, із закріпленими на них різцями 3. Ротор обертається на осі, встановленій в підшипниках рами 4. З обох сторін на вертикальному диску розміщено кільцеві обичайки 5. Простори ротора, обмежені поверхнею кільцевих обичайок і внутрішньою поверхнею траверс, будемо надалі називати внутрішніми кільцевими порожнинами (ВКП). Зовнішня кільцева порожнина (ЗКП) – простір, обмежений ріжучими кромками різців та внутрішньою поверхнею траверс. На рамі 5 позаду ротора встановлюється зачисний башмак 6, призначення якого – очищати траншею від просипаного ґрунту і створювати додатковий підпір при виносі ротором ґрунту із забою. Розвантаження робочого органу здійснюється на обидві сторони траншеї ґрунтознімачами 7, що встановлені по обидві сторони диска ротора під певним кутом до нього.

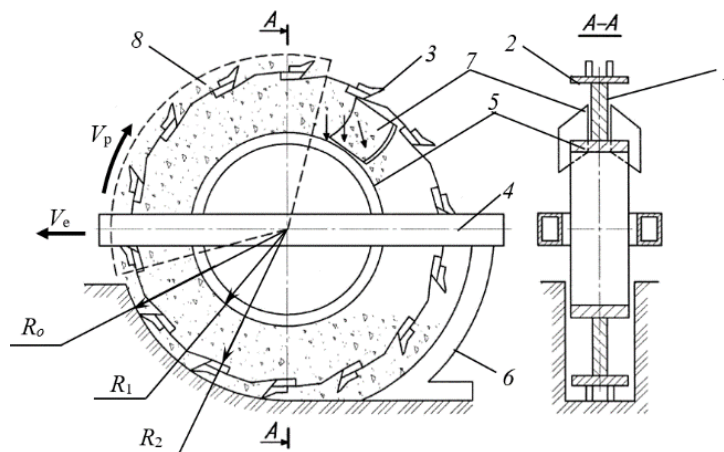


Рис. 1. Роторний безківшевий робочий орган: 1 – центральний диск; 2 – траверса; 3 – ріжучий елемент; 4 – рама; 5 – обичайка; 6 – зачисний башмак; 7 – ґрунтознімач; 8 – кожух

Робочий процес безківшевого роторного робочого органу полягає в послідовному відділенні від масиву стружок ґрунту за допомогою ріжучих елементів (різців), розташованих по радіусу  $R_0$  під час обертання ротора зі швидкістю  $V_p$  і подачі його на забій зі швидкістю  $V_e$  (див. рис. 1). Відокремлений від масиву ґрунт під деяким напірним зусиллям стружки надходить у внутрішні кільцеві робочі порожнини, що характеризуються

радіусами  $R_1$  і  $R_2$  та шириною ротора, за винятком товщини диска. Поступово накопичуючись там, ґрунт заклинюється у кожній з них за рахунок сили тяжіння, відцентрової сили, сил бічного розпору ґрунту та напору стружки, що зрізається, і в результаті дії сил тертя по поверхні кільцевих порожнин переміщуються ротором із забою. При цьому ґрунт, що виноситься, долає сили тертя об стінки траншеї, стінки кожуха ротора 8

(якщо він встановлений), сили тяжіння ґрунту, що транспортується, силу напору стружки, яка зрізується, та силу відпору розвантажувальних скребоків.

Підвищена увага до питання створення високопродуктивних конструкцій робочих органів безківшевого типу пояснюється їх передбачуваними перевагами порівняно з роторними ківшевими та ланцюговими скребокними і ківшевими робочими органами, а саме:

- теоретична продуктивність безківшевого ротора по виносу ґрунту із забою вище, ніж ківшевих і скребокних, внаслідок транспортування ґрунту із траншеї суцільним потоком, а не окремими порціями;
- конструкції робочих органів дозволяють реалізувати на їх приводі будь-яку потужність, що підводиться до них;
- примусове розвантаження робочого органу за допомогою скребоків виключає введення обмеження на швидкість різання ґрунту, що забезпечує гравітаційне розвантаження і надає можливість розробки ґрунту на підвищених швидкостях різання без високодинамічного та енергоємного відцентрового розвантаження.

Аналіз робочих процесів безківшевих роторних робочих органів показує певну нерациональність використання сили напору потоку ґрунту, що переміщується в роторі із забою для його розвантаження на сторони від траншеї. Попередні розрахунки й експериментальні дослідження підтверджують значущість сили напору потоку ґрунту, що транспортується в роторі, та слугують підставою для формулювання наукової гіпотези цієї роботи, суть якої полягає в наступному: розвантаження внутрішніх кільцевих порожнин безківшевого ротора у процесі копання траншей і переміщення піднятого ґрунту на сторони від траншеї є можливим за рахунок раціонального використання сили напору потоку ґрунту, що транспортується в роторі із забою. Для цього, очевидно, необхідно, щоб розвантажувальний вузол був встановлений в зоні ротора, де сила напору потоку ґрунту, що переміщується із забою, є найбільшою, а конструкція розвантажувального вузла має створювати мінімальний опір переміщенню ґрунту із ротора на задану відстань від траншеї.

Величина сили напору потоку ґрунту, що транспортується в кожній з двох внутрішніх кільцевих порожнин безківшевого ротора,  $F_H$  (рис. 2), обумовлена його конструктивними

параметрами, швидкостями різання ґрунту і подачі робочого органу екскаватора на забій, а також фізико-механічними характеристиками розроблюваних ґрунтів.

Визначимо характер зміни сили напору потоку ґрунту, що транспортується у внутрішній кільцевій порожнині поза зоною забою на ділянці «денна поверхня забою – верхня точка ротора».

Розглянемо випадок, коли передня частина ротора поза забоем закрита напрямним кожухом.

Приймаємо, що ґрунт, який транспортується ротором, є ізотропним і за обсягом, і в часі, пульсація потоку ґрунту і різниця у швидкостях переміщення окремих шарів потоку відсутні, зовнішня кільцева порожнина ротора заповнена ґрунтом.

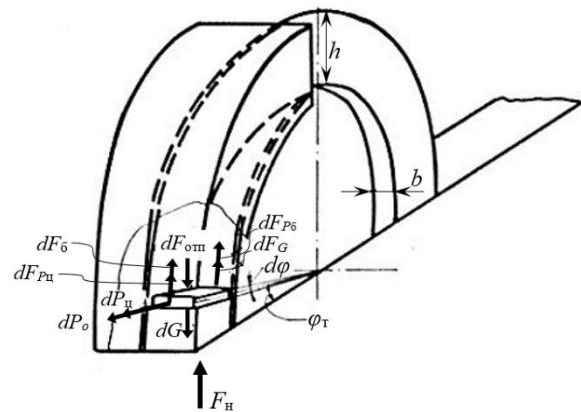


Рис. 2. Розрахункова схема транспортування ґрунту у внутрішніх кільцевих порожнинах безківшевого ротора

Виділимо в потоці ґрунту, що транспортується, елементарну ділянку  $ds$  і розглянемо дію на неї сил, що визначають її переміщення (див. рис. 2). На ґрунт елементарної ділянки  $ds$  діє сила ваги  $dG$ , відцентрова сила  $dP_{\text{ц}}$ , сила бічного розпору ґрунту  $dP_{\text{б}}$ , викликана опором переміщенню ґрунту елементарної ділянки  $dF_{\text{отм}}$ . Лінії дії сил бічного розпору ґрунту є перпендикулярними вектору швидкості переміщення елементарної ділянки. Переміщення ґрунту елементарної ділянки у внутрішній кільцевій порожнині ротора розглядаємо в полярній системі координат, центр обертання радіус-вектора якої розташований у центрі обертання ротора.

Під дією сил  $dG$ ,  $dP_{\text{ц}}$ ,  $dP_{\text{б}}$  або їх складових, під час переміщення ґрунту виникають відповідні цим силам складові сил тертя ґрунту об поверхню обичайки ротора, а також

об ґрунт, що транспортується в зовнішній кільцевій його порожнині. У кінцевому рахунку сума цих сил, за вирахуванням сил опору переміщенню ґрунту на обраній ділянці, визначають величину збільшення сили напору ґрунту, що транспортується.

Питома сила бокового розпору ґрунту визначається згідно із залежністю [6]:

$$dg = \xi \cdot dP, \quad (1)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт бічного тиску;  $dP$  – сила тиску;  $dg$  – бічний тиск на елементарну ділянку.

Значення коефіцієнта  $\xi$  визначається за Г.К. Клейном [6] і змінюються в межах 0,4...0,7 залежно від стану і категорії ґрунту.

Таким чином, сила бічного розпору ґрунту  $dP_6$ :

$$dP_6 = \xi \cdot d \cdot P_{\text{отп.}} \quad (2)$$

Сила  $dF_{\text{отп.}}$ , прикладена до ґрунту елементарної ділянки, визначається як складова сили ваги ґрунту, розташованого вище елементарної ділянки, тобто:

$$dF_{\text{отп.}} = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \phi_{\text{т}} - \frac{d\phi}{2} \right) \times \cos \left( \frac{\phi_{\text{т}}}{2} + \frac{d\phi}{4} + \frac{\pi}{4} \right),$$

а з урахуванням незначної величини кута  $d\phi$  вираз трансформується:

$$dF_{\text{отп.}} = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \phi_{\text{т}} \right) \times \cos \left( \frac{\phi_{\text{т}}}{2} + \frac{\pi}{4} \right), \quad (3)$$

де  $R_{\text{тр.}}$  – радіус внутрішньої кільцевої порожнини ротора, що описується по поверхнях траверс, зверненим до центру його обертання;  $R_0$  – радіус обичайки ротора;  $b$  – ширина внутрішньої кільцевої порожнини;  $\gamma$  – щільність ґрунту, що транспортується;  $\phi_{\text{т}}$  – поточна координата положення елементарної ділянки ґрунту.

Вага ґрунту елементарної ділянки дорівнює:

$$dG = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma}{2} \cdot d\phi. \quad (4)$$

Відцентрова сила, що діє на ґрунт елементарної ділянки:

$$dP_{\text{ц}} = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma \cdot V^2}{2 \cdot R_{\text{кр.}} \cdot g} \cdot d\phi, \quad (5)$$

де  $R_{\text{кр.}}$  – середній радіус внутрішньої кільцевої порожнини ротора;  $V$  – швидкість переміщення ґрунту у внутрішній кільцевій порожнині;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Визначимо зовнішні сили, що діють на ґрунт елементарної ділянки в напрямку, перпендикулярному до поверхні обичайки ротора і поверхні ґрунту у внутрішній кільцевій порожнині.

До поверхні обичайки прикладені такі сили:

$$dP_6 = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \phi_{\text{т}} \right) \cdot \cos \left( \frac{\phi_{\text{т}}}{2} + \frac{\pi}{4} \right);$$

$$dP_{\text{ц}} = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma \cdot V^2}{2 \cdot R_{\text{кр.}} \cdot g} \cdot d\phi; \quad (6)$$

$$dG = \frac{(R_{\text{тр.}}^2 - R_0^2) \cdot b \cdot \gamma}{2} \cdot \sin \phi_{\text{т}}.$$

До поверхні ґрунту в зовнішній кільцевій порожнині прикладені ті ж сили, однак при цьому знаки сил  $dP_{\text{ц}}$  і  $dG$  змінюються, відповідно, на протилежні.

Сили тертя потоку ґрунту, що транспортується на розвантаження, об поверхню обичайки і поверхню ґрунту:

$$dF_{\text{тр.о.}} = (dP_6 - dP_{\text{ц}} + dG) \cdot f_1; \quad (7)$$

$$dF_{\text{тр.н.п.}} = (dP_6 - dP_{\text{ц}} + dG) \cdot f_2, \quad (8)$$

де  $f_1$  і  $f_2$  – коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя ґрунту.

З урахуванням вищевикладеного, збільшення сили напору транспортованого ґрунту  $dF_{\text{н}}$  в загальному вигляді визначається згідно наступного виразу:

$$dF_{\text{н}} = dP_6(f_1 + f_2) + dP_{\text{ц}}(f_1 - f_2) - dG(f_1 - f_2) - dF_{\text{отп.}} \quad (9)$$

Система рівнянь (1)–(9) являє собою, в першому наближенні, математичну модель зміни сили напору потоку ґрунту в роторі.

Вирішуючи систему рівнянь, визначено характер зміни приросту сили напору потоку ґрунту опору переміщенню і сумарної сили тертя  $\Sigma F_{\text{тр.}}$ , що сприяє транспортуванню ґрунту у внутрішній кільцевій порожнині при зміні значення кутової координати  $\phi_{\text{т}}$ .

Графічна інтерпретація отриманих результатів розрахунків наведена на рис. 3.

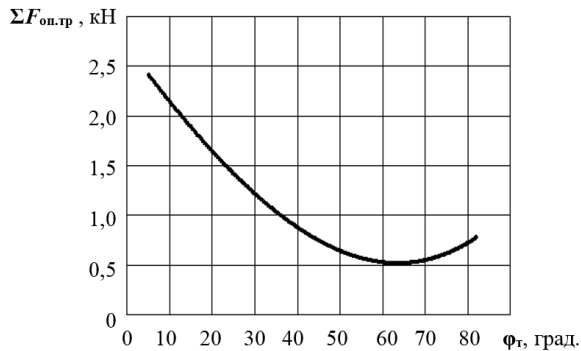


Рис. 3. Зміна сил опору транспортуванню ґрунту  $\Sigma F_{\text{оп.тр}}$  в залежності від кутової координати  $\varphi_{\text{т}}$

### Висновки

Отримані закономірності зміни сил тертя, які сприяють транспортуванню ґрунту в робочих порожнинах ротора поза зоною забою, сили опору транспортуванню та їх аналіз дозволяють стверджувати, що максимальне значення кутової координати установки ґрунтознімача у внутрішній кільцевій порожнині ротора не повинно перевищувати  $\varphi_{\text{т}} = 40 \dots 50^\circ$ .

### Література

1. Машины для земляных работ : навальный посібник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке та ін. / під загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. – Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. – 557 с.
2. Домбровский Н.Г. Удельное усилие копания, развиваемое цепными траншейными экскаваторами/ Г. Домбровский, И.Л. Ципурский // Известия ВУЗов. – М. : Машиностроение.– 1969. – № 1. – С. 15–17.
3. Домбровский Н.Г. Многоковшовые экскаваторы. Конструкция, теория, расчет. – М. : Машиностроение, 1972. – 432 с.
4. Николаев С.Н. К оценке сопротивления грунта копанию на рабочем органе роторного траншейного экскаватора / С.Н. Николаев // Строительные и дорожные машины. – 1973. – № 12. – С. 7–8.
5. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. – М. : Машиностроение, 1977. – 289 с.
6. Алексеева Т.В. Машины для земляных работ /Т.В. Алексеева, К.А. Артемьев, А.А. Бромберг [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 504 с.

### References

1. Khmra L.A., Kravets S.V., Nichke V.V. (2010) *Mashyny dlia zemlianykh robot : navchalnyi posibnyk* [Machines for earthworks: textbook] Rivne – Dnipropetrovsk – Kharkiv 557 p. [in Ukrainian].

2. Dombrovskiy, N.G., Tsepurskiy I.L. (1969) *Udelnoe soprotivlenie kopaniyu zarubezhnykh rotornykh transheynykh eksravatorov*. [Digging resistivity of foreign rotary trench excavators] Izvestiya VUZov. [Proceedings of universities]. Moskva, , pp. 15-17 [in Russian].
3. Dombrovskiy, N.G. (1972) *Mnohokovshovye ekskavatory. Konstruktsiya, teoriya y raschet* [Multi bucket excavators. Construction, theory and calculation] Moskva, 432 p. [in Russian].
4. Nikolaev S.N. (1973) *K otsenke soprotivleniya grunta kopaniyu na rabochem organe rotornogo transheyного экскаватора* [By digging the soil resistance evaluation on the working body of the rotary trencher]. *Stroitelnye i dorozhnye mashyny* [Building and road machines] Moscow, issue 12, p.p. 7-8. [in Russian]
5. Fedorov D. Y. (1977) *Rabochye orhany zemleroinykh mashyn* [The working bodies earthmoving machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, - 289 p. [in Russian].
6. Alekseeva T.V., Artemev K.A., Bromberg A.A. (1972) *Mashyny dlia zemlianykh robot* [Machines for earthworks] Moscow: Mashynostroenie [in Russian].

Мусійко Володимир Данилович<sup>1</sup>, д.т.н., зав. каф. дорожніх машин, тел. +38 050-104-02-62, musvd@i.ua,

Коваль Андрій Борисович<sup>1</sup>, к.т.н., доцент каф. дорожніх машин, тел. +38 050-024-08-94, kandr@i.ua,

Олсїнікова Олександра Михайлівна<sup>1</sup>, к.т.н., асистент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, тел.: +38095-884-92-83, [olexandrachaplygina@gmail.com](mailto:olexandrachaplygina@gmail.com)

<sup>1</sup>Національний транспортний університет, 01010, Україна, м. Київ,

вул. М. Омеляновича-Павленка, 1.

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### Defining the rational installation position for the discharging unit of the bucketless rotary implement in the trenching excavator

**Abstract. Problem.** The increasing volumes of the earthworks performed by trenching excavators during the creation of the lengthy excavations in the soil for the pipelines of different sizes and other purposes create the need to improve the excavators, to create new highly productive machines of the fundamentally new construction. **The goal** of this work is to increase the performance of trenching excavators equipped with the bucketless rotary implement by improving the process of the soil discharging from the implement. To achieve this goal it is required to reveal the physical essence of the soil excavation by the bucketless rotary implement and based on the performed study to determine the rational installation position for the discharging unit of the

bucketless rotor. **Methodology.** The scientific hypothesis is that discharging of the inner circular cavities of the bucketless rotor during the trench digging and the movement of the excavated soil to the side from the trench is possible by means of rational use of the flow header pressure of the soil that is being transported in the rotor from the excavation. The study is performed with analytical methods using basic principles of the theoretical mechanics, flowing medium statics, force analysis. **Results.** The study confirms the scientific hypothesis of the possibility to discharge the bucketless rotary implements of the trenching excavators by using the flow header pressure of the excavated soil that is transported by the rotor from the excavation, rational installation position of the discharging unit of the implement is defined. **Originality.** The scientific novelty of the study lays in the rationale and confirmation of the possibility to excavate and transport the soil from the excavation with the implements of the rotary trenching excavators with continuous flow and not with the

separate portions. **Practical value.** Practical value lays in ensuring the 2-5 times performance increase of the excavation using the bucketless rotary implements.

**Key words:** soil, excavator, head, unloading, rotor, force.

**Musiiko Volodymyr**<sup>1</sup>, professor, Doct. of Science, Department of Road Machines, [musvd@i.ua](mailto:musvd@i.ua), тел. +38 050-104-02-62,

**Koval Andrii**<sup>1</sup>, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Road Machines, tel. +38 050-024-08-94, [kandr@i.ua](mailto:kandr@i.ua)

**Olieinikova Oleksandra**<sup>2</sup>, PhD, Lecturer at the Department of Construction and Road-Building Machinery, tel.: +38095-884-92-83,

[olexandrachaplygina@gmail.com](mailto:olexandrachaplygina@gmail.com)

<sup>1</sup>National Transport University, 1, M. Omelianovi-cha-Pavlenka str., Kyiv, 01010, Ukraine.

<sup>2</sup>Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.