

УДК.621.879.4

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ҐРУНТУ В ЗЕМЛЕРИЙНІЙ МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ З БЕЗКІВШЕВИМ РОТОРНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

МУСИЙКО В. Д.^{1*}, *д.т.н., проф.*,
ГОНЧАР М. О.², *к.т.н., проф.*,
КУЧЕР О. П.³

^{1*} Кафедра дорожніх машин, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ, Україна, тел. +38 (044) 280-97-73, e-mail: musvd@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-9983-3296

² Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Національний транспортний університет, вул. Бойчука, 42, 01103, Київ, Україна, тел. +380672342879, e-mail: gmo48@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5288-6486

³ Кафедра дорожніх машин, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна, тел. +38 (044) 280-97-73, e-mail: kucher@cml.ua, ORCID ID: 0000-0002-5924-9068

Анотація. Постановка проблеми. Перевага землерийних машин з безківшевим роторним робочим органом полягає в тому, що вони розробляють та транспортують ґрунт із забоя у відвал безперервним потоком, а не окремими порціями, що характерно для машин з ківшевими чи ланцюгово-балковими робочими органами. Транспортування ґрунту роторними безківшевими робочими органами із забоя є двоетапним. На першому етапі переміщення ґрунту забезпечується силами тертя між потоками транспортованого ґрунту і ротором. Пасивне переміщення потоку розробленого ґрунту по поверхні розвантажувального вузла на другому етапі гальмує розвантаження. Для інтенсифікації розвантаження пропонується шарнірно закріплювати днище розвантажувального лотка і піддавати його вібрації у площині, перпендикулярній напрямку переміщення ґрунту. **Мета.** Створення математичної моделі, яка встановлює залежність роботи сил опору переміщенню ґрунту по лотку від параметрів віброколивень. **Висновок.** Отримано математичне співвідношення, що встановлює залежність роботи сил опору переміщенню ґрунту по розвантажувальному лотку від параметрів віброколивень. Виконані дослідження дозволять вибрати вібратор з необхідним діапазоном зміни амплітуди і частоти коливень для зменшення роботи сил опору переміщенню ґрунту по лотку. Це дозволяє підвищити продуктивність землерийної машини і надійність її роботи.

Ключові слова: землерийна машина; безківшевий ротор; лоток; переміщення ґрунту; вібратор; математична модель

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РАЗГРУЗКИ ҐРУНТА В ЗЕМЛЕРОЙНОЇ МАШИНІ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С БЕСКОВШОВЫМ РОТОРНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

МУСИЙКО В. Д.^{1*}, *д.т.н., проф.*,
ГОНЧАР М. А.², *к.т.н., проф.*,
КУЧЕР А. П.³

^{1*} Кафедра дорожніх машин, Національний транспортний університет, ул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, г. Київ, Україна, тел. +38 (044) 280-97-73, e-mail: musvd@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-9983-3296

² Кафедра теоретической и прикладной механики, ул. Бойчука, 42, 01103, Киев, Украина, тел. +380672342879, e-mail: gmo48@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5288-6486

³ Кафедра дорожных машин, Национальный транспортный университет, ул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Киев, Украина, e-mail: kucher@cml.ua, ORCID ID: 0000-0002-5924-9068

Аннотация. Постановка проблемы. Преимущество землеройных машин с бесковшовым роторным рабочим органом состоит в том, что они разрабатывают и транспортируют ґрунт из забоя в отвал непрерывным потоком, а не отдельными порциями, что характерно для машин с ковшовыми или цепно-балочными рабочими органами. Транспортирование ґрунта роторными бесковшовыми рабочими органами из забоя является двухэтапным. На первом этапе перемещение ґрунта обеспечивается силами трения между потоками транспортируемого ґрунта и ротором. Пассивное перемещение потока разработанного ґрунта по поверхности разгрузочного узла на втором этапе тормозит разгрузку. Для интенсификации разгрузки предлагается шарнірно крепить днище разгрузочного лотка и подвергать его вибрации в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения ґрунта. **Цель.** Создание математической модели, которая определяет зависимость работы сил сопротивления перемещению ґрунта по разгрузочному лотку от параметров виброколебаний. **Вывод.** Получены математические соотношения, которые определяют зависимость работы сил сопротивления перемещению ґрунта по лотку от параметров виброколебаний. Проведенные исследования позволяют выбрать вибратор с

необходимым диапазоном изменения амплитуды и частоты колебаний для уменьшения работы сил сопротивления перемещения грунта по лотку. Это позволяет повысить производительность землеройной машины и надежность ее работы.

Ключевые слова: землеройная машина; бесковшовый ротор; лоток; перемещение грунта; вибратор; математическая модель

SOIL UNLOAD INTENSIFICATION IN THE CONTINUOUSLY OPERATING EARTH-MOVING MACHINE WITH BUCKETLESS ROTARY IMPLEMENT

MUSIIKO V. D.^{1*}, *Doctor of Technical Sciences, professor*
 HONCHAR M. O.², *Ph.D., professor*
 KUCHER O. P.³

^{1*} National transport university, Mykhaila Omelianovycha–Pavlenka st., 1, 01010, Kiev, Ukraine, tel: +38 (044) 280-97-73, e-mail: musvd@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-9983-3296

² National transport university, Boichuka st. 42, 01103, Kiev, Ukraine, tel: +380672342879, e-mail: gmo48@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5288-6486

³ National transport university, Mykhaila Omelianovycha–Pavlenka st., 1, 01010, Kiev, Ukraine, tel: +38 (044) 280-97-73, e-mail: kucher@cml.ua, ORCID ID: 0000-0002-5924-9068

Abstract. Problem statement. The benefit of the earthmoving machines with bucketless rotary implement is that they are excavating and transporting the soil from the work face to the dump as a steady flow and not in batches which is typical for the bucket machines and machines with chainomatic braced implements. The transportation of the soil from the working face with the rotary bucketless implements is a two-phase process. In the first phase the transportation is carried out by friction forces between the soil flow and the rotor. However, the passive movement of the soil flow over the unloader assembly's surface at the second phase slows down the unloading. In order to intensify the unloading it is proposed to secure the bottom of the discharge tray with pivot-type coupling and subject it to vibration within the plane perpendicular to the direction of the soil movement. **Objective** - Create the mathematical model which determines the relation between work of the resistance against soil transportation over the discharge tray and the vibration parameters. **Conclusion** - The mathematical correlations which determine the relation between work of the resistance against soil transportation over the discharge tray and the vibration parameters have been obtained. The study allows to choose the vibrator with necessary range of amplitude and frequency to decrease the work of resistance against soil transportation over the discharge tray. This helps to improve the productivity and operational reliability of the earthmoving machine.

Key words: earthmoving machine; bucketless rotor; tray; soil transportation; vibrator, mathematical model

Постановка проблеми. Для виконання земляних робіт під час спорудження протяжних виїмок (траншей) прямокутного та трапецієвидного профілю розроблені та знайшли своє практичне застосування

землерійні машини обладнані безківшевими роторними робочими органами, рис.1. наприклад, екскаватори ЕТР-134, БТМ-4, ТМК-3.

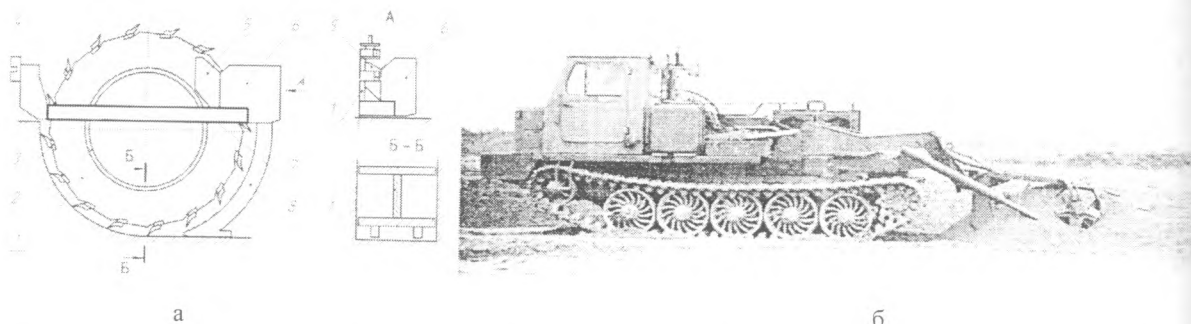


Рис. 1 Траншейний екскаватор ЕТР-134: а – конструктивна схема: 1 – ротор, 2 – обичайка, 3 – траверса, 4 – ріжучий елемент, 5 – ґрунтознімач, 6 – бермоутворювач, 7 – лонжерон рами, 8 – зачисний башмак; б – робочий процес траншейного екскаватора ЕТР-134

Перевага таких робочих органів перед ланцюгово-балковими та роторними ківшевими в тому, що під час копання траншей, ґрунт з забою переміщується ротором в зону розвантаження безперервним потоком, а не окремими порціями. Це дає змогу

стверджувати про їх потенційно більшу продуктивність, порівняно з іншими конструкціями робочих органів.

Аналіз публікацій. Робочі процеси традиційних типів робочого обладнання траншейних машин

висвітлені в багатьох наукових роботах [1-3], чого не можна стверджувати про безківшеві роторні робочі органи.

Безківшеві ротори мають примусове розвантаження розробленого та піднятого з забою ґрунту на сторони від відкопаної траншеї. Такі робочі органи практично не мають обмежень по швидкості різання ґрунту (швидкості обертання ротора), що характерно для ківшевих робочих органів траншейних машин. Розроблений ними ґрунт розвантажується за рахунок сил гравітації, або відцентрових сил. Теоретична можливість зміни швидкості різання ґрунту в межах від 1 до 8...10 м/с, дозволяє пропорційно збільшувати швидкість подачі робочого органа на забій, досягаючи таким чином відповідного збільшення продуктивності роботи машини під час спорудження траншеї заданого профілю [4, 5]. Це означає, що при відповідній швидкості подачі робочого органа, яка визначає його продуктивність по забою, забезпечується копання ґрунту з реалізацією повної потужності двигуна.

Розрахунки та результати виконаних нами експериментальних досліджень підтверджують значимість сил напору потоків ґрунту, що переміщується у внутрішніх кільцевих порожнинах ротора в зону розвантаження. Це дозволяє стверджувати, що розвантаження кільцевих порожнин безківшевих роторних робочих органів траншейних машин та переміщення піднятого з забою ґрунту на сторони від траншеї можливе за рахунок раціонального використання сил напору потоків ґрунту, що транспортуються ротором з забою.

В порядку реалізації викладеної ідеї використання енергії потоків ґрунту, що транспортуються безківшевим ротором, необхідно дооснастити його додатковим розвантажувальним вузлом лоткового типу та встановити в верхньому передньому секторі ротора, де сила напору потоків ґрунту, що транспортується у внутрішніх кільцевих порожнинах має найбільше значення [6]. Створення такого розвантажувального вузла, оснащеного ґрунтознімачами пасивного типу, та введеними у внутрішні кільцеві порожнини ротора, дозволить за рахунок сил напору потоків ґрунту в роторі досягти практично повного очищення внутрішніх кільцевих порожнин від ґрунту, і забезпечити переміщення його на сторони від траншеї на потрібну відстань. Ефективність переміщення розробленого ґрунту по лотках може бути суттєво підвищена шляхом дооснащення шарнірно встановлених на корпусі днищ лотків, по яких переміщується ґрунт, вібробуджувачами направленої дії з установкою днища кожного лотка під деяким кутом до горизонту [7]. Крім того, в результаті розвантаження ґрунту з внутрішніх кільцевих порожнин ротора, з'являється можливість гравітаційного розвантаження його із зовнішніх кільцевих порожнин у внутрішні з наступним переміщенням ґрунту з ротора на сторони

від траншеї. Це забезпечується з допомогою додаткового розвантажувального вузла, який складається із ґрунтознімачів, введених у внутрішні кільцеві порожнини ротора з обох його сторін та бермоутворювачів, що слугують периферійним продовженням ґрунтознімачів. Розвантажувальний вузол необхідно встановлювати в задньому верхньому секторі безківшевого роторного робочого органа над денною поверхнею ґрунту, як показано на рис. 2.

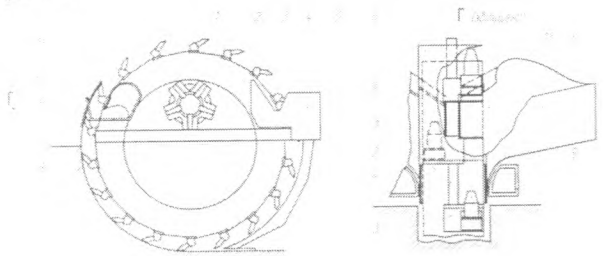


Рис. 2. Робочий орган з лотковим розвантажувальним вузлом: 1 – ротор, 2 – центральний диск, 3 – траверса, 4 – ріжучий елемент, 5 – рама, 6 – бермоутворювач, 7 – відвальна поверхня, 8 – днище лотка, 9 – перемичка, 10 – передня стінка лотка, 11 – ґрунтознімач/

Мета статті. Визначити шляхи підвищення ефективності розвантаження ґрунту з безківшевих робочих органів траншейних екскаваторів.

Основна частина. Оцінимо ефективність роботи лоткового розвантажувального вузла у випадку забезпечення вібраційних коливань днища лотка [8, 9]. Розрахункова схема дослідження приведена на рис. 3. Шарнірно закріплене у точці O днище лотка опирається на збуджувач гармонійних віброколивань в точці B .

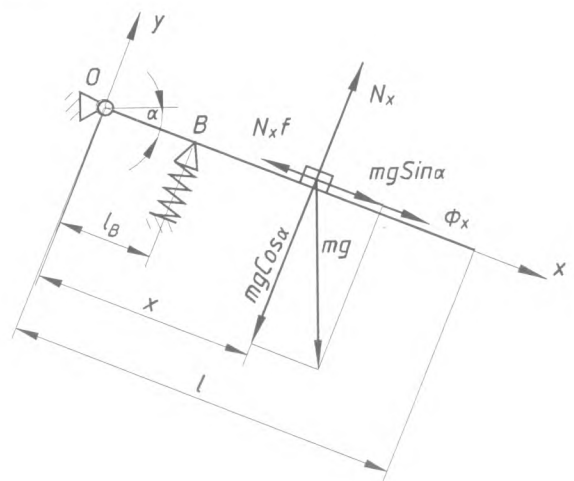


Рис. 3. Схема сил, які діють на частку ґрунту

Переміщення S_B , швидкість V_B і прискорення a_B точки B днища лотка, які є наслідком гармонійних віброколивань:

$$S_B = A \cdot \sin(\nu \cdot t), \quad (1)$$

$$V_B = \omega \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t), \quad (2)$$

$$a_B = -\nu^2 \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t), \quad (3)$$

де A – амплітуда коливань, ν – частота коливань, t – час.

Кутова швидкість ω_B і кутове прискорення ε_B лотка:

$$\omega_B = \frac{V_B}{l_B} = \frac{\omega \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t)}{l_B} \quad (4)$$

$$\varepsilon_B = \frac{a_B}{l_B} = -\frac{\nu^2 \cdot A \cdot \sin(\nu \cdot t)}{l_B} \quad (5)$$

Параметри віброколивань вибираються в діапазоні значень, за яких виключається відрив частки ґрунту від поверхні лотка.

Внаслідок вібрації днища лотка частка ґрунту, яка знаходиться на відстані x від осі O обертання днища лотка, має прискорення:

$$\vec{a}_m = \vec{a}_m^{\tau} + \vec{a}_m^n + \vec{a}_m^k, \quad (6)$$

де, \vec{a}_m^{τ} , \vec{a}_m^n і \vec{a}_m^k – складові прискорення частки ґрунту: тангенціальна, нормальна і Кореолісова відповідно. Модулі векторів складових прискорення частки ґрунту:

$$a_m^{\tau} = \varepsilon_B \cdot x = \nu^2 \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t) \frac{x}{l_B}, \quad (7)$$

$$a_m^n = \omega_B^2 \cdot x = (\nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t))^2 \frac{x}{l_B^2}, \quad (8)$$

$$a_m^k = 2V_x \cdot \omega_B = 2\nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t) \frac{V_x}{l_B}. \quad (9)$$

У формулі (9) V_x – лінійна швидкість частки ґрунту вздовж осі O_x . Виходячи з суцільності потоку ґрунту:

$$V_x = \frac{P}{S \cdot k_p}, \quad (10)$$

де P – продуктивність екскаватора; S – площа поперечного перерізу потоку ґрунту; k_p – коефіцієнт розпушування.

Величина реакції N_x з боку днища лотка на частку ґрунту масою m , яка діє по нормалі до поверхні днища (по нормалі до осі O_x) визначається як алгебраїчна сума складової ваги частки ґрунту $mg \cos \alpha$ і сил інерції $a_m^{\tau} \cdot m$ і $a_m^k \cdot m$, викликаних відповідно тангенціальною і кареолісовою складовими прискорення частки ґрунту:

$$N_x = m \cdot \left(g \cdot \cos \alpha + \nu^2 \cdot A \cos(\nu \cdot t) \frac{x}{l_B} + + 2 \cdot \nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t) \frac{V_x}{l_B} \right), \quad (11)$$

де g – прискорення вільного падіння; α – кут нахилу днища лотка.

Величина відцентрової сили інерції, викликана нормальною складовою прискорення частки ґрунту a_m^n , діє вздовж осі Ox :

$$\Phi_x = m \cdot \left(\frac{\nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t)}{l_B} \right)^2 x, \quad (12)$$

Елементарна робота по переміщенню dx ^{вздовж} осі Ox частки ґрунту масою m як такої, що знаходиться під дією сили тертя $f \cdot N_x$ (f – коефіцієнт тертя ґрунту об поверхню днища лотка), складової сили тяжіння $mg \sin \alpha$ і відцентрової сили інерції Φ_x :

$$dA = (f \cdot N_x - m \cdot g \cdot \sin \alpha - \Phi_x) dx. \quad (13)$$

Представимо переміщення dx як функцію часу t . За постійної швидкості V_x частки ґрунту, отримаємо вираз для визначення поточної координати x :

$$x = V_x \cdot t. \quad (14)$$

Елементарне переміщення

$$dx = V_x \cdot dt. \quad (15)$$

Час проходження частки ґрунту від точки O на відстань l (до кінця днища лотка) дорівнює:

$$t_1 = \frac{l}{V_x}. \quad (16)$$

Елементарна робота dA , виражена як функція часу:

$$dA = (f \cdot N_x - m \cdot g \cdot \sin \alpha - \Phi_x) V_x dx. \quad (17)$$

Робота по переміщенню частки ґрунту по похилому днищу лотка від точки O на відстань l (виконана за час t_1):

$$A = \int_0^{t_1} dA \quad (18)$$

Вираз (18) з урахуванням залежностей (11), (12), (14), (15), (16) і (17) набуває вигляду:

$$A = \int_0^{l/V_x} \left[\left(g \cdot \cos \alpha + \nu^2 \cdot A \cos(\nu \cdot t) \frac{V_x}{l} + + 2 \cdot \nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t) \frac{V_x}{l_B} \right) \cdot V_x dt - g \cdot \sin \alpha - \nu \cdot A \cdot \cos(\nu \cdot t) \frac{V_x \cdot t}{l_B} \right] \cdot V_x dt \quad (19)$$

Робота по переміщенню частки ґрунту по горизонтальному днищу лотка від точки O на відстань l за відсутності вібрації:

$$A' = m \cdot g \cdot f \cdot l \quad (17)$$

Подальше дослідження має бути спрямовано на визначення області існування раціональних значень A , ν , l_B і α , за яких різниця $A' - A$ буде максимальною.

Висновки.

1. Двоступеневе розвантаження ґрунту з безквішевих робочих органів траншейних машин забезпечує зменшення сили тяги на переміщення робочого органа в забої, крутного моменту на приводі ротора за рахунок підвищення ступеню очищення ротора від ґрунту та зменшення його переносу знову в забій.

2. Математичне співвідношення, яке встановлює залежність роботи сил опору переміщенню ґрунту по днищу лотка від параметрів віброколиваний дозволяє вибрати віброзбуджувач з необхідним діапазоном амплітуди і частоти коливаний для зменшення роботи сил опору переміщенню ґрунту по днищу лотка.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гарбузов З. Е. Экскаваторы непрерывного действия / З. Е. Гарбузов, В. М. Донской, Н. В. Карев, Л. Е. Подборский. – М.: Высшая школа, 1975. – 320 с.
2. Домбровский Н. Г. Многоковшовые экскаваторы / Н. Г. Домбровский. – М.: Машиностроение, 1972. – 431 с.
3. Мусійко В. Д. Екскаватори поздовжнього копання / В. Д. Мусійко. – К.: Віпол, 2008. – 240 с.
4. Ципурский И. Л. Исследование работы роторного траншеекопателя ЭТР-131 / И. Л. Ципурский // Известия ВУЗов. – М., 1973. – № 5. – С. 32–43.
5. Нарышкина В. Л. Прогнозирование развития траншейных экскаваторов / В. Л. Нарышкина // Строительные и дорожные машины. – М., 1972. – №11. – 6-10 с.
6. А.с. № 1401117 СССР, МПК4 E02F5/08. Рабочий орган роторного экскаватора. В. Д. Мусійко, В. Ф. Маслов, О. Ф. Федоренков, А.В. Быков, П. А. Подзигун, А. А. Пискарев, В. В. Гаврилов, В. И. Федорков. – № 4072047/29-03 ; заявл. 31.01.1986 ; опубл. 07.06.1988, Бюл. № 21.
7. Патент на винахід № 99049 Україна. МПК(2006.01) E02F 3/18, E02F 3/22, E02F 5/08. Робочий орган роторного екскаватора / М. Ф. Дмитриченко, В. Д. Мусійко, М. О. Білякович, М. П. Кузьминець, Ю. М. Клименко; власник Національний транспортний університет ; – № a201103428. заявл. 23.03.2011. опубл. 26.09.2011, бюл. № 18.
8. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В. Н. Челомей (пред.). – М: Машиностроение, 1981 – Т. 4. Вибрационные машины и процессы. – Под ред. Э. Э. Лавендела. 1981, – 509 с.
9. Гончар М. О. Теорія механізмів і машин: підручник. – К.: Видавничий дім «Вініченко», 2011. – 456 с.

REFERENCES

1. Garbuzov Z. E. *Ekskavatory nepreryvnogo deystviy* [Excavators of continuous action] / Z. E. Garbuzov, V. M. Donskoy, N. V. Karev, L. E. Podborskiy/ – Moscow: *Vysshaya shkola*, 1975. – 320 p. (in Russian).
2. Dombrovskiy N. G. *Mnogokovshovyye ekskavatory* [Multi-bucket excavators] / N. G. Dombrovskiy. – Moscow: *Mashinostroyeniye*. 1972. – 431 p. (in Russian).
3. Musiiko V. D. *Ekskavatory pozdovzhnoho kopannia* [Length digging excavators] / V. D. Musiiko. – Kyiv: *Vipol*, 2008. – 240 p. (in Ukrainian).
4. Tsipurskiy I. L. *Issledovaniye raboty rotornogo transheyekopatelya ETR-131* [Research of the work of the rotary trencher ETR-131] / I. L. Tsipurskiy // *Izvestiya VUZov*. – Moscow, 1973. – № 5. – P. 32–43. (in Russian).
5. Naryshkina V. L. *Prognozirovaniye razvitiya transheynykh ekskavatorov* [Forecasting the development of trench excavators] / V. L. Naryshkina // *Stroitelnyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines]. – Moscow, 1972. – №11. – 6-10 p. (in Russian).
6. Patent 1401117 USSR. MPK4 E02F5/08. *Rabochiy organ rotornogo ekskavatora* [Working attachment of a rotor excavator]. V. D. Musiiko, V. F. Maslov, O. F. Fedorenkov, A.V. Bykov, P. A. Podzigun, A. A. Piskarev, V. V. Gavrilo, V. I. Fedorkov // Claimed. 31.01.1986 ; publ. 07.06.1988. Bull. № 21. (in Russian).
7. Patent 99049Ukraine. IPC (2006.01) E02F 3/18, E02F 3/22, E02F 5/08. *Robochiy orhan rotornoho ekskavatora* [Working attachment of a rotor excavator] / M. F. Dmytrychenko, V. D. Musiiko, M. O. Biliakovych, M. P. Kuzminei, Yu. M. Klymenko // Claimed 23.03.2011. publ. 26.09.2011. Bull. № 18. (in Ukrainian).
8. Lavendela E. E. *Vibratsionnyye mashiny i protsessy* [Vibrating machines and processes]. – Moscow: *Mashinostroyeniye*. 1981. – 509 p.
9. Honchar M. O. *Teoriia mekhanizmiv i mashyn: pidruchnyk* [Theory of mechanisms and machines: textbook.]. – Kyiv.: *Vydavnychiy dim «Vinichenko»*, 2011. – 456 p. (in Ukrainian).