

Галузеве машинобудування

УДК 621.878.23:681.3

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0601>**¹Микола Пристайло,**кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних машин, <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>,
e-mail: prystailo.mo@knuba.edu.ua**¹Ігор Гонта,**аспірант кафедри будівельних машин, <https://orcid.org/0009-0002-4441-8049>,
e-mail: honta_ip-2022@knuba.edu.ua¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ПОБУДОВА ФІЗЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗАННЯ ГРУНТІВ НАКОНЕЧНИКОМ З ДИНАМІЧНОЮ РІЖУЧОЮ КРОМКОЮ НА ПНЕВМОАКУМУЛЯТОРІ

АНОТАЦІЯ. У даній роботі розглянуто створення фізичної моделі установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі для проведення експериментальних досліджень. З метою дослідження процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, для яких, як правило, використовуються натурні об'єкти дослідження або їх моделі. При фізичному моделюванні зберігається фізична природа явищ, але змінюється їх масштаб. Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується силовим рівнянням із врахуванням їх параметрів. При цьому параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності. В результаті ділення відповідних доданків силових рівнянь натурної установки та моделі між собою отримано систему з п'яти рівнянь, яка зв'язує між собою сімнадцять невідомих величин коефіцієнтів подібності. Дванадцять з цих величин було задано з конструктивних міркувань, а п'яти коефіцієнтів розраховано.

Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі, що подібна натуральному робочому органу розпушника установці для різання ґрунтів. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. В якості робочого середовища запропоновано використання парафін виходячи з його оптичних властивостей під навантаженням.

Ключові слова: установка, фізична модель, різання, робочий орган, середовище, моделювання, коефіцієнти подібності, наконечник, динамічна ріжуча кромка, пневмоакумулятор.

CONSTRUCTION OF A PHYSICAL MODEL FOR RESEARCHING SOIL CUTTING WITH A TIP WITH A DYNAMIC CUTTING EDGE ON A PNEUMATIC ACCUMULATOR

ABSTRACT. This paper considers the creation of a physical model of a soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator for conducting experimental studies. In order to study the process of interaction of the working body with the working environment, it is necessary to conduct experimental studies, for which, as a rule, full-scale research objects or their models are used. In physical modeling, the physical nature of phenomena is preserved, but their scale changes. Using the similarity theorem and physical modeling, the similarity conditions of the soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator were determined, in which the interaction of the working body and the working medium is described by a force equation taking into account their parameters. In this case, the

parameters of the natural process of interaction between the working body and the working environment are recorded through the parameters of the physical model and similarity coefficients. As a result of dividing the corresponding terms of the force equations of the full-scale installation and the model, a system of five equations was obtained, which connects seventeen unknown values of the similarity coefficients. Twelve of these values were given for design reasons, and five coefficients were calculated.

The obtained values of the similarity coefficients made it possible to build a physical model of a soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator, which is similar to the natural working body of a soil cutting device. The use of paraffin as a working medium is proposed based on its optical properties under load.

Keywords: *installation, physical model, cutting, working body, environment, modeling, similarity coefficients, tip, dynamic cutting edge, pneumatic accumulator.*

1. Постановка проблеми. З метою перевірки адекватності теоретичних досліджень проводяться експериментальні дослідження з наступним порівняльним аналізом результатів отриманих в процесі теоретичних і експериментальних досліджень.

Моделювання процесів різання ґрунтів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у будівельній, сільськогосподарській та гірничій галузях. Воно дає змогу системно вивчати взаємодію робочих органів землерийних машин з ґрунтовим середовищем, що у реальних умовах часто є надзвичайно складним і ресурсоємним завданням. Завдяки моделюванню можна відтворювати різноманітні сценарії роботи техніки, аналізувати фактори, що впливають на процес різання, та отримувати результати з високим рівнем точності без проведення численних натурних випробувань.

Основна мета такого моделювання полягає у визначенні силових та енергетичних характеристик процесу, серед яких: сила опору ґрунту, вплив швидкості руху та глибини різання, геометрія та форма ріжучого інструмента. Важливим завданням є також дослідження динаміки взаємодії робочого органу з ґрунтом, де враховуються інерційні сили, коливання та удари, які істотно впливають на ефективність і довговічність обладнання.

Особливе значення має можливість відтворювати процеси деформації, руйнування і переміщення ґрунту. Це досягається завдяки використанню різних підходів:

- математичного моделювання, що базується на рівняннях механіки суцільного середовища та емпіричних залежностях;
- чисельного моделювання (метод скінченних елементів, метод дискретних елементів), яке дає змогу враховувати особливості структури ґрунту, зокрема його вологість, щільність, кут внутрішнього тертя та когезію;
- фізичного моделювання у лабораторних умовах, коли створюються спрощені аналоги реальних процесів для підтвердження достовірності обчислювальних моделей.

Результати моделювання мають широкий спектр практичного застосування. Вони дозволяють оптимізувати форму та кут установки робочих органів, мінімізувати витрати енергії на різання ґрунту, підвищити продуктивність машин, а також забезпечити їхню універсальність у різних типах ґрунтів — від легких піщаних до важких глинистих. Крім того, моделі використовуються для оцінки зносу ріжучих елементів, прогнозування їхнього ресурсу та розробки конструкцій із підвищеною довговічністю.

Не менш важливою перевагою моделювання є можливість прогнозування роботи техніки в екстремальних умовах, де проведення реального експерименту є ускладненим або навіть небезпечним. Це стосується, наприклад, досліджень у мерзлих ґрунтах, у зонах підвищеної вологості чи при роботі під великим тиском.

Отже, моделювання процесів різання ґрунтів виступає потужним науковим і практичним інструментом, що поєднує аналітичну точність, економічну ефективність та безпечність. Воно дозволяє не лише глибше зрозуміти механіку ґрунтових процесів, але й забезпечує створення інноваційних технічних рішень для сучасної будівельної та землерийної техніки [1].

В наш час створення натурального робочого органу з метою проведення експериментальних досліджень привело б до значної затрати часу та коштів. Враховуючи це, постає задача створення фізичної моделі і проведення на ній повноцінних експериментальних досліджень.

2. Аналіз останніх досліджень. Фізичне моделювання зберігає фізичну природу явищ, але змінює їх масштаб. Сенс фізичного моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів на моделях можна було достовірно оцінити характер ефектів і кількісні взаємозв'язки між величинами, які визначають фізично подібні явища в натурних умовах [2].

В основу фізичного моделювання закладено теорію подібності [3], що опирається на аналіз розмірностей, а саме: об'єкти є подібними, якщо у відповідні моменти часу у відповідних точках об'єктів значення змінних величин, що характеризують стан одного об'єкта (натури), пропорційні відповідним значенням величин іншого об'єкта (моделі). В подібних об'єктах характеристики натурного об'єкта можуть бути отримані простим перерахунком із характеристик модельного об'єкта, що визначається експериментально. Для всіх величин відповідної розмірності таким множником є коефіцієнт подібності.

У дослідженнях процесів різання ґрунтів критерії подібності відіграють ключову роль, оскільки дозволяють переносити результати, отримані на лабораторних моделях або в комп'ютерних симуляціях, на реальні машини та механізми. Подібність означає, що модель і натурний об'єкт мають однакові закономірності поведінки, навіть якщо відрізняються масштабом чи умовами дослідження.

Для забезпечення коректності моделювання у ґрунтомеханіці розглядають три основні рівні подібності:

- **геометрична подібність** — модель робочого органу та зони різання повинна зберігати пропорції щодо реальних конструкцій;
- **кінематична подібність** — відношення швидкостей і прискорень руху інструмента у моделі й у натурних умовах має збігатися;
- **динамічна подібність** — співвідношення сил, що діють під час різання (інерційних, гравітаційних, сил тертя та опору ґрунту), повинно залишатися однаковим.

У практиці досліджень процесів різання ґрунтів використовують різні критерії подібності, серед яких:

- **число Фруда (Fr)** — відображає співвідношення сил інерції та сили тяжіння, важливе для оцінки руху ґрунтових мас;
- **число Рейнольдса (Re)** — характеризує співвідношення сил інерції й в'язкості, що впливає на поведінку ґрунту при різних швидкостях;
- **число Кулона (Cu)** — відношення сил зчеплення ґрунту до нормального тиску, яке визначає умови його руйнування;
- **відносна глибина різання (h/l)** — співвідношення між глибиною занурення інструмента та його характерним розміром, що впливає на величину опору.

Дотримання критеріїв подібності під час моделювання дозволяє:

1. Отримувати результати, що адекватно відображають поведінку ґрунту при роботі реальних машин.
2. Зменшити кількість дорогих натурних експериментів.
3. Прогнозувати енергетичні витрати на різання ґрунтів у різних умовах.
4. Оптимізувати конструкцію робочих органів землерийної техніки ще на етапі проєктування.

Таким чином, критерії подібності є науковою основою, яка забезпечує правильність перенесення результатів з моделі на реальний об'єкт і підвищує ефективність досліджень у галузі механіки ґрунтів та будівельної техніки.

В якості критеріїв подібності для побудови фізичної моделі використовуються безрозмірні комплекси, які являють собою відношення відповідних складових рівнянь взаємодії робочого органу з середовищем реального об'єкта і моделі [4].

Отже, методологія моделювання робочих процесів різання ґрунтів наконечником з ДРКП базується на теорії подібності.

Умови фізичного моделювання робочого процесу різання ґрунтів наконечник з ДРКП [5-7] передбачають, що: визначаючі критерії подібності різання ґрунтів для моделі і оригіналу повинні бути однаковими; однойменні фізичні параметри рівнянь, що описують робочий процес, складених для моделі і оригіналу, повинні бути відповідно пропорційними; процес взаємодії наконечника з ДРКП з середовищем в моделі і оригіналі повинен належати до одного класу явищ і описуватися однаковою системою рівнянь; модель і оригінал наконечника з ДРКП і системи в цілому повинні бути геометрично подібні; початкові умови, що характеризують робочий процес в моделі, повинні бути подібні відповідним умовам оригіналу; граничні умови моделі повинні бути подібні граничним умовам оригіналу.

3. Мета роботи. Визначення параметрів та побудова фізичної моделі установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП.

4. Виклад основного матеріалу. На рис. 1 та 2 представлено бульдозер з розпушником наконечник якого обладнаний ДРКП [8], що складається з базової машини бульдозерного та розпушувального обладнання. На стійці розпушника 1, встановлено наконечник 2, динамічну ріжучу кромку 3, з пневмоакумулятором 4.

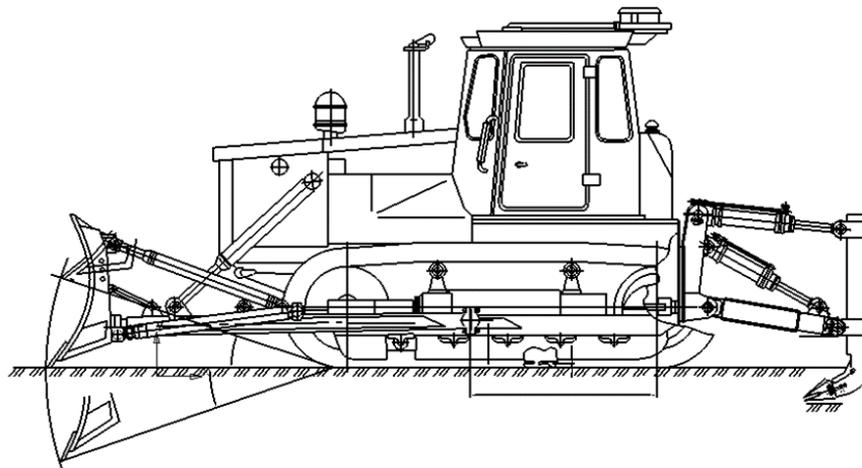


Рис.1. Бульдозер з розпушником, наконечник якого обладнаний ДРКП
Fig. 1. Bulldozer with a tiller tip equipped with a DRKP

Така конструкція забезпечує накопичення потенціальної енергії під час зминання ґрунту з її подальшим перетворенням у кінетичну та спрямуванням у масив ґрунту в оптимальний момент часу [9].

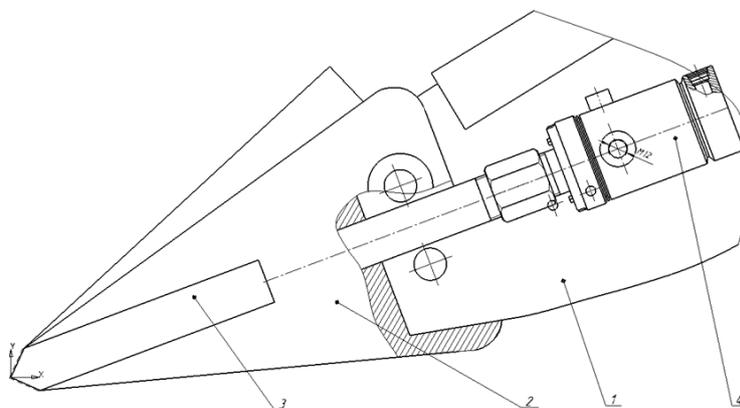


Рис.2. Наконечник розпушника, який обладнаний ДРКП
Fig. 2. The tip of the tiller equipped with a DRKP

Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання [10], визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується рівнянням [11]:

$$P_S = m_f H b_k + 2m_{si} H^2 + 2m_{si.c} H - \left(\frac{u k_D S_{pic}}{2V_{pic} k_\alpha} - E_A \Delta x D_c \sin \lambda \right) \frac{l}{l_c} l_{pic} \sin \lambda, \quad (1)$$

де m_f – питома сила різання для подолання опору ґрунту передньою гранню наконечника при куті різання 45° ; H – глибина різання, м; b_k – ширина наконечника; $m_{si}, m_{si.c}$ – коефіцієнти, що характеризують питомі сили опору ґрунту руйнуванню в бічних розширеннях і зрізу бічними ребрами ножа; k_D – питомий опір ґрунту динамічному руйнуванню; V_{pic} – швидкість впровадження; u – швидкість розповсюдження хвилі деформації в масиві ґрунту; k_α – коефіцієнт кута загострення; E_A – відповідно модуль деформації повітря та ґрунту; Δx – переміщення ДРКП; D_c – діаметр пневмоакумулятора; l_{pic} – довжина стисненої зони ґрунту внаслідок навантаження в зоні ДРКП; l_c – довжина сколу елемента ґрунту; λ – задній кут наконечника.

Площу контакту можна представити через добуток ширини наконечника та висоти ДРКП:

$$S_{pic} = b_k h_{pic}. \quad (2)$$

Тоді вираз (1) набере вигляду:

$$P_S = m_f H b_k + 2m_{si} H^2 + 2m_{si.c} H - \frac{u \cdot k_D \cdot b_k \cdot h_{pic} \cdot l_{pic}}{2 \cdot V_{pic} \cdot k_\alpha \cdot l_c} \sin \lambda + \frac{E_A \cdot \Delta x \cdot D_c \cdot l_{pic}}{l_c} \sin^2 \lambda, \quad (3)$$

Для виконання умов подібності процесів, що відбуваються при взаємодії з середовищем фізичної моделі оригіналу робочого органу необхідне дотримання рівності геометричних і динамічних критеріїв подібності [12]. При цьому параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності (таблиця 1):

- параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності:

$$\begin{aligned} P_{S_H} &= \delta_{P_S} \cdot P_{S_M}, m_{f_H} = \delta_{m_f} \cdot m_{f_M}, m_{si_H} = \delta_{m_{si}} \cdot m_{si_M}, m_{si.c_H} = \delta_{m_{si.c}} \cdot m_{si.c_M}, H_H = \delta_H \cdot H_M, b_{k_H} = \delta_{b_k} \cdot b_{k_M}, \\ k_{D_H} &= \delta_{k_D} \cdot k_{D_M}, k_{\alpha_H} = \delta_{k_\alpha} \cdot k_{\alpha_M}, h_{pic_H} = \delta_{h_{pic}} \cdot h_{pic_M}, V_{pic_H} = \delta_{V_{pic}} \cdot V_{pic_M}, l_{pic_H} = \delta_{l_{pic}} \cdot l_{pic_M}, \\ l_{c_H} &= \delta_{l_c} \cdot l_{c_M}, u_H = \delta_u \cdot u_M, E_{A_H} = \delta_{E_A} \cdot E_{A_M}, D_{c_H} = \delta_{D_c} \cdot D_{c_M}, \Delta x_H = \delta_{\Delta x} \cdot \Delta x_M, \lambda_H = \delta_\lambda \cdot \lambda_M \end{aligned} \quad (4)$$

- параметри натурної установки:

$$P_{S_H}, m_{f_H}, m_{si_H}, m_{si.c_H}, H_H, b_{k_H}, k_{D_H}, k_{\alpha_H}, h_{pic_H}, V_{pic_H}, l_{pic_H}, l_{c_H}, u_H, E_{A_H}, D_{c_H}, \Delta x_H, \lambda_H$$

- параметри фізичної моделі:

$$P_{S_M}, m_{f_M}, m_{si_M}, m_{si.c_M}, H_M, b_{k_M}, k_{D_M}, k_{\alpha_M}, h_{pic_M}, V_{pic_M}, l_{pic_M}, l_{c_M}, u_M, E_{A_M}, D_{c_M}, \Delta x_M, \lambda_M$$

- відповідні коефіцієнти подібності [13]:

$$\delta_{P_S}, \delta_{m_f}, \delta_{m_{si}}, \delta_{m_{si.c}}, \delta_H, \delta_{b_k}, \delta_{k_D}, \delta_{k_\alpha}, \delta_{h_{pic}}, \delta_{V_{pic}}, \delta_{l_{pic}}, \delta_{l_c}, \delta_u, \delta_{E_A}, \delta_{D_c}, \delta_{\Delta x}, \delta_\lambda$$

Тоді можна записати рівняння, подібні рівнянню (3), для натурної установки та її моделі, які мають вигляд:

$$\begin{aligned} P_{S_H} &= m_{f_H} H_H b_{k_H} + 2m_{si_H} H_H^2 + 2m_{si.c_H} H_H - \\ &- \frac{u_H \cdot k_{D_H} \cdot b_{k_H} \cdot h_{pic_H} \cdot l_{pic_H}}{2 \cdot V_{pic_H} \cdot k_{\alpha_H} \cdot l_{c_H}} \sin \lambda_H + \frac{E_{A_H} \cdot \Delta x_H \cdot D_{c_H} \cdot l_{pic_H}}{l_{c_H}} \sin^2 \lambda_H, \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{S_M} = m_{f_M} H_M b_{k_M} + 2m_{si_M} H_M^2 + 2m_{si.c_M} H_M - \frac{u_M \cdot k_{D_M} \cdot b_{k_M} \cdot h_{pic_M} \cdot l_{pic_M} \sin \lambda_M + \frac{E_{A_M} \cdot \Delta x_M \cdot D_{c_M} \cdot l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}{2 \cdot V_{pic_M} \cdot k_{\alpha_M} \cdot l_{c_M}} \quad (6)$$

Виходячи з подібності моделі і натурної установки, поділено відповідні доданки рівнянь (5) і (6) між собою і записано співвідношення:

$$\frac{P_{S_H}}{P_{S_M}} = \frac{m_{f_H} H_H b_{k_H}}{m_{f_M} H_M b_{k_M}} = \frac{2m_{si_H} H_H^2}{2m_{si_M} H_M^2} = \frac{2m_{si.c_H} H_H}{2m_{si.c_M} H_M} = \frac{u_H \cdot k_{D_H} \cdot b_{k_H} \cdot h_{pic_H} \cdot l_{pic_H} \sin \lambda_H}{2 \cdot V_{pic_H} \cdot k_{\alpha_H} \cdot l_{c_H}} \cdot \frac{E_{A_H} \cdot \Delta x_H \cdot D_{c_H} \cdot l_{pic_H} \sin^2 \lambda_H}{l_{c_H}}}{\frac{u_M \cdot k_{D_M} \cdot b_{k_M} \cdot h_{pic_M} \cdot l_{pic_M} \sin \lambda_M}{2 \cdot V_{pic_M} \cdot k_{\alpha_M} \cdot l_{c_M}} \cdot \frac{E_{A_M} \cdot \Delta x_M \cdot D_{c_M} \cdot l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}, \quad (7)$$

Використавши для цих співвідношень параметри натурального процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності (4), отримано:

$$\frac{P_{S_M} \delta_{P_S}}{P_{S_M}} = \frac{\delta_{m_f} m_{f_M} \delta_H H_M \delta_{b_k} b_{k_M}}{m_{f_M} H_M b_{k_M}} = \frac{2\delta_{m_{si}} m_{si_M} \delta_H^2 H_M^2}{2m_{si_M} H_M^2} = \frac{2\delta_{m_{si.c}} m_{si.c_M} \delta_H H_M}{2m_{si.c_M} H_M} = \frac{\delta_u u_M \delta_{k_D} k_{D_M} \delta_{b_k} b_{k_M} \delta_{h_{pic}} h_{pic_M} \delta_{l_{pic}} l_{pic_M} \sin(\delta_\lambda \lambda_M)}{2\delta_{V_{pic}} V_{pic_M} \delta_{k_\alpha} k_{\alpha_M} \delta_{l_c} l_{c_M}} \cdot \frac{\delta_{E_A} E_{A_M} \delta_{\Delta x} \Delta x_M \delta_{D_c} D_{c_M} \delta_{l_{pic}} l_{pic_M} \sin^2(\delta_\lambda \lambda_M)}{\delta_{l_c} l_{c_M}}}{\frac{u_M k_{D_M} b_{k_M} h_{pic_M} l_{pic_M} \sin \lambda_M}{2V_{pic_M} k_{\alpha_M} l_{c_M}} \cdot \frac{E_{A_M} \Delta x_M D_{c_M} l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}, \quad (8)$$

Згрупувавши у рівності параметри за розмірностями та скоротивши вирази в рівності (8), отримано співвідношення між коефіцієнтами подібності:

$$\delta_{P_S} = \delta_{m_f} \cdot \delta_H \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_H^2 = \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H = \frac{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{h_{pic}} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_\alpha} \cdot \delta_{l_c}} \times \frac{\sin(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin \lambda_M} = \frac{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{D_c} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \sin^2(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\delta_{l_c} \cdot \sin^2 \lambda_M}, \quad (9)$$

Розділивши всі елементи рівності (9) на δ_{P_S} , отримано систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{m_f} \cdot \delta_H \cdot \delta_{b_k}}{\delta_{P_S}} &= 1; \quad \frac{\delta_{m_{si}} \cdot \delta_H^2}{\delta_{P_S}} = 1; \quad \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{P_S}} = 1; \\ \frac{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{h_{pic}} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_\alpha} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}} \cdot \frac{\sin(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin \lambda_M} &= 1; \\ \frac{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{D_c} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}} \cdot \frac{\sin^2(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin^2 \lambda_M} &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Система з п'яти рівнянь (10) зв'язує між собою сімнадцять невідомих величин [14]. Дванадцять з цих величин можна задати виходячи з відомих характеристик робочого органу та середовища:

$$\begin{aligned}
 \delta_{m_f} &= \frac{m_{fH}}{m_{fM}} = \frac{9700}{790000} = 0,127; \delta_{m_{si.c}} = \frac{m_{si.cH}}{m_{si.cM}} = \frac{13000}{22000} = 0,590; \delta_{m_{si}} = \frac{m_{siH}}{m_{siM}} = \frac{1420}{16250} = 0,087; \\
 \delta_u &= \frac{u_H}{u_M} = \frac{25,283}{25,282} = 1; \delta_{k_D} = \frac{k_{DH}}{k_{DM}} = \frac{19135326,1}{2159392,53} = 0,886; \delta_{l_{pic}} = \frac{l_{picH}}{l_{picM}} = \frac{0,083}{0,073} = 1,128; \\
 \delta_{V_{pic}} &= \frac{V_{picH}}{V_{picM}} = \frac{31,8289}{31,8293} = 0,999; \delta_{k_{\alpha}} = \frac{k_{\alpha H}}{k_{\alpha M}} = \frac{1}{1} = 1; \delta_{l_c} = \frac{l_{cH}}{l_{cM}} = \frac{0,084}{0,084} = 1; \\
 \delta_{E_A} &= \frac{E_{AH}}{E_{AM}} = \frac{13500000}{13500000} = 1; \delta_{\Delta x} = \frac{\Delta x_H}{\Delta x_M} = \frac{0,12582}{0,12583} = 0,999; \delta_{\lambda} = \frac{\lambda_H}{\lambda_M} = 1.
 \end{aligned} \tag{11}$$

а п'ять величин, що залишились, можна визначити з системи рівнянь (10).

Підставивши задані коефіцієнти подібності в систему рівнянь (10), було визначено величини коефіцієнтів, що залишились:

$$\begin{aligned}
 \delta_{P_S} &= \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H; \\
 \delta_{b_k} &= \frac{\delta_{P_S}}{\delta_{m_f} \cdot \delta_H} = \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{m_f} \cdot \delta_H} = \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_f}}; \\
 \delta_H^2 &= \frac{\delta_{P_S}}{\delta_{m_{si.c}}} = \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{m_{si}}} \Rightarrow \delta_H = \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_{si}}}; \\
 \delta_{P_S} &= \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H = \delta_{m_{si.c}} \cdot \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_{si}}} = \frac{(\delta_{m_{si.c}})^2}{\delta_{m_{si}}}.
 \end{aligned}$$

Прийемо $\sin^2(\delta_{\lambda} \lambda_M) / \sin^2(\lambda_M) = 1$. Тоді:

$$\delta_{D_c} = \frac{\delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}}{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{l_{pic}}} = \frac{\delta_{l_c} (\delta_{m_{si.c}})^2}{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}}}, \tag{11}$$

Прийемо $\sin(\delta_{\lambda} \lambda_M) / \sin(\lambda_M) = 1$. Тоді:

$$\delta_{h_{pic}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{l_{pic}}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot (\delta_{m_{si.c}})^2 \cdot \delta_{m_f}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}} \cdot \delta_{m_{si.c}}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_{m_f}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}}}. \tag{12}$$

Отримані співвідношення (таблиця 2) дають можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, що буде подібна натуральному робочому органу розпушника [15].

Таблиця 1. Коефіцієнти подібності

Table 1. Similarity coefficients

Коефіцієнти задані виходячи з відомих геометричних та фізичних параметрів		Коефіцієнти вираховані
$\delta_{m_f} = 0,127$	$\delta_{m_{si.c}} = 0,59$	$\delta_{b_k} = 0,684$
$\delta_{m_{si}} = 0,087$	$\delta_u = 1$	$\delta_H = 0,147$
$\delta_{k_D} = 0,886$	$\delta_{l_{pic}} = 1,128$	$\delta_{D_c} = 1,179$
$\delta_{V_{pic}} = 0,999$	$\delta_{k_{\alpha}} = 1$	$\delta_{h_{pic}} = 0,018$
$\delta_{l_c} = 1$	$\delta_{E_A} = 1$	$\delta_{P_S} = 0,013$
$\delta_{\Delta x} = 0,999$	$\delta_{\lambda} = 1$	

В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА [16] (рис. 2), що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання [17].

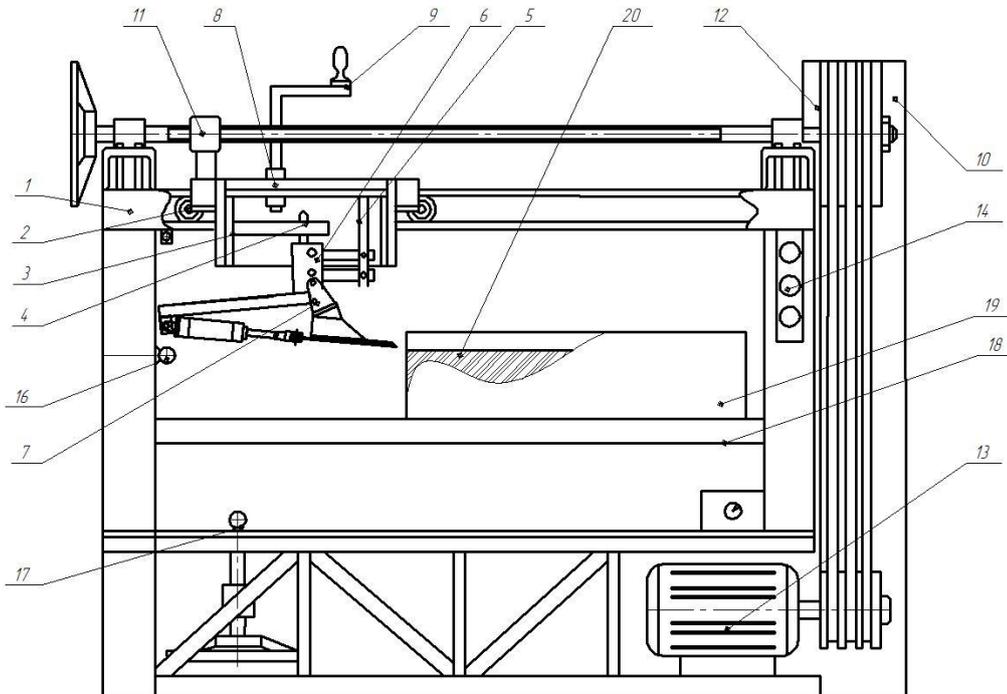


Рис.3. Кінематична схема лабораторного стенда «Динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА»

Fig. 3. Kinematic diagram of the laboratory stand Dynamometric stand for recording force load of the author's design of the KNUBA

Модель наконечника розпушника складається з вушка 1, клиноподібного корпуса 2, шириною 0,06 м загостреного під кутом 45° , в нижній частині якого влаштовано пластину 3, що може переміщуватись на відстань 0,1 м по відношенню до клиноподібного корпуса 2, та загострена в передній частині під кутом 45° утворюючи ріжучу кромку висотою 0,002 м до тильної сторони пластини 3 влаштований шток пневмо циліндра 4 (який відіграє роль пневмоакумулятора) діаметр його поршня дорівнює 0,04 м, корпус пневмо циліндра жорстко закріплений до вушка 1.

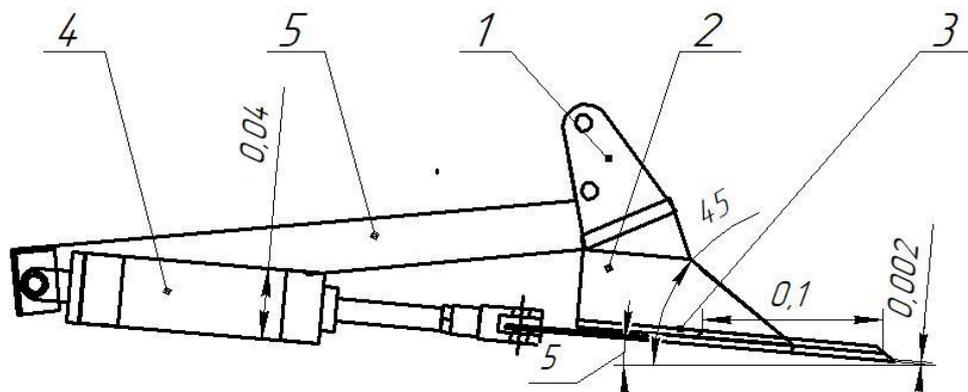


Рис.2. Наконечник розпушника, який обладнаний ДРКП

Fig. 2. The tip of the tiller equipped with a DRKP

Представлений лабораторний стенд дозволяє проводити повноцінні експериментальні дослідження по визначенню силових параметрів процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем [18]. В якості робочого середовища запропоновано використовувати парафін з огляду на його властивість змінювати оптичні властивості під навантаженням.

5. Висновки.

1. В результаті проведених досліджень, використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується силовим рівнянням із врахуванням їх параметрів.

2. Визначено коефіцієнти подібності, що були використані при відображенні параметрів натурального процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем через параметри фізичної моделі.

3. Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, що подібна натуральному робочому органу розпушника.

4. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу.

5. В якості робочого середовища запропоновано використовувати парафін з огляду на його властивість змінювати оптичні властивості під навантаженням.

6. Моделювання процесів різання ґрунтів є важливим напрямом у наукових та прикладних дослідженнях, що дозволяє глибше зрозуміти механізми взаємодії робочого органу машини з ґрунтовим середовищем. Реальні експерименти з ґрунтами часто потребують значних витрат часу, коштів та енергії, а також супроводжуються труднощами відтворення однакових умов. Використання фізичних моделей дозволяє вирішити ці проблеми й отримати достовірні результати без проведення великої кількості дорогих натурних випробувань.

7. Завдяки моделюванню можна досліджувати:

- силові параметри процесу різання, зокрема залежність опору ґрунту від швидкості руху, глибини занурення та геометрії ріжучого інструмента;
- кінематичні характеристики, що описують траєкторію та швидкість переміщення робочого органу;
- динамічні ефекти, пов'язані з вібраціями, ударами та інерційними силами, які виникають під час різання;
- структуру та поведінку ґрунту, зокрема процес його деформації, руйнування та переміщення у зоні контакту з інструментом.

8. Отримані в результаті моделювання дані в подальшому буде застосовано для оптимізації конструкцій робочих органів землерийних і будівельних машин, зниження енергоспоживання, підвищення продуктивності та довговічності техніки. Крім того, моделі дозволяють прогнозувати роботу обладнання в різних ґрунтових умовах, що особливо важливо для проектування машин універсального призначення.

9. Таким чином, моделювання процесів різання ґрунтів є потужним інструментом, який поєднує в собі економічну доцільність, аналітичну точність та практичну корисність, сприяючи створенню ефективніших і надійніших технічних рішень у будівельній та сільськогосподарській сферах.

Список використаних джерел:

1. Ловейкін В. С., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Теорія технічних систем: навчальний посібник. Київ-Полтава: ІЗМН-ПДТУ, 1998. 175 с.
2. Ловейкін В. С., Почка К. І. Побудова фізичної моделі роликкової формувальної установки з рекупераційним приводом. *Техніка будівництва*. 2007. № 20. С. 26-31.
3. Ловейкін В. С., Почка К. І. Динаміка роликкової формувальної установки: монографія. К.-Ромни: КНУБА, «ІСА-Інтерпапір», 2009. 228 с.
4. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. Побудова фізичної моделі установки для різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 3 (82). С. 30-36. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.3.4.
5. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. Визначення параметрів фізичної моделі установки для різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. *Information activity as a component of science development: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference (April 04–07, 2023)*. Edmonton, Canada. P. 561–570.
6. Pochka K., Prystailo M., Delembovskyi M., Balaka M., Maksymiuk Y., Polishchuk A. Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Karpenko M., Stosiak M. (eds) *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. 2025. P. 557–565. DOI: 10.1007/978-3-031-85390-6_52.
7. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(1). 79–92. DOI: 10.46299/j.isjea.20250401.07.
8. Пелевін Л. Є., Балака М. М., Пристайло М. О., Мачишин Г. М., Аржасв Г. О. Теоретичні основи взаємодії пружно-деформованих виконавчих елементів будівельної техніки і робочого середовища з врахуванням термореологічних процесів. К.: Інтерсервіс, 2015. 232 с.
9. Аржасв Г., Пелевін Л., Балака М. Методика й інформаційно-вимірювальне забезпечення експериментального визначення параметрів реологічної моделі піщано-глинистих ґрунтів. *Машинознавство*. 2008. № 12 (138). С. 40-42.
10. Аржасв Г., Пелевін Л., Балака М. Визначення параметрів реологічних моделей опорних поверхонь руху позашляхових транспортотехнологічних засобів. *Машинознавство*. 2008. № 10 (136). С. 22-24.
11. Рашківський В. П., Балака М. М. Винахідницько-пошукова робота у науковій діяльності та міжнародне співробітництво. К.: КНУБА, 2021. 44 с.
12. Loveikin V., Pochka K., Balaka M., Pochka O. Experimental research procedure of roller forming unit. *Himychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*. 2023. (102). 31–37. DOI: 10.32347/gbdmm.2023.102.0302.
13. Федішин Б., Балака М. Верифікація переміщення просторово орієнтованого ножа на випробувальному стенді. *Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (20–21 трав. 2025 р.)*. К.: КНУБА, 2025. С. 57–60.
14. Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D. Information model of bulldozer-looser movement. *The world of science and innovation: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021)*. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2021. P. 54–59.
15. Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I. Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2024. Vol. 1 No. 105. 61–67. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61.
16. Mase G. T., Smelser R. E., Rossmann J. S. *Continuum Mechanics for Engineers*. 4th ed. Boca Raton. CRC Press, 2020. 450 p.
17. Look B. G. *Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction*. Boca Raton. CRC Press, 2022. 590 p.
18. Nowak P. *Earthworks: A guide*. 2nd ed. London. ICE Publishing, 2015. 360 p.

References:

1. Loveikin V. S., Nazarenko I. I., Onyshchenko O. H. *Teoriya tekhnichnykh system [Theory of technical systems]: navchalnyi posibnyk [study guide]*. Kyiv-Poltava, IZMN-PDTU [Institute of the content of teaching methods – Poltava State Technical University]. 1998. 175 p.

2. Loveikin V. S., Pochka K. I. Pobudova fizychnoyi modeli rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Construction of a physical model of a roller forming unit with a recuperative drive]. *Tekhnika budivnytstva* [Construction technology]. 2007. No. 20. P. 26–31.
3. Loveikin V. S., Pochka K. I. Dynamika rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky [Dynamics of the roller forming unit]. *Monohrafiya* [Monograph]. Kyiv-Romny, KNUCA, «ISA-Interpapier». 2009. 228 p.
4. Pochka K. I., Abrashkevych Yu. D., Prystailo M. O., Polishchuk A. G. Pobudova fizychnoyi modeli ustanovky dlya rizannya vysokoabrazyvnykh materialiv abrazyvnymy armovanyimi kruhamy [Construction of a physical model of an installation for cutting highly abrasive materials with abrasive reinforced wheels]. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2022. Issue 3 (82). P. 30–36. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.3.4.
5. Pochka K. I., Abrashkevych Yu. D., Prystailo M. O., Polishchuk A. G. Vyznachennya parametriv fizychnoyi modeli ustanovky dlya rizannya vysokoabrazyvnykh materialiv abrazyvnymy armovanyimi kruhamy [Determination of the parameters of the physical model of the installation for cutting highly abrasive materials with abrasive reinforced wheels] // *Information activity as a component of science development: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference (April 04–07, 2023)*. Edmonton, Canada. 2023. P. 561–570.
6. Pochka K., Prystailo M., Delembovskyi M., Balaka M., Maksymiuk Y., Polishchuk A. Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Karpenko M., Stosiak M. (eds) *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology*. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. 2025. P. 557–565. DOI: 10.1007/978-3-031-85390-6_52.
7. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(1). 79–92. DOI: 10.46299/j.isjea.20250401.07.
8. Pelevin L. Ye., Balaka M. M., Prystailo M. O., Machyshyn H. M., Arzhaiev H. O. Teoretychni osnovy vzaємodii pruzhno-deformovanykh vykonavchykh elementiv budivelnoi tekhniki i robochoho seredovyscha z vrakhuvanniam termoreolohichnykh protsesiv [Interaction theoretical foundations of elastically deformed actuating elements for construction equipment and working environment taking into account thermorheological processes]: monograph. Kyiv. 2015. 232 p.
9. Arzhaiev H., Pelevin L., Balaka M. Metodyka y informatsiino-vymiriuvalne zabezpechennia eksperymentalnoho vyznachennia parametriv reolohichnoi modeli pischano-hlynystykh gruntiv [Methodology and information-measuring support for experimental determination of rheological model parameters of sandy-clayey soils]. *Mashynoznavstvo*. 2008. № 12 (138). P. 40–42.
10. Arzhaiev H., Pelevin L., Balaka M. Vyznachennia parametriv reolohichnykh modelei opornykh poverkhon rukhu pozashliakhovykh transportnotekhnolohichnykh zasobiv [Determination of rheological model parameters of support surfaces for off-road transport and technological vehicles]. *Mashynoznavstvo*. 2008. № 10 (136). P. 22–24.
11. Rashkivskiy V. P., Balaka M. M. Vynakhidnytsko-poshukova robota u naukovii diialnosti ta mizhnarodne spivrobitnytstvo [Inventive and research work in scientific activity and international cooperation]. Kyiv: KNUBA, 2021. 44 p.
12. Loveikin V., Pochka K., Balaka M., Pochka O. Experimental research procedure of roller forming unit. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*. 2023. (102). 31–37. DOI: 10.32347/gbdmm.2023.102.0302.
13. Fedyshyn B., Balaka M. Veryfikatsiia peremischennia prostoroovo oriientovanoho nozha na vyprobuvalnomu stendi [Verification of spatially oriented knife movement on test stand]. *Enerhooschadni mashyny i tekhnolohii* [Energy saving machines and technologies]: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference (May 20–21, 2025). Kyiv: KNUBA, 2025. P. 57–60.
14. Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D. Information model of bulldozer-looser movement. *The world of science and innovation: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021)*. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2021. P. 54–59.
15. Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I. Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2024. Vol. 1 No. 105. 61–67. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61.
16. Mase G. T., Smelser R. E., Rossmann J. S. *Continuum Mechanics for Engineers*. 4th ed. Boca Raton. CRC Press, 2020. 450 p.
17. Look B. G. *Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction*. Boca Raton. CRC Press, 2022. 590 p.
18. Nowak P. *Earthworks: A guide*. 2nd ed. London. ICE Publishing, 2015. 360 p.