



Механізація, електрифікація

УДК 631.37

© 2020

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОСТІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ КОЛІЇ, ЯКУ ВИКОРИСТОВУЮТЬ ПРИ МОСТОВОМУ ЗЕМЛЕРОБСТВІ

В.В. Адамчук¹, В.М. Булгаков², В.П. Кувачов³, І.В. Головач⁴,
Є.І. Ігнат'єв⁵, О.М. Черниш⁶

^{1,2}доктори технічних наук, професори, академіки НААН

^{3,5,6}кандидати технічних наук

⁴доктор технічних наук, професор

¹ННЦ «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

вул. Вокзальна, 11,

смт Глеваха Васильківського р-ну Київської обл., 08631, Україна

^{2,4,6}Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

^{3,5}Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

просп. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь

Запорізької обл., 72312, Україна

e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com, ²vbulgakov@meta.ua, ³kuvachoff@ukr.net,

⁴holovach.iv@gmail.com, ⁵yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua, ⁶chernysh@nubip.edu.ua

ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-5762-256X,

⁴0000-0003-1387-4789, ⁵0000-0003-0315-1595, ⁶0000-0001-6173-0259

Надійшла 23.05.2020

Мета. Визначити фізико-механічні властивості ґрунтових слідів постійної технологічної колії і їх вплив на зчеплення та тягоутворення мостового агрозасобу розробленої нами нової конструкції. **Методи.** Теоретичні дослідження проведено з використанням основних положень теорії трактора. Експериментальні дослідження проведено у ґрунтовому каналі за загальноприйнятими та розробленими методиками з використанням сучасного лабораторного контрольно-вимірювального обладнання. Обробку результатів експериментального дослідження здійснено статистичними методами за допомогою ПК з використанням основних положень кореляційного аналізу. **Результати.** Для мостового агрозасобу нової конструкції, який було використано як об'єкт експериментального дослідження, при багаторазових проходах його ходових коліс встановлено, що сліди постійної технологічної колії мають показники щільності та твердості у верхньому шарі ґрунту (0–5 см), які істотно залежать від його вологості. Так, між твердістю та щільністю ґрунтового сліду постійної технологічної колії встановлено високу нелінійну кореляцію, що апроксимується квадратичною залежніс-

ту. Це дає змогу при його практичному використанні за результатами вимірювання твердості прогнозувати величину щільності слідів постійної технологічної колії і навпаки, що забезпечуватиме ефективне використання мостового агрозасобу. Крім того, для забезпечення максимальних зчіпних властивостей і тягоутворення ходових коліс мостового агрозасобу під час його руху по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії встановлено, що збільшення твердості останньої потребує збільшення тиску повітря в його шинах і навпаки. **Висновки.** Дослідження властивостей ґрунтових слідів постійної технологічної колії свідчать, що зі збільшенням вологості ґрунтового сліду колії з 10 до 45% щільність у ньому, тобто в його шарі, який дорівнює 0–5 см, зменшується від 1,60 до 1,30 г-см⁻³, твердість — від 4,5 до 2,8 МПа. Також установлено, що зі збільшенням твердості слідів постійної технологічної колії від 1,0 до 3,5 МПа тиск повітря в шинах коліс мостового агрозасобу потрібно збільшувати з 60 до 650 кПа, тобто в 10 разів. Для марок шин, які використовують у цьому мостовому агрозасобі, величина тиску має становити 160 кПа. А тому ефективна робота цього мостового агрозасобу з максимальним тиском у шинах його ходових коліс можлива лише за твердості слідів постійної технологічної колії 2,25 МПа і вище.

Ключові слова: агрозасіб, ґрунт, теоретичні та експериментальні дослідження, статистична обробка, використання ПК.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-08>

Основною проблемою, яку розв'язують у теорії кочення ведучого колеса мобільного енергетичного засобу, є підвищення якості його зчеплення з опорною поверхнею для забезпечення достатньо високої сили тяги [1, 2].

Зчеплення ведучого колеса мостового агрозасобу з опорною поверхнею слідів постійної технологічної колії зумовлено дією таких сил: сили тертя між ґрунтом і опорними поверхнями шини; сили зачеплення, що виникає під час упору ґрунтозачепів шини об ґрунт; сили, що діє в площині зрізу частини ґрунту, розташованого між ґрунтозачепами. Кожна із цих сил є складовою активної дотичної сили, яка чисельно дорівнює реакції ґрунту на зазначені складові. При цьому відомо, що чим більші механічна міцність ґрунту й сила зчеплення колеса з опорною поверхнею його кочення, тим більший привідний момент і більшу силу тяги може реалізувати колесо [3–6]. При значній щільності ґрунтової опорної поверхні на утворення зчеплення, а отже, і на тягоутворення, істотно впливає сила тертя між ґрунтом і опорними поверхнями шини. У міру зменшення

щільності ґрунту глибина проникнення в неї ґрунтозачепів збільшується, внаслідок цього на тягоутворення сильніше впливають сили зачеплення ґрунтозачепів шини об ґрунт і тертя в площині зрізу частини ґрунту, розташованого між ґрунтозачепами.

Також відомо, що сила опору перекочуванню коліс мобільного енергетичного засобу залежить від властивостей ґрунту, що характеризуються коефіцієнтом об'ємного стиску [1]. Цей показник перебуває в тісному кореляційному зв'язку із твердістю ґрунту.

Зазначене вище свідчить, що однією з найважливіших умов достатнього зчеплення коліс мостового агрозасобу з опорною поверхнею й мінімальним опором їхньому коченню є фізико-механічні властивості слідів постійної технологічної колії. Дослідження її властивостей — це реальна основа забезпечення високого коефіцієнта корисної дії роботи мостових агрозасобів. Однак фізико-механічні властивості ґрунтових слідів постійної технологічної колії практично не вивчені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є багато досліджень, спрямованих

на встановлення кореляційного зв'язку між щільністю й твердістю ґрунту [7–9]. На твердість ґрунту впливає не тільки її щільність, а й вологість, що нерівномірно розподіляється як по поверхні поля, так і по глибині ґрунту [8].

Відомі два способи виміру твердості ґрунту — позиційний і безперервний (динамічний) [7, 8]. Позиційний спосіб виміру твердості ґрунту передбачає використання приладів типу твердоміра (вимірювача щільності) системи Ревякіна. У позиційній схемі наконечник пенетрометра рухається перпендикулярно поверхні ґрунту. Безперервний (динамічний) вимір твердості ґрунту є інструментом інтенсифікації процесу знімання інформації про стан ґрунту за твердістю.

За допомогою позиційних вимірів щільності й твердості ґрунту дослідниками встановлені кореляційні зв'язки між цими показниками в умовах поля [7–9]. Завдяки аналізу наукових публікацій встановлено, що між щільністю й твердістю ґрунту існує досить сильний кореляційний зв'язок. Це свідчить, що за результатами виміру твердості можна прогнозувати величину щільності ґрунту. Але для цього щораз до початку й після закінчення вимірів твердості й щільності ґрунту на полі необхідно проводити тарування або зіставлення твердості і її щільності. У разі випадання опадів під час збору інформації потрібно повторити операції порівняння твердості й щільності ґрунту.

Однак, фізико-механічні властивості ґрунту в умовах сільськогосподарського агрофону істотно відрізняються від властивостей ущільненого вирівняного сліду постійної технологічної колії. Останнє не дає змоги використати наявні аналітичні залежності, що пов'язують ці показники між собою. Практично немає інформації про оцінку властивостей постійної технологічної колії. Досліджень у напрямі моніторингу властивостей постійної технологічної колії і їхнього впливу на зчеплення й тягоутворення мостових агросасобів проведено недостатньо.

Мета досліджень — визначити фізико-механічні властивості ґрунтових слідів постійної технологічної колії і їх вплив на зчеплення та тягоутворення мостового агросасобу розробленої нами нової конструкції.

Методи досліджень. Фізичним об'єктом експериментальних досліджень був мостовий агросасіб розробленої нами конструкції [10] (рис. 1). Цей агросасіб має колісний рушій із пневматичними шинами типорозміру 9.5R32.

Фізико-механічні властивості ґрунту в слідах постійної технологічної колії вимірювали в товщині шару 0–5 см. Для визначення твердості ґрунту використали твердомір системи Ревякіна, щільність ґрунту в слідах технологічної колії визначали вимірювачем щільності нашої конструкції, а вологість — вологоміром МГ-44 (рис. 2).

Для виключення випадкової складової похибки визначення фізико-механічних показників ґрунту в слідах постійної технологічної колії досліди проводили в багаторазовій повторності. Отримані значення показників усереднювали. Похибка безпосереднього експериментального виміру параметрів



Рис. 1. Мостовий агросасіб із пневматичними колесами, що рухаються по ґрунтових слідах постійної технологічної колії

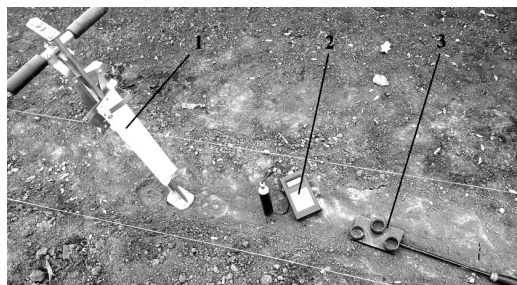


Рис. 2. Вимірювальні прилади для визначення фізико-механічних властивостей ґрунту в слідах постійної технологічної колії: 1 — твердомір системи Ревякіна; 2 — вологомір МГ-44; 3 — вимірювач щільності

приладами, наведеними на рис. 2, не перевищувала 2%.

Результати досліджень і їх обговорення. Дослідження властивостей ґрунтових слідів постійної технологічної колії свідчать, що значення щільності і твердості у шарі ґрунту 0–5 см істотно залежать від його вологості. Зі збільшенням вологості ґрунтового сліду колії від 10 до 45% величина щільності ρ у ньому зменшується з 1,60 до 1,30 г·см⁻³ (рис. 3).

Аналогічну ситуацію можна спостерігати під час зміни величини твердості ґрунтових

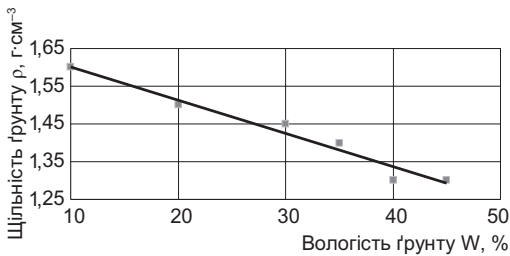


Рис. 3. Залежність щільності ρ ґрунтового сліду постійної технологічної колії від вологості W

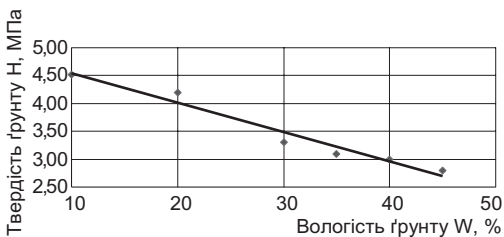


Рис. 4. Залежність твердості H ґрунтового сліду постійної технологічної колії від вологості W

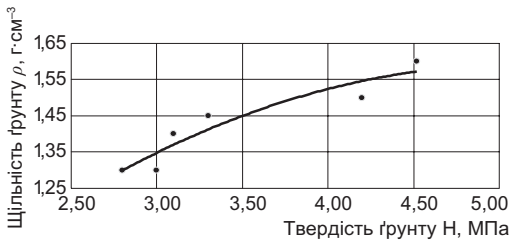


Рис. 5. Залежність щільності ρ ґрунтового сліду постійної технологічної колії від твердості H ґрунту

слідів постійної технологічної колії від її вологості (рис. 4).

Аналіз графіка на рис. 4 свідчить, що зі збільшенням вологості слідів колії від 10 до 45% величина твердості ґрунту в сліді зменшується з 4,5 до 2,8 МПа.

Характер залежності показників на рис. 3 і 4 лінійний. Квадрат коефіцієнтів кореляції їхніх зв'язків досить високий і становить $R^2 = 0,96$.

Визначено взаємозв'язок щільності ґрунтових слідів постійної технологічної колії з її твердістю (рис. 5).

Аналіз графіка на рис. 5 свідчить, що між щільністю й твердістю ґрунтового сліду постійної технологічної колії існує високий нелінійний кореляційний зв'язок. Квадрат коефіцієнта кореляції зв'язку між цими показниками становить $R^2 = 0,89$, що значно нижче, ніж значення коефіцієнтів кореляційних відношень. Це доводить, що за результатами виміру твердості ґрунтового сліду можна прогнозувати щільність слідів постійної технологічної колії й навпаки.

Залежність між показниками, наведеними на рис. 5, досить точно апроксимується виразом такого виду:

$$\rho = -0,0547 \cdot H^2 + 0,5592 \cdot H + 0,1629, \quad (1)$$

де ρ — щільність ґрунту в слідах постійної технологічної колії, г·см⁻³; H — твердість ґрунту в слідах постійної технологічної колії, визначена за системою Ревякіна, МПа.

Далі оцінимо вплив фізико-механічних властивостей ґрунтового сліду постійної технологічної колії на якість зчеплення й виникнення тяги мостового агрозасобу. Для цього максимальну дотичну силу тяги, що розвиває колесо мостового агрозасобу, наведемо такою залежністю [11]:

$$P_{k\max} = \delta_{\max} \cdot S_k \cdot k_0 \cdot L, \quad (2)$$

де δ_{\max} — максимальний коефіцієнт буксування рушіїв мостового агрозасобу; S_k — сума вертикальних проєкцій упорних поверхонь заглиблених у ґрунт ґрунтозачепів колеса мостового агрозасобу, м²; k_0 — коефіцієнт об'ємного змінання опорної поверхні колеса (сліду постійної технологічної колії), Н·м⁻³; L — довжина дуги зчеплення ґрунтозачепів колеса мостового агрозасобу з опорною поверхнею (слідом постійної технологічної колії), м.

Також зчеплення колеса мостового агрозасобу зі слідом постійної технологічної

колії має бути достатнім для того, щоб воно могло розвивати максимальну дотичну силу тяги [1]:

$$P_{k_{\max}} = \varphi \cdot N_{ek}, \quad (3)$$

де φ — коефіцієнт зчеплення, реалізований рушієм мостового агрозасобу за умовами взаємодії його з опорною поверхнею; N_{ek} — вертикальне експлуатаційне навантаження, що діє на колесо мостового агрозасобу, Н.

Тоді, порівнюючи вирази (2) і (3), матимемо:

$$\delta_{\max} \cdot S_k \cdot k_0 \cdot L = \varphi \cdot N_{ek}. \quad (4)$$

Вирази для визначення величини L і S_k мають такий вигляд [11]:

$$L = (r_0 + h_z) \left(\operatorname{arctg} \frac{f_k (1 - f_k^2)^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{2} - f_k^2} + 2f_k^2 \right) \quad (5)$$

та

$$S_k = \pi \cdot h_z \left[(2r_0 - h_z) \cdot (b_0 - h_z) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

де r_0 , b_0 — відповідно статичний радіус і ширина колеса мостового агрозасобу, м; f_k — коефіцієнт опору коченню колеса мостового агрозасобу; h_z — нормальний прогин шини [11], м:

$$h_z = \frac{N_{ek}}{\pi \cdot \rho_w \cdot \sqrt{2r_0 \cdot b_0}}, \quad (7)$$

де ρ_w — тиск повітря в шині, Па.

Раніше проведені нами дослідження роботи колеса мостового агрозасобу по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії дали змогу аналітично встановити досить точну залежність величини коефіцієнта k_0 його об'ємного зминання від величини твердості H :

$$k_0 = \frac{0,636 \cdot N_{ek}}{b_0 \cdot 4r_0^2 (0,0247 \cdot H^2 - 0,2093 \cdot H + 0,499)^3}. \quad (8)$$

Також нами було встановлено, що коефіцієнт опору коченню f_k колеса мостового агрозасобу залежить від фізико-механічних властивостей ґрунтового сліду постійної технологічної колії. Зокрема, залежно від її твердості H коефіцієнт опору коченню f_k можна досить точно описати квадратичною залежністю такого виду:

$$f_k = 0,0247 \cdot H^2 - 0,2093 \cdot H + 0,499. \quad (9)$$

Після підстановки виразів (5–9) у (4) матимемо розрахункову математичну модель, що дає змогу досліджувати процеси тягоутворення колеса мостового агрозасобу залежно від його конструктивних параметрів, з одного боку, й фізико-механічних властивостей слідів постійної технологічної колії — з іншого.

На підставі зазначеної математичної моделі, за допомогою розрахунків на ПК, отримано графічну залежність потрібного тиску ρ_w повітря в шинах коліс мостового агрозасобу від твердості H ґрунтового сліду постійної технологічної колії (рис. 6).

Аналіз зазначеного графіка свідчить, що чим твердіші сліди постійної технологічної колії, тим вищий тиск повітря має бути в шині.

Причому зі збільшенням твердості слідів постійної технологічної колії від 1,0 до 3,5 МПа тиск повітря в шині коліс мостового агрозасобу потрібно збільшувати з 60 до 650 кПа, тобто в 10 разів. Природно, що величина гранично можливого тиску повітря в шині визначена її технічною характеристикою. Для зазначеної марки шини, використовуваної в даному мостовому агрозасобі, ця величина становить 160 кПа. Тому робота мостового агрозасобу з максимальним тиском у шинах можлива лише за твердості слідів постійної технологічної колії 2,25 МПа і вище. Однак за меншої твердості ґрунтового сліду тиск повітря в шині його коліс потрібно зменшувати. Це дає змогу забезпечити високі тягово-зчіпні властивості мостового агрозасобу під час його руху по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії. Наприклад, за величини твердості $H = 1$ МПа величина тиску ρ_w у шині колеса має становити 80 кПа.

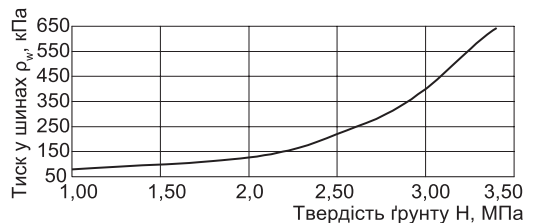


Рис. 6. Залежність потрібного тиску ρ_w повітря в шинах коліс мостового агрозасобу від твердості H ґрунтового сліду постійної технологічної колії

Отримана залежність величини потрібного тиску в шині коліс мостового агрозасобу від твердості ґрунтового сліду постійної технологічної колії (див. рис. 6) узагальнює умову, за якої можна досягти його максимальних зчпних властивостей.

Проведені дослідження підтверджують той факт, що максимальної ефективності

руху мостового агрозасобу по ґрунтових слідах постійної технологічної колії можна досягти тільки у разі правильно встановленого тиску повітря в шинах його коліс. Величина останнього, у свою чергу, залежить від фізико-механічних властивостей ґрунтового сліду постійної технологічної колії.

Висновки

Дослідження властивостей ґрунтових слідів постійної технологічної колії свідчать, що значення щільності й твердості в шарі ґрунту 0–5 см істотно залежать від його вологості. Зі збільшенням вологості ґрунтового сліду колії з 10 до 45% величина щільності в ньому зменшується від 1,60 до 1,30 г·см⁻³, а твердості — від 4,5 до 2,8 МПа.

Експериментально встановлено високу нелінійну кореляцію між твердістю й щільністю ґрунтового сліду постійної технологічної колії, що апроксимується квадратичною залежністю. Її практичне використання дає змогу за результатами виміру твердості прогнозувати величину щільності слідів постійної технологічної колії й навпаки.

З позиції забезпечення максимальних зчпних властивостей і виникнення тяги мостового агрозасобу під час його руху по ґрунтовому сліду постійної технологічної колії встановлено, що збільшення твердості останньої потребує збільшення тиску повітря в шині його коліс і навпаки.

Проведені дослідження підтверджують той факт, що максимальної ефективності руху мостового агрозасобу по ґрунтових слідах постійної технологічної колії можна досягти тільки у разі правильно встановленого тиску повітря в шинах його коліс. Величина останнього, у свою чергу, залежить від фізико-механічних властивостей ґрунтового сліду постійної технологічної колії.

Adamchuk V.¹, Bulgakov V.², Kuvachov V.³, Holovach I.⁴, Ihnatiev Ye.⁵, Chernysh O.⁶

¹NSC «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture», 11 Vokzalna Str., Hlevakha township, Vasylkiv district, Kyiv oblast, 08631, Ukraine, ², ⁴, ⁶National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine, ³, ⁵Tavria State Agrotechnological University named after Dmytro Motorny, 18 B. Khmelnytskoho Ave., Melitopol, Zaporizhzhia oblast, 72312, Ukraine; e-mail: ¹vvadamchuk@gmail.com; ²vbulgakov@meta.ua; ³kuvachoff@ukr.net; ⁴holovach.iv@gmail.com; ⁵yevhen.ihnatiev@tsatu.edu.ua; ⁶chernysh@nubip.edu.ua; ORCID: ¹0000-0003-0358-7946, ²0000-0003-3445-3721, ³0000-0002-5762-256X, ⁴0000-0003-1387-4789, ⁵0000-0003-0315-1595, ⁶0000-0001-6173-0259

Investigation of properties of the constant technological track, which is used in bridge agriculture

Goal. To determine the physical-and-mechanical properties of soil traces of a constant technological

track and their influence on the adhesion and traction of the bridge agricultural vehicle of a new design. **Methods.** Theoretical research was conducted using the basic provisions of the tractor theory. Experimental studies were conducted in the soil channel according to generally accepted and developed methods using modern laboratory control and measuring equipment. The results of the experimental study were processed by statistical methods on a PC using the basic provisions of correlation analysis. **Results.** For the bridge agricultural tool of a new design, which was used as an object of experimental research, with repeated passes of its running wheels, it was found that the traces of a constant technological track have density and hardness in the upper soil layer (0–5 cm), which significantly depend on its humidity. Thus, a high non-linear correlation is established between the hardness and density of the soil trace of the constant technological track, which is approximated by a quadratic dependence. This makes it possible at its practical use to predict the value of the density of traces of a constant technological track based on the results of hardness measurements and

vice versa, which will ensure the effective use of the bridge agricultural tool. Besides, to ensure maximum traction and traction of the running wheels of the bridge agricultural vehicle during its movement on the soil track of the constant technological track, it is established that increasing the hardness of the latter requires increasing the air pressure in its tires and vice versa. **Conclusions.** Study of the properties of soil traces of a permanent technological track shows that with increasing humidity of the soil trace of the track from 10 to 45%, the density in it, i.e. in its layer, which is equal to 0–5 cm, decreases from 1.60 to 1.30 g·cm⁻³, hardness — from 4.5 to 2.8 MPa. It was also found that with increasing the

hardness of the traces of the constant technological track from 1.0 to 3.5 MPa, the air pressure in the tires of the wheels of the bridge agricultural vehicle should be increased from 60 to 650 kPa, i.e. 10 times. For tire brands used in this bridge tool, the pressure should be 160 kPa. Therefore, the effective operation of this bridge agricultural tool with the maximum pressure in the tires of its running wheels is possible only with the hardness of the traces of the constant technological track 2.25 MPa and above.

Key words: agricultural product, soil, theoretical and experimental researches, statistical processing, use of PC.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202008-08>

Бібліографія

1. Kutkov G. Tractors and Automobiles: the theory and the technological properties). Moscow. 2014. 506 p.
2. Bulgakov V., Velichko I., Ivanovs S. Investigation of draft coefficient of efficiency of wheeled tractor. *Engineering for rural Development*. 2016. Is. 15. P. 1036–1041.
3. Panchenko A., Kyurchev V. A study of the draft and coupling qualities of wheeled tractors. Proceedings of the Taurida State Agrotechnological University. Melitopol. 2008. V. 9. Is. 8. P. 31–36.
4. Nadykto V., Arak M., Olt J. Theoretical research into the frictional slipping of wheel type undercarriage taking into account the limitation of their impact on the soil. *Agronomy Research*. 2015. V. 13(1). P. 148–157.
5. Nadykto V.T., Velychko O.V. Forecasting the development of energy ratio of agricultural tractors. *Mechanization and electrification of agriculture*. 2015. № 1(100). P. 147–151.
6. Nadykto V., Bulgakov V., Kyurchev S. et al. Theoretical background for increasing grip properties of wheeled tractors based on their rational ballasting. *Agraarteadus*. 2019. V. 30, Is. 2. P. 78–84. doi: 10.15159/jas.19.07
7. Vasiliev S. I. Improvement of the method and technical means for horizontal measurement of soil hardness with the introduction of coordinate farming technology: author. dis. PhD: 05.20.01. Penza. 2007. 19 p.
8. Kushnarev A., Kravchuk V., Kushnarev S., Dyuzhaev V. Monitoring of soil density of arable horizon in the system of precise (controlled) agriculture. *Technique and technology of the agro-industrial complex*. 2010. № 9. P. 12–15.
9. Nadykto V., Uleksin V. The controlled and the gantry systems of farming: monograph. Kyiv. 2008. 270 p.
10. Bulgakov V., Kuvachov V., Olt J. Theoretical study on power performance of agricultural gantry systems. Proceedings of the 30th International DAAAM Symposium «Intelligent Manufacturing & Automation», 23–26th October 2019, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2019, Zadar, Croatia, V. 30, № 1. P. 167–175. doi: 10.2507/30th.daaam.proceedings.022
11. Guskov V.V. Optimal parameters of agricultural tractors. Moscow, 1996. 194 p.