

УДК 631.313

Дослідження умови та показників роботоздатності сферичних дискових робочих органів при взаємодії з ґрунтом

Вольський В. А., к.т.н., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», e-mail: vladimir_volskiy@ukr.net, тел.: + 38-097-740-80-72

Анотація

Мета. Уточнити умову та показники роботоздатності сферичних дискових робочих органів при взаємодії з ґрунтом.

Методи. Аналіз діючих сил опору та моментів здійснено з використанням положень фізики, теоретичної механіки й опору матеріалів.

Результати. Уточнений напрямок різання ґрунту точками леза сферичного дискового робочого органа з віссю вільного обертання та їх траєкторії руху в ґрунтовому середовищі на основі експериментально одержаних сил і моментів опору, що діють на сферичний диск, дозволили

підтвердити умову процесу роботи ґрунто-обробного сферичного диска.

Висновки. Обґрунтовано й уточнено аналітичну залежність сил опору реакції ґрунту при його дискуванні сферичним дисковим робочим органом під дією крутного моменту за рахунок сил, що діють знизу диска, тобто в зоні контакту з ґрунтом.

Ключові слова: ґрунт, сферичний дисковий робочий орган, кут атаки, кут нахилу диска до вертикалі, точки леза диска, сили опору та момент сил.

UDC 631.313

Investigation of the condition and indices of the robotability of spherical disk working organs in interaction with soil

Volsky V. A., Ph.D., National Research Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", e-mail: vladimir_volskiy@ukr.net, phone: + 38-097-740-80-72

Annotation

Purpose. To clarify the condition and indices of the robotability of spherical disk working organs when interacting with the soil.

Methods. The analysis of the active forces of resistance and moments is carried out using the provisions of physics, theoretical mechanics and resistance of materials.

Results. The precise direction of cutting of the soil by the points of the blade of a spherical disk working organ with the axis of free rotation and their trajectory in soil environment on the basis of the experimentally obtained forces and the moments of

resistance acting on a spherical disk made it possible to confirm the condition of the process of working the soil-cultivating spherical disk.

Conclusions. The analytical dependence of the resistance forces of soil reaction during its disking with a spherical disk working body is substantiated and refined under the influence of forces that act from the bottom of the disk, that is, in the zone of contact with the soil.

Keywords: soil, spherical disk working body, angle of attack, angle of inclination of the disk to the vertical, points of the blade of the disk, resistance forces and the moment of forces.

УДК 631.313

Исследование условия и показателей работоспособности сферических дисковых рабочих органов при взаимодействии с почвой

Вольский В. А., к.т.н., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», e-mail: vladimir_volskiy@ukr.net, тел.: + 38-097-740-80-72

Аннотация

Цель. Уточнить условие и показатели работоспособности сферических дисковых рабочих органов при взаимодействии с почвой.

Методы. Анализ действующих сил сопротивления и моментов осуществлено с использованием положений физики, теоретической механики и сопротивления материалов.

Результаты. Уточненное направление резания почвы точками лезвия сферического дискового рабочего органа с осью свободного вращения и их траектории движения в почвенном среде на основе экспериментально полученных сил и моментов сопротивления, действующих на сферический диск, позволили подтвердить условие процесса работы почвообрабатывающего сферического диска.

Выводы. Обосновано и уточнено аналитическую зависимость сил сопротивления реакции почвы при ее дисковании сферическим дисковым рабочим органом под действием сил, которые действуют снизу диска, то есть в зоне контакта с почвой.

Ключевые слова: почва, сферический дисковый рабочий орган, угол атаки, угол наклона диска к вертикали, точки лезвия диска, силы сопротивления и момент сил.

Проблема. Відомі теоретичні залежності для визначення параметрів і режимів роботи ґрунтообробних сферичних дискових робочих органів базуються на недостатньо обґрунтованому припущенні про те, що різання ґрунту цим робочим органом здійснюється за позадвжнім напрямком руху диска [1–3, 8], яке не відповідає положенням теоретичної механіки, опору матеріалів і не дає можливості зробити висновок щодо

правильності пояснень результатів відомих експериментальних досліджень, а також визначити різання ґрунту точками леза диска, який за розрахунками з використання відомих формул перевищує 90°, що не сумісно з процесом різання ґрунту. Виявлення й обґрунтування більш імовірного напрямку різання ґрунту сферичним диском дозволяє уточнити процес роботи таких дисків, тобто принцип їх роботи, щоб уникнути таких висновків, які зустрічаються у відомих публікаціях наукових праць.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останніх публікаціях результатів досліджень [4, 5] залишаються незмінними недостатньо обґрунтовані передбачення щодо прийнятого раніше напрямку різання ґрунту за позадвжнім напрямком руху дисків. З'явилися також передбачення щодо переміщення матеріальних точок ґрунту на внутрішній поверхні сферичного диска, які суперечать принципу роботи сферичних дискових робочих органів, що обертаються за рахунок реакції тертя ґрунту з цією поверхнею. Якщо ця умова не забезпечується, то процес роботи сферичних дисків порушується.

Унеможливлення таких порушень процесу роботи можна здійснити за концепцією, що обертання диска виконується за рахунок реакції опору тертя ґрунту об сферичну внутрішню поверхню диска та опору різання ґрунту [6], умова якої наведена у формулі (1) відповідно до рисунку 1.

Показано, що момент обертання диска $M_{об}$, здійснюється за умови [6]:

$$M_{об} > F_{тер.рп} \left(\frac{D_{диск}}{2} - h_{м.ц} \right) - \left(F_{тер.п} r_n + F_{рпз} \frac{D_{диск}}{2} \right) \quad , \quad (1)$$

де $F_{тер.зр}$ – сила тертя ґрунту по внутрішній поверхні сферичного диска, Н;
 $D_{диск}$ – діаметр диска, м;
 $h_{м.ц}$ – висота розташування миттєвого центра обертання вертикального діаметра диска, м;
 $F_{тер.п}$ – сила тертя в підшипнику, Н;
 r_n – радіус підшипника, м;
 $F_{риз}$ – сила опору різання ґрунту, Н.

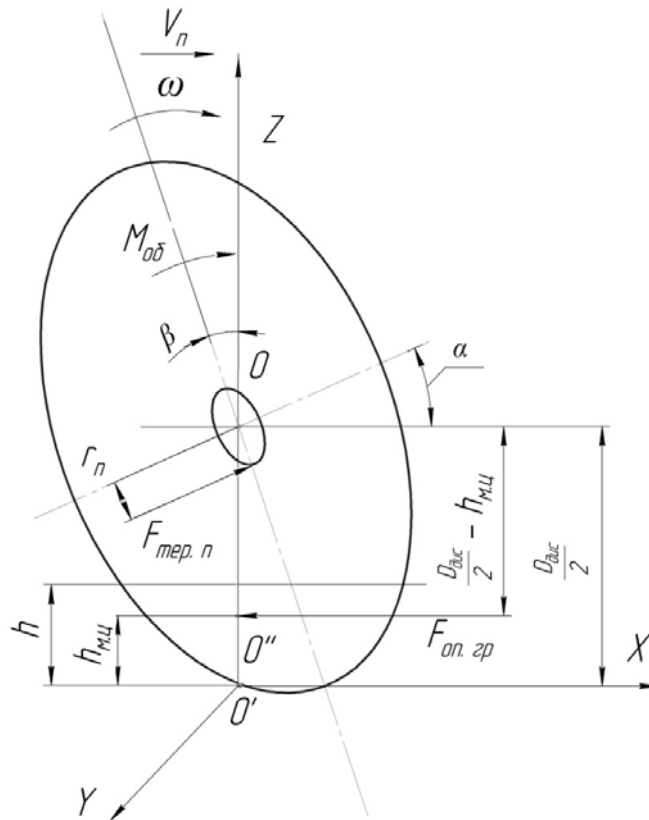


Рис. 1. Схема сил, що діють на диск і забезпечують його обертання
Fig. 1. Scheme of forces acting on a disk and providing its rotation

Аналіз цієї умови свідчить про те, що включення сили опору різання ґрунту як складової загальної сили опору $F_{он.зр}$ невірно, а вірно те, що вона визначається, як сума сил опору. Сила опору $F_{он.зр}$ при обробітці ґрунту прикладена в точці O'' , тобто в місці розташування миттєвого центра обертання вертикального діаметра диска, де кут атаки α і швидкість руху V_n дорівнюють нулю.

Слід зазначити, що відокремлено визначення складових сили опору $F_{он.зр}$, тобто $F_{тер.зр}$ і $F_{он.риз}$ ускладнено. Тому умова взаємодії диска з ґрунтом, тобто момент сил опору ґрунту, що обертає диск навколо осі, має вигляд:

$$M_{об} = F_{он.зр} \cdot \left(\frac{D_{диск}}{2} - h_{м.ц} \right) - F_{тер.п} \cdot r_n$$

або

$$M_{об} = (F_{тер.зр} + F_{он.риз}) \cdot \left(\frac{D_{диск}}{2} - h_{м.ц} \right) - F_{тер.п} \cdot r_n \quad (2)$$

Практично правильність цієї умови можна перевірити методом поздовжнього протягування заглибленого в ґрунт диска. Якщо при цьому диск обертається навколо осі, то процес роботи диска здійснюється за наведеною умовою. А якщо навпаки, диск не

обертається навколо осі, то не спостерігається нормального процесу роботи диска.

У зв'язку з цим доцільно проаналізувати результати експериментальних даних повздовжньої сили тяги, бокової та вертикальної складових, що діють на сферичний

диск, які одержані методом тензометрування та визначити момент сил, що обертають диск.

Мета досліджень. Підтвердити достовірність передбачуваного робочого процесу взаємодії сферичних дискових робочих органів з ґрунтом на основі аналізу одержаних результатів експериментальних даних.

Результати досліджень. Ґрунтообробний сферичний дисковий робочий орган з кутами атаки α і відхилення β від вертикалі, встановлений на окремому стояку є майже ізольованим вузлом дискової борони і має сполучення з рамою цієї борони тільки через підшипник, який розташований знизу стояка. Тільки за такою конструкцією можна установити потрібні кути атаки α і нахилу β до вертикалі та здійснювати їх регулювання [7]. Процес роботи такого диска, тобто його обертання на осі, в заглибленому стані здійснюється за рахунок реакції опору ґрунту на внутрішню сферичну поверхню диска, що відображається на дії сили тяги F_x і складових бокової F_y та вертикальної F_z сил. Звичайно при тензометруванні ці сили заміряються та зображуються в декартовій системі координат XYZ під кутом 90° одна до одної.

На рисунку 2 показано сили F_x , F_y та F_z , які діють на диск і визначені експериментально методом тензометрування. На цьому рисунку наведено перенос цих сил в точку O_1 , тобто в місце розташування миттєвого центра повертання вертикального діаметра диска, в якому кут атаки α і швидкість V_n руху диска дорівнюють нулю. За результатами такого переміщення цих сил з'являється обертальний момент M_{ob} від сил опору ґрунту, який забезпечує обертання диска навколо осі O .

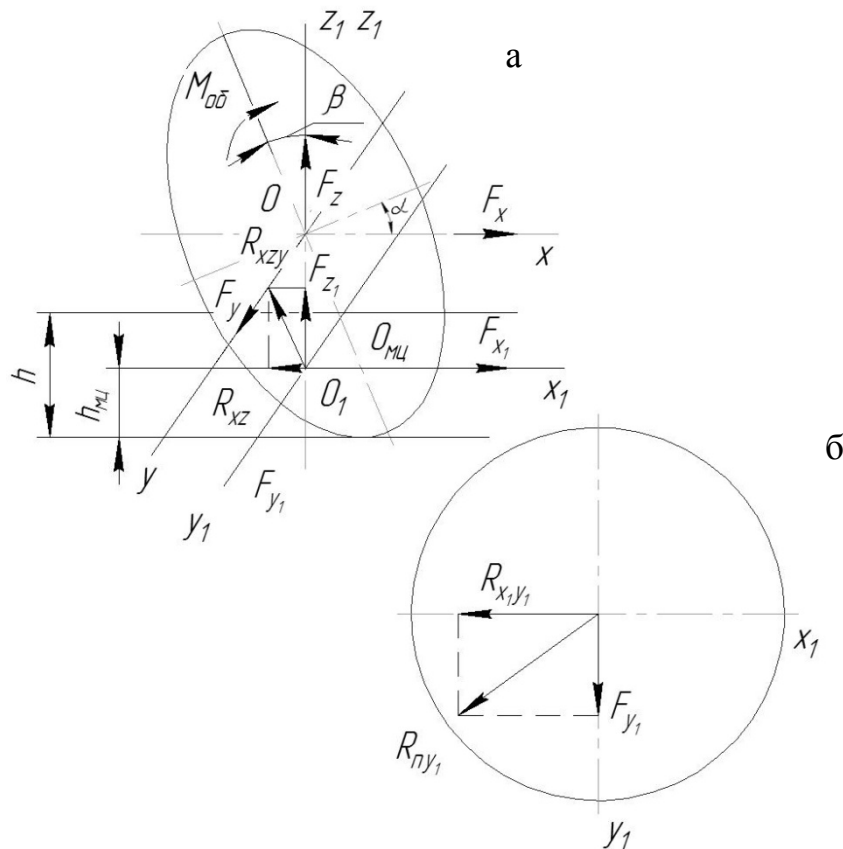


Рис. 2. Схема для визначення сил реакції опору ґрунту (а – загальна схема, б – фрагмент визначення R_{x_1, y_1} в площині x_1, y_1)

Fig. 2. Scheme for determining the reaction forces of soil resistance (a – general scheme, b – fragment of the definition of R_{x_1, y_1} in the plane x_1, y_1)

Сили реакції опору ґрунту R_{y1} і R_{z1} за напрямком руху диска як складові сили тяги F_x визначаються за формулами:

$$R_{y1} = F_{y1} \cdot \operatorname{tg} \left(90 - \beta - \frac{\varphi_{сф}}{2} \right), \quad (3)$$

де β – кут нахилу диска до вертикалі, град;
 $\varphi_{сф}$ – кут сферичності диска, град.

$$R_{z1} = F_{z1} \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (4)$$

Сума сил реакції ґрунту R_{y1} і R_{z1} створює обертальний момент $M_{об}$ з плечем $D_{disc}/2 - h_{м.ц.}$, який забезпечує обертання диска:

$$M_{об} = (R_{y1} + R_{z1}) \cdot \left(\frac{D_{disc}}{2} - h_{м.ц.} \right) \cdot \cos \beta. \quad (5)$$

Звичайно, $h_{м.ц.}$ залежить від багатьох факторів і в першу чергу від фізико-механічних властивостей ґрунту, його твердості, вологості, пластичності, наявності коріння рослин то що. У кожному окремому випадку величину $h_{м.ц.}$ можна визначити за кількістю обертів диска n_0 на довжині ділянки наприклад $L = 50$ м за формулою:

$$h_{м.ц.} = \frac{1}{2} \left(D_{disc} - \frac{L}{\pi n_0} \right). \quad (6)$$

Так, для діаметра диска $D_{disc} = 660$ мм і $n_0 \approx 40$ обертів $h_{м.ц.} = 140$ мм (0,14 м).

Розглянемо на конкретному прикладі діючих сил, що визначені тензометруванням для $D_{disc} = 660$ мм при швидкості руху диска $V_n = 9$ км/год і його заглибленості $h = 18$ см, $\alpha = 30^\circ$ і $\beta = 15^\circ$, які дорівнюють: $F_x = 1082$ Н, $F_y = 476$ Н і $F_z = 186$ Н, величину сили реакції опору ґрунту ($R_{y1} + R_{z1}$) і обертального моменту $M_{об}$.

Зважаючи на те, що вектор нормальної сили опору ґрунту скерований перпендикулярно до внутрішньої сферичної поверхні диска і те, що визначення здійснюється за діаметром рівним $(D_{disc} - 2 h_{м.ц.})$ кут сферичності диска $\varphi \approx 20^\circ$, то вектор скерованості нормальної сили R_{ny1} буде відхиленням на 65° ($90^\circ - \beta - \varphi_{сф}/2 = 90^\circ - 15^\circ - 10^\circ = 65^\circ$) до вертикалі.

Отже,

$$R_{y1} = 476 \cdot \operatorname{tg} 65^\circ = 476 \cdot 2,145 = 1021 \text{ Н},$$

а від вертикалі сили F_{z1} складова сили тяги дорівнює:

$$R_{z1} = 186 \text{ Н} \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 186 \text{ Н} \cdot 0,2679 = 49,8 \text{ Н}.$$

Сума цих сил дорівнює:

$$\Sigma R = R_{y1} + R_{z1} = 1021 \text{ Н} + 49,8 \text{ Н} = 1070,8 \text{ Н}.$$

Це свідчить про те, що сила реакції опору ґрунту майже дорівнює силі тяги і є меншою від неї на $1082 \text{ Н} - 1070,8 \text{ Н} = 11,2 \text{ Н}$, що відбувається за рахунок тертя в підшипнику, на якому змонтований диск. Це зусилля складає 1,03% від сили тяги F_x , а складова бокової сили F_{y1} у загальній силі тяги F_x дорівнює біля 84%. При цьому обертальний момент $M_{об}$ дорівнює:

$$M_{об} = 1070,8 \cdot 0,197 = 210,95 \text{ (Нм)}.$$

Результат аналізу сил, визначених експериментально, свідчить про те, що інших факторів, які діють на диск, крім сили тертя в підшипнику, немає і що умова, яка наведена в аналітичному вигляді (2), має вірне розуміння.

Слід відзначити, що процес роботи сферичного дискового робочого органа в контакті з ґрунтовим середовищем крім приведення диска в обертальний рух включає послідовно різання ґрунту точками його леза з визначеним напрямком їх переміщення, заповнення внутрішньої сферичної порожнини шаром вирізаного ґрунту, переміщення його при обертанні диска і скидання за межами диска вбік за відхиленням кута атаки α .

Зрозуміло, що точки леза диска с початку контакту з ґрунтом у процесі роботи диска не мають можливості переміщуватись за поздовжнім напрямком руху диска, долаючи протидію реакції сили опору ґрунту, як це було прийнято раніше і на чому базуються всі відомі результати теоретичних досліджень [1–5], що не дає можливості зробити вірні пояснення щодо ряду положень, які одержані при експериментальних дослідженнях, особливо при зміні сил, що діють на диск, у залежності від зміни параметрів і режимів роботи диска.

Відносно вірного напрямку переміщення з одночасним різанням ґрунту точкою леза диска, яка є ріжучим профілем дискового робочого органа і яку послідовно дублюють всі інші точки леза диска. Можна достатньо переконливо довести, що вона переміщується вбік від осевої лінії руху диска, якщо спроекувати її траєкторію на горизонтальну

площину. Вона має вигляд, подібний до синусоїди, що свідчить про відхилення її переміщення від поздовжнього напрямку руху диска. У першому наближенні було прийнято, що це відхилення здійснюється поперек осьової лінії руху диска, на основі чого була виведена формула для визначення кута різання ґрунту з деяким обмеженням точності його заміру [6] за рахунок появи миттєвого центра обертання вертикального діаметра. Фактично воно в деякій мірі відхиляється від поперечного перпендикулярного до лінії напрямку руху диска. Більш детально виведення формули для визначення кута різання ґрунту з урахуванням цього відхилення буде наведено в подальших публікаціях.

Аналіз процесу роботи сферичного дискового робочого органа включає також питання, яким чином об'єм ґрунту, що вирізається лезом диска та заповнює його сферичну порожнину, відкидається в суміжну борозну при умові, що цей ґрунт, виконуючи функцію забезпечення обертального руху диска за рахунок сил його тертя по внутрішній сферичній поверхні диска, не повинен і не має можливості переміщуватися на цій поверхні. Проте диск, обертаючись навколо осі O при повздовжньому русі цієї осі зі швидкістю V_n , одночасно переносить і ґрунт, що знаходиться на ньому, в бік відхилення кута α до тої пори, поки будуть діяти сили притискання ґрунту до поверхні диска. Тому доцільно з'ясувати, під дією яких сил і за яким напрямком це здійснюється.

Поки ґрунт знаходиться в контактi з диском зусилля для його переміщення входить у складі сил $F_y = F_{y1}$ та $F_z = F_{z1}$ і відокремлено визначити його складно. Можна передбачити, що це пов'язане з об'ємом цього ґрунту, визначення якого складне. Можна визначити величину хорди C поперечного перетину на поверхні ґрунту, що обробляється, яка визначається за формулою [6]:

$$C = D_{disc} \cdot \sin \left[\arccos \left(1 - \frac{2h}{D_{disc} \cdot \cos \beta} \right) \right] \quad (7)$$

При цьому слід відзначити, що ця формула не враховує величину перекриття двох сусідніх дисків, яке звичайно мається в дисковій бороні. Однак для визначення ємності сферичної порожнини диска при заповненні її розпушеним ґрунтом це не має значення, тому об'єм розпушеного ґрунту значно збільшується, а, відповідно, збільшується і величина хорди C . Зазвичай об'єм сферичної порожнини диска, яка знаходиться під кутом α до повздовжнього руху диска з хордою c , значно перевищує об'єм з хордою поперечного перетину шару ґрунту, а цей об'єм залежить від швидкості руху диска V_n . У даному випадку нас цікавлять сили, які діють на ґрунт у момент утрати контакту з диском, тобто на початку його відкидання.

В узагальненому вигляді схема сил, що діють на ґрунт у момент його сходу з диска, представлена на рисунку 3.

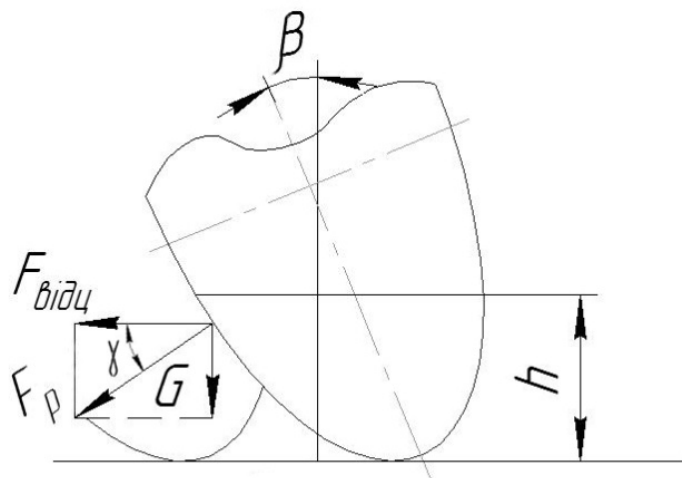


Рис. 3 Схема сил, що діють на ґрунт в момент його сходу з диска
Fig. 3. The scheme of the forces acting on the ground at the moment of its descent from the disk

На ґрунт діють сили: відцентрована $F_{відц.}$ і тяжіння G , які визначаються за формулами:

$$G = m \cdot g \quad (8)$$

$$F_{відц.} = 4 \cdot g \cdot m \cdot \pi^2 \cdot \omega^2 \left(\frac{D_{диск}}{2} - h_{ц.м.} \right)^2 \quad (9)$$

де m – маса ґрунту, кг;
 g – прискорення сили тяжіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

При цьому напрямок руху ґрунту можна вирахувати за напрямком відхилення узагальненої сили F_p під кутом до горизонталі γ :

$$\gamma = \arctg \frac{G}{F_{відц.}} \quad (10)$$

Висновки

Обґрунтовано й уточнено аналітичну залежність сил опору реакції ґрунту при його дискуванні сферичним дисковим робочим органом під дією крутного моменту за рахунок сил, що діють знизу диска, тобто в зоні контакту з ґрунтом.

Бібліографія

1. Синеоков Г. Н. Дисковые рабочие органы почвообрабатывающих машин. Теория и расчет. М.: Машгиз, 1949. 86 с.
2. Нартов П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия. Воронеж: Издательство ВГУ, 1972. 184 с.
3. Канарев Ф. М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия. М.: Машиностроение, 1983. 142 с.
4. Ковбаса В. П. Механіко-технологічне обґрунтування оптимізації взаємодії робочих органів з ґрунтом: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11 / Нац. аграр. ун-т. К., 2006. 35 с.
5. Макаров П. И. Научные основы технологии и ротационных машин для гладкой обработки почвы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Казанская госуниверситет. сельскохоз. академ. Казань, 2000. 367 с.
6. Вольський В. А. Удосконалення параметрів сферичних дискових робочих органів з похилою віссю обертання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Нац. наук. центр «ІМЕСГ». К., 2016. 196 с.
7. Пат. № 99197 Україна, А 01 В 7/00. Борона дискова / Вольський В. А., Дудак С. М., Польовий Б. П., Романенко М. П. № а 2010 15887 А 01 В 7/00; заявл. 29.12.2010; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

8. Taylor P. A. Field measurement of forces and moments on wheat land plow disk / Transaction of ASAE, 1967. Vol. 10. No. 6. P. 762–768, 770.

Bibliografia

1. Syneokov H. N. Dyskovi robochi orhany zemlerobs'kykh mashyn. Teoriya ta rozrakhunok. M.: Mashhyz, 1949. 86 s.
2. Nartov P. S. Diskovyy instrument dlya obrobitku gruntu. Voronezh: Vydavnytstvo VHU, 1972. 184 s.
3. Kanarev F. M. Rotatory ta inventor. M.: Mashynobuduvannya, 1983. 142 s.
4. Kovbasa V. P. Mekhaniko-tekhnologichne obgruntuvannya optymizatsiyi vza-yemodiyi robochykh orhaniv z hruntom: avtoref. dys. ... d-r tekhn. nauk: 05.05.11 / Natsional'nyy ahrarnyy universytet. Kazan, 2006. 35 s.
5. Makarov P. I. Naukovi osnovy tekhnolohiyi ta rotorni mashyny dlya hladkoyi obrobky hruntu: avtoref. dys. ... d-r tekhn. nauk: 05.20.01 / Kazanskaia hosudarst. selskokhoz. akadem. K., 2000. 367 s.
6. Volskyi V. A. Udoskonalennia parametriv sferychnykh diskovykh robochykh orhaniv z pokhyloiu vissiu obertannia: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.11 / Nats. nauk. tsentr «IMESH». K., 2016. 196 s.
7. Pat. # 99197 Ukraina, A 01 V 7/00. Borona diskova / Volskyi V. A., Dudak S. M., Polovyi B. P., Romanenko M. P. # a 2010 15887 A 01 V 7/00; zaiavl. 29.12.2010; opubl. 25.07.2012, Biul. # 14.
8. Teylor P.A. Pole vymiryuvannya syl i momentiv na pshenytsi zemlyu pluhovyy disk / Transaktsiya ASAE, 1967. T. 10. No. 6. S. 762–768, 770.

Bibliography

1. Sineokov G. N. Disk working organs of tillage machines. Theory and calculation. M.: Mashgiz, 1949. 86 p.
2. Nartov P. S. Disc Soil Cultivating Tools. Voronezh: Izdatelstvo VSU, 1972. 184 p.
3. Kanarev F. M. Rotary tillers and implements. M.: Mechanical Engineering, 1983. 142 p.
4. Kovbasa V. P. Mechanic-technological substantiation of optimization of interaction of working bodies with soil: author's abstract. dis. ... dr. tech. sciences: 05/05/11 / National agrar un. K., 2006. 35 p.
5. Makarov P. I. Scientific foundations of technology and rotary machines for smooth soil cultivation: author's abstract. dis. ... dr. tech. sciences: 05.20.01 / Kazan. the state. agricultural akadem. Kazan, 2000. 367 p.
6. Volsky V. A. Improvement of the parameters of spherical disk working bodies with an inclined axis of rotation: author's abstract. dis. ... cand. of technical sciences: 05.05.11 / National sciences Center "IMESG". K., 2016. 196 p.
7. Pat. No. 99197 Ukraine, A 01 B 7/00. Disc harrow / Volsky V. A., Dudak S. M, Poloviy B. P., Romanenko M. P. No. 2010 15887 A 01 B 7/00; stated. 29.12.2010; has published Jul 25, Bul. No. 14.
8. Taylor P. A. Field measurement of forces and moments on wheat land plow disk / Tranzaction of ASAE, 1967. Vol. 10. No. 6. P. 762–768, 770.