



Исследование распределения давления на лопадки ротационного рыхлителя почвы путем имитационного моделирования

Виктор Иванович Мясенко,

доктор технических наук, профессор,

e-mail: library82@mail.ru

Кузбасский государственный аграрный университет, г. Кемерово, Российская Федерация

Реферат. Внедрение технологий минимальной обработки почвы требует поиска новых конструкций энергосберегающей техники. Применение ротационных разрыхлителей для поверхностной обработки почвы на глубину высева семян имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными орудиями как по энергоемкости, так и напряжению воздействия. (*Цель исследования*) Изучить характер распределения давления почвы на лопадки ротационного рыхлителя путем имитационного нагружения. (*Материалы и методы*) Применялся имитационный метод моделирования нагружения лопаток ротационного рыхлителя при взаимодействии с почвенной средой. Определялись величины нормального давления в разных точках поверхности трения лопаток при их движении в круговом почвенном канале. Значения нормального давления устанавливались косвенным методом по измерению величины износа в разных точках поверхности лопаток. Предварительно на поверхности трения носился легкоистираемый материал и измерялась интенсивность его истирания магнитоиндукционным методом. (*Результаты и обсуждение*) Траектория движения лезвия лопатки в почве описывается уравнением трахоиды. Процесс рыхления подобен «копанию» и разделяется на два периода – заглубления и выглубления лопатки с перемещением части взрыхленной почвы на поверхность поля. Получены уравнение перемещения лопатки в зависимости от угла ее поворота от начала заглубления до выглубления и теоретическая зависимость характера нагружения лопатки в период перемещения. В результате имитационного нагружения лопаток измерялась интенсивность абразивного износа в разных точках поверхности трения и получены соответствующие уравнения регрессии, что позволяло судить о характере внешнего нагружения лопаток рыхлителя. (*Выводы*) Резание почвы при ее рыхлении ротационным рыхлителем происходит тремя режущими кромками: нижним лезвием и двумя боковыми кромками лопатки рыхлителя, что характеризует особенность движения почвы по рабочей поверхности лопатки. При производстве рыхлителей следует предусматривать упрочнение нижней и боковых кромок лопаток для обеспечения необходимой износостойкости.

Ключевые слова: лопадка ротационного рыхлителя почвы, имитационное нагружение, распределение давления, абразивный износ, износостойкость.

■ **Для цитирования:** Мясенко В.И. Исследование распределения давления на лопадки ротационного рыхлителя почвы путем имитационного моделирования // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 30-34. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-30-34. EDN: OQEMDL.

Scientific article

Simulation-Based Analysis of Pressure Distribution on Rotary Soil Loosener Blades

Victor I. Myalenko

Dr.Ph.(Eng.), professor,

e-mail: library82@mail.ru

Kuzbass State Agricultural University, Kemerovo, Russian Federation

Abstract. The paper highlights the necessity of developing new energy-efficient machinery designs to implement minimum tillage technologies effectively. The use of rotary loosening tools for surface soil treatment at seed sowing depth offers several advantages over traditional implements in terms of both energy efficiency and reduced soil impact intensity. (*Research purpose*) The study aims to determine the distribution patterns of soil pressure on the blades of a rotary soil loosener under simulated loading conditions. (*Materials and methods*) A simulation-based modeling approach was used to analyze the loading of rotary loosener blades during their interaction with soil. Normal pressure values were measured at different points on the friction surface of the blades as they moved through a circular soil channel. These values were inferred by assessing wear intensity at various blade surface points.

To facilitate this, a soft, easily erodible material was applied to the friction surface, and its wear intensity was measured using a magnetic induction method. (*Results and discussion*) The trajectory of blade movement in soil is described by a trochoidal path equation, while the loosening process itself resembles a «digging» motion. This process consists of two phases: penetration and retraction during which part of the loosened soil is displaced to the field surface. An equation was derived to describe blade movement in the soil as a function of its rotation angle spanning from the start of penetration to the retraction phase. Additionally, a theoretical model was developed to characterize blade loading patterns during soil interaction. Simulated blade loading enabled the measurement of abrasive wear intensity at various points on the friction surface. These measurements facilitated the development of a regression equation that defines the external loading characteristics of the loosener blades. (*Conclusions*) Soil cutting during loosening with a rotary soil loosener occurs through three cutting edges: the lower blade edge and the two side edges of the blade. This mechanism defines the nature of soil movement along the working surface of the blade. When manufacturing loosening tools, it is essential to ensure high wear resistance of the lower and side edges of the blade through reinforcement techniques.

Keywords: rotary soil ripper blade, simulated loading, pressure distribution, abrasive wear, wear resistance.

■ For citation: Myalenko V.I. Simulation-based analysis of pressure distribution on rotary soil loosener blades. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 30-34 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-30-34. EDN: OQEMDL.

Широкое распространение технологии минимальной обработки почв предполагает применение новых конструкций почво-образующей техники [1] для поверхностной обработки на глубину высева семян [2]. Целенаправленность поиска новых конструкций сориентирована на достижение минимальных энергетических затрат с сохранением необходимого качества выполнения технологических операций [3].

Применение ротационных разрыхлителей для поверхностной обработки почвы на глубину высева семян имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными орудиями (культиваторы, лущильники) и обеспечивает снижение энергоемкости на 17-22%, сохраняя низкое напряжение воздействия на почву (сжатие, растяжения) 0,5-1,5 МПа [4].

Традиционно для обработки почвы используют разнообразные рабочие органы, в основе которых, как правило, прямой или косо поставленный клин. При движении клиновидных рабочих органов в почве процесс ее разделения на устойчивые совокупности вызывает чередование воздействий напряжения сжатия, скола и растяжения. При этом прочность почвы на сжатие до 10 раз выше, чем при растяжении, а также при чрезмерном сжатии снижается качество обработанной почвы (Чумаков Е.В., Маджанова А.Г. Неравномерность деформаций при растяжении и при сжатии; сб. конф. «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении», Андижан, 2014 г.). В связи с этим рабочие органы, действие которых основано на принципах подобия «копанию», более предпочтительны для технологий минимальной обработки почвы [5].

Действительно, составляющие почву структурные агрегаты представляют собой устойчивые почвенные совокупности из частиц материнской породы, скрепленные достаточным количеством агроминеральных образований. При этом струк-

турные агрегаты соединены друг с другом отдельными площадками, определяющими их связность. Все остальные пустоты заполнены либо водой, либо почвенным воздухом. Преодоление этих структурных связей и разделение почвы на устойчивые агрегатные совокупности для спелых почв происходит при создании внутренних напряжений 0,1-0,3 МПа определенной направленности. В то же время для разрушения непосредственно структурных почвенных агрегатов требуется создать внутренние напряжения более 10 МПа [4]. Последние обстоятельства подчеркивают актуальность исследований работ по обоснованию конструкций ротационных рыхлителей почвы.

Цель исследования – установить характер распределения давления почвы на лопатки ротационного рыхлителя.

Материалы и методы. Используемый в исследовании метод имитационного моделирования процесса работы почворежущих деталей обеспечивал возможность применения необходимой приборной базы измерения и не ограничивал в выборе времени измерений [6]. Имитационный стенд представлял собой круговой почвенный канал, где почвенная среда состояла из почвенно-песчаной смеси (легкий суглинок) необходимой твердости с влажностью 18-22%.

Модель ротационного рыхлителя представлялась в виде отдельной секции, на ободе которой размещались прямые радиально расположенные лопатки. Радиус обода $r = 120$ мм, длина лопатки $n_0 = 70$ мм. Нанесение легкоистираемого материала на поверхность трения лопаток обеспечивало довольно точное измерение магнитоиндукционным способом величин износа в разных точках поверхности.

Результаты и обсуждения. При выборе параметров испытываемой модели ротационного рыхлителя почвы учитывались результаты теоретических

исследований и практических проверок [7, 8]. В том числе учитывались результаты исследований комбинированных рыхлителей и характеристики их практической работы [9; Нормирзаев А.Р., Нишонов Б.М. Результаты испытаний по выбору ротационного рыхлителя; мат конф. «Инновации в сельскохозяйственном машиностроении, энергосберегающие технологии и повышение эффективности использования ресурсов». Ч. 1. Рязанский ГАУ, 2022. С. 447-443. EDN: MBQQQY).

Схема работы рыхлителя приведена на [рисунке 1](#).

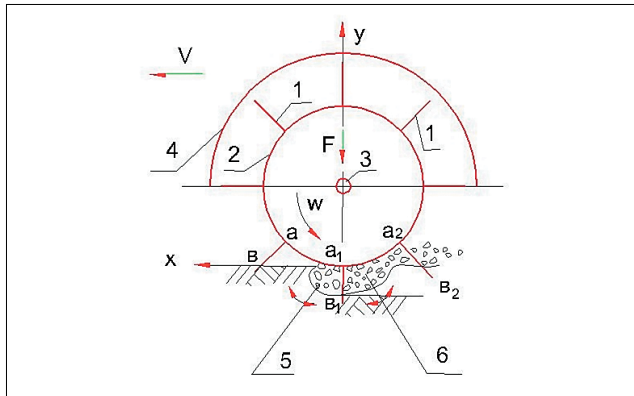


Рис. 1. Принципиальная схема работы ротационного рыхлителя почвы: 1 – лопатки; 2 – обод крепления лопаток; 3 – ось вращения обода; 4 – защитный кожух; 5 и 6 – интервалы заглубления и выглубления лопаток
Fig. 1. Schematic diagram illustrating the operation of a rotary soil loosener: 1 – blades; 2 – blade mounting rim; 3 – rim rotation axis; 4 – protective casing; 5 and 6 – blade penetration and retraction interval

При движении рыхлителя в направлении V обод крепления лопаток 2 перекачивается по поверхности поля, поочередно внедряя лопатки 1 и производя рыхления поверхностного слоя почвы. Рыхлитель в данном случае применяется бесприводный, а вращение обода происходит за счет реактивного действия погруженных в почву лопаток. Давление силой F создается либо навесной системой трактора, либо балластным грузом.

Траектория движения лезвия лопатки (точка $в$) осуществляется по трахоиде, параметрическое уравнение которой имеет вид:

$$x = r_t - (r + n) \sin \alpha, y = r - (r + n) \cos \alpha, \quad (1)$$

где r – радиус обода, мм; n – длина лопатки, мм; t – угол положения лопатки, рад; α – тот же угол, град.

В процессе заглубления лопатка поворачивается на некоторый угол α , начиная от касания почвы $\alpha_{\max}$ до достижения максимальной глубины погружения в почву $\alpha = 0$, т.е. от $a_в$ к положению $a_1в_1$ и далее к $a_2в_2$ (рис. 2). При этом длина погружения лопатки изменяется по мере ее поворота

$$n_i = n_0 - r \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \quad (2)$$

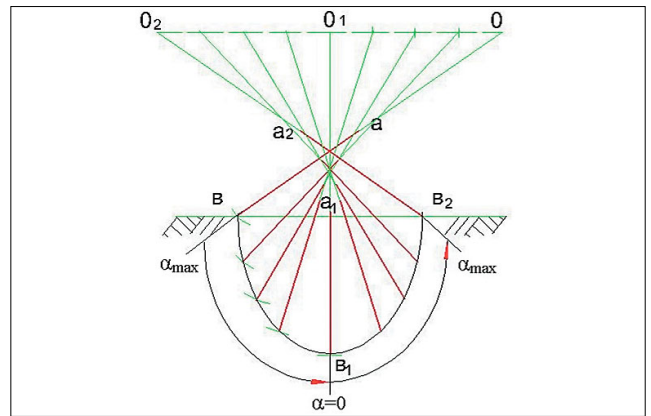


Рис. 2. Фазы перемещения лопатки рыхлителя в почве. Точки 0, 0₁, и 0₂ – перемещение оси обода рыхлителя; перемещение $aв$ к $a_1в_1$ – заглубление; перемещение $a_1в_1$ к $a_2в_2$ – выглубление
Fig. 2. Phases of loosener blade movement in the soil. Points 0, 0₁, and 0₂ – movement of the loosener rim axis; movement $aв$ to $a_1в_1$ – penetration; movement $a_1в_1$ to $a_2в_2$ – retraction

где n_i – текущее значение длины погружения лопатки; n_0 – общая длина лопатки; r – радиус обода; α – угол поворота лопатки.

В первом приближении условно принято, что величина нормального давления вначале одинакова по всей поверхности трения и только зависит от продолжительности перемещения поверхности в почве при изменении угла α . Тогда с учетом выражения (2) можно считать, что характер изменения нормального давления по длине лезвия будет подобен зависимости:

$$\begin{cases} n_i = n_0 - r \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \\ N_i = n_i N_H \end{cases}, \quad (3)$$

где N_i и N_H – текущее и некоторое номинальное значение нормального давления.

Физическое нагружение лопаток ротационного рыхлителя проводилось путем имитационного моделирования [10]. Учитывая пропорциональность величин нормального давления и интенсивность износа (выноса) материала в соответствии с законом Арчарда, принимаем интенсивность износа как переменную в исследовании характера распределения давления на поверхность трения [11].

На [рисунке 3](#) изображены графически результаты измерений интенсивностей износа в разных точках поверхности трения лопатки рыхлителя $\Delta I = f(n_i)$. На нем расположены две шкалы абсцисс: α – угол поворота лопатки при движении ее в почве и n_i – текущее значение длины лопатки, а также две оси ординат $N(H)$ – нормальное давление и ΔI – интенсивность износа при имитационном нагружении. Получены две характеристики, при этом интенсивность нагружения лопатки в обоих случаях уменьшается от лезвия к спинке.

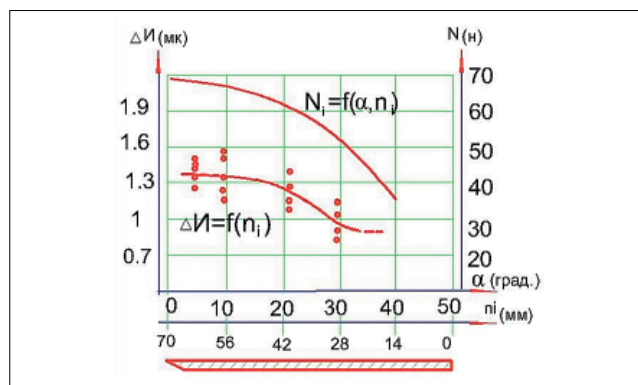


Рис. 3. Распределение давления почвы по длине лопатки ротационного рыхлителя. $N = f(\alpha)$ – теоретическое приближение; $\Delta I = f(n_i)$ – имитационное нагружение
Fig. 3. Soil pressure distribution along the length of the rotary soil loosener blade. $N = f(\alpha)$ – theoretical approximation; $\Delta I = f(n_i)$ – simulated loading

Уравнение регрессии при имитационном нагружении:

$$\Delta I = -0,0005n^3 + 0,0019n^2 - 0,047n + 1,176. \quad (4)$$

Результаты измерения интенсивности износа поверхности трения по ширине лопатки показаны на рисунке 4.

Уравнение регрессии, описывающее интенсивность износа по ширине лопатки:

$$\Delta I = 0,001h^2 - 0,043h + 1,611. \quad (5)$$

Общий контур объемной эпюры интенсивности износа лопатки рыхлителя при взаимодействии с почвой (рис. 5) характеризует неравномерность нагружения и износа поверхности трения. Здесь следует отметить, что все почворежущие детали различных орудий испытывают неравномерные нагружение и износ поверхностей трения [12, 13]. При этом имеется возможность численного моделирования эмпирических данных для практического применения [14].

Выводы. Резание почвы при ее обработке ротационным рыхлителем происходит, по крайней мере, тремя режущими кромками: нижним лезвием и

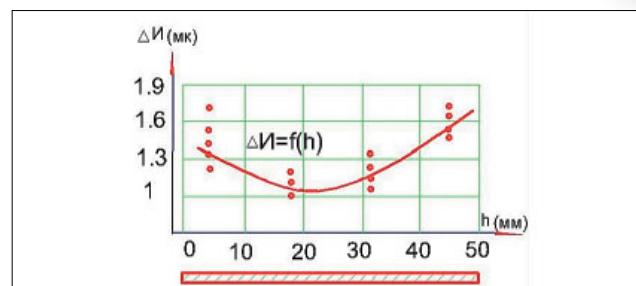


Рис. 4. Распределение интенсивностей износа (ΔI) поверхности трения по ширине лопатки (h)
Fig. 4. Wear intensity distribution (ΔI) on the friction surface along the blade width (h)

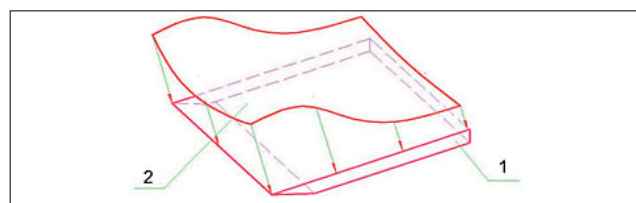


Рис. 5. Объемный контур эпюры интенсивности абразивного износа лопатки: 1 – лопатка рыхлителя; 2 – верхняя грань эпюры
Fig. 5. Three-dimensional contour diagram illustrating the distribution of abrasive wear intensity on loosener blade: 1 – loosener blade; 2 – upper surface of the diagram

двумя боковыми кромками лопатки. Исходя из этого, почва перемещается не только в направлении от нижнего лезвия, но и от боковых граней лопатки, выполняющих функции режущих кромок.

Траектория движения лопатки в процессе заглубления предполагает возможность применения лопаток криволинейной формы, улучшающей их заглубляющие способности.

Практическое применение высокопроизводительных ротационных рыхлителей предусматривает необходимость при их изготовлении обеспечивать разную износостойкость нижней и боковых кромок, более нагруженных в процессе работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Коротких Н.А. Перспективы технологии No-till в Сибири // *Земледелие*. 2014. N1. С.16-19. EDN: RXOOER.
- Щилов В.Н., Пархоменко Г.Г. Проектирование рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформаций растяжения // *Вестник АПК Ставрополя*. 2016. N3 (23). С. 57-62. EDN: XCCEZD.
- Мяленко В.И. Парное моделирование трибологического процесса абразивного износа почворежущих деталей // *Трение и износ*. 2023. N4 (44) С. 369-376. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-369-375.
- Дидигер В.Р., Годунова Е. В., Гаджимаров Р.Г. Влияние технологии No-till на содержание питательных элементов в черноземе обыкновенном Центрального Предкавказья // *Земледелие*. 2023. N6. С. 6-9. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-6-6-9.
- Amin M., Khan M.J., Jan M.T. et al. Effect of different tillage practices on soil physical properties under wheat in semi-arid environment. *Soil and Environment*. 2014. Vol. 33. Iss. 1. 33-37.
- Mairghanya M., Yahyaa A., Adamb N.M. et al. Rotary tillage effects on some selected physical properties of fine textured soil in wetland rice cultivation in Malaysia. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194. DOI: 10.1016/j.still. 2019.104318.

7. Булгариев Г.Г., Пикмуллин Г.В., Галиев И.Г. и др. Обоснование формы и определение конструктивных параметров ротационного рыхлителя почвы // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 13. N3 (50). С. 73-76. DOI: 10.12737/article_5bcf57b1d90178.85890011.
8. Сокол Н.А., Гультияев В.В. Результаты экспериментальных исследований ротационного рыхлителя почвы // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2008. N1 (36). С. 96-100.
9. Булгариев Г.Г., Пикмуллин Г.В., Галиев И.Г. Обоснование формы и определение конструктивных параметров ротационного рыхлителя почвы // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2018. N3 (50). С. 73-76. DOI: 10.12737/article_5bcf57b1d90178.85890011.
10. Мясенко В.И. Карта абразивного износа поверхности трения почворежущей детали // *Трение и износ*. 2020. N1 (41). С. 128-132. EDN: CQUHEO.
11. Napiorkowski J., Lemecha M., Konat L. Forecasting the wear of operating parts in an abrasive soil mass using the Holm-Archard Model. *Materials*. 2019. 12(13). 2180. DOI:10.3390/ma12132180.
12. Скиркус Р., Янкаускас В., Гайдис Р. Моделирование рабочих контактных нагрузок почвообрабатывающего элемента // *Трение и износ*. 2016. Т. 37. N4. С. 510-515. EDN: WMDXRH.
13. Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Модель изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтовым массивом // *Трение и износ*. 2022. Т. 43. N4. С. 397-404. DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-4-397-404.
14. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C. et al. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018. Vol. 127. 122-128. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.019.

REFERENCES

1. Vlasenko A.N., Vlasenko N.G., Korotkih N.A. Prospects of no-till technology for crops cultivation in Siberia. *Zemledelie*. 2014. N1. 6-19 (In Russian). EDN: RXOOR
2. Shchirov V.N., Parkhomenko G.G. Designing of the working bodies for loosening soil using the deformational tensile. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2015. N3 (23). 28-34 (In Russian). EDN: XCCEZD.
3. Myalenko V.I. Paired modeling of the tribological process of the soil-cutting parts' abrasive wear. *Journal of Friction and Wear*. 2023. N4 (44). 369-376 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-4-369-375.
4. Dridiger V.R., Godunova E. V., Gadjiomarov R.G. The effect of No-till technology on the nutrient content in common chernozem of the Central Ciscaucasia. *Zemledelie*. 2023. N6. С. 6-9. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-6-6-9.
5. Amin M., Khan M.J., Jan M.T. et al. Effect of different tillage practices on soil physical properties under wheat in semi-arid environment. *Soil and Environment*. 2014. Vol. 33. Iss. 1. 33-37 (In English).
6. Mairghanya M., Yahyaa A., Adamb N.M. et al. Rotary tillage effects on some selected physical properties of fine textured soil in wetland rice cultivation in Malaysia. *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 194 (In English). DOI: 10.1016/j.still.2019.104318.
7. Bulgariev G., Pikmullin G., Galiev I. et al. Substantiation of the form and determination of the constructive parameters of the rotation roller of soil. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2018. Vol. 13. N3 (50). 73-76 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5bcf57b1d90178.85890011.
8. Sokol N.A., Gul'tyaev V.V. Results of experimental researches of ground melter. *Vestnik of Don State Technical University*. 2008. N1 (36). 96-100 (In Russian).
9. Bulgariev G., Pikmullin G., Galiev I. Substantiation of the form and determination of the constructive parameters of the rotation roller of soil. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2018. N3 (50). 73-76 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5bcf57b1d90178.85890011.
10. Myalenko V.I. Abrasion maps of the friction surface of an earth-cutter part. *Journal of Friction and Wear*. 2020. N1 (41). 128-132 (In Russian). EDN: CQUHEO.
11. Napiorkowski J., Lemecha M., Konat L. Forecasting the wear of operating parts in an abrasive soil mass using the Holm-Archard Model. *Materials*. 2019. 12(13). 2180 (In English). DOI:10.3390/ma12132180.
12. Skirkus R., Jankauskas V., Gaidys R. Modeling contact loads of tillage element. *Journal of Friction and Wear*. 2016. Vol. 37. N4. 510-515 (In Russian). EDN: WMDXRH.
13. Grigorev P.A., Sladkova L.A. The model of wear of the working bodies of earthmoving machines in interaction with the soil mass. *Journal of Friction and Wear*. 2022. Vol. 43. N4. 397-404 (In Russian). DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-4-397-404.
14. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C. et al. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018. Vol. 127. 122-128 (In English). DOI: 10.1016/j.triboint.2018.03.019.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.
The author read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

03.12.2024
24.02.2025