

Моделирование трибологических процессов абразивного износа почворезущих деталей

Виктор Иванович Мяленко,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: library82@ksai.ru

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кемерово, Российская Федерация

Реферат. Показали, что имитационное моделирование физических процессов дает возможность изучить взаимодействие почворезущих деталей с почвой в течении 2-6 часов наблюдений, когда требуется сжатие временной шкалы на создание новой конструкции. (*Цель исследования*) Разработать модели трибологического процесса абразивного износа почворезущих деталей на основе совмещения имитационного нагружения поверхностей трения с параметрами силовых эквивалентов реальных почв при последующей эксплуатации. (*Материалы и методы*) Применили метод имитационного нагружения. На примере плоских эпюр нагружения использовали метод сопоставления силовых эквивалентов имитационного и реального нагружения поверхностей трения почворезущей детали. Описали особенности нестандартного лабораторного оборудования, обеспечивающего построение эпюр нормальных давлений по поверхностям трения. В качестве опытного образца исследовали прямой клин-рыхлитель. (*Результаты и обсуждение*) Установили эпюры нагружения поверхности трения при изменении углов рыхления, при этом площадь эпюры давления изменялась от 2000 до 12 000 квадратных миллиметров. Определили величины силовых эквивалентов, действующих со стороны реальных почв предполагаемых зон эксплуатации. Отметили, что совмещение характеристик имитационного нагружения рабочих органов с параметрами силовых эквивалентов реальных почв позволяет прогнозировать надежность и срок службы создаваемых конструкций почворезущих деталей. (*Выводы*) Установили, что полученная модель трибологического процесса абразивного износа почворезущих деталей обеспечивает совмещение результатов имитационного нагружения с величинами силовых эквивалентов реальных почв, позволяющее при этом сократить сроки создания новых конструкций деталей в пределах 0,5-1 года и с нормативными показателями надежности и качества выполнения технологического процесса.

Ключевые слова: почвообработка, почворезущие детали, клин-рыхлитель, абразивный износ, имитационное моделирование, силовые эквиваленты почвенного нагружения.

■ **Для цитирования:** Мяленко В.И. Моделирование трибологических процессов абразивного износа почворезущих деталей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 69-75. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-69-75. EDN WEUTDP.

Modeling of Tribological Processes for Abrasive Wear of Soil-Cutting Part

Viktor I. Myalenko,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: library82@mail.ru

Kuzbass State Agricultural Academy, Kemerovo, Russian Federation

Abstract. It is shown that simulation modeling of physical processes makes it possible to study the interaction of soil-cutting parts with soil during the observation period of 2-6 hours, when it is required to compress the time scale for creating a new design. (*Research purpose*) To develop models of the tribological process for abrasive wear of soil-cutting parts based on the combination of simulated loading of friction surfaces with the parameters of the real soil force equivalents. (*Materials and methods*) This study is based on the simulated loading method and the method of comparing the force equivalents of simulated and real loadings of the friction surfaces of soil-cutting parts using the example of loading flat diagrams. The paper describes the features of non-standard laboratory equipment that facilitates the construction of normal stress diagrams on friction surfaces. As a prototype, a straight wedge opener was investigated. (*Results and discussion*) As a result the friction surface loading diagrams were obtained with a change in the loosening angles and the range of the stress diagram area from 2,000 to 12,000 square millimeters. The values of force equivalents acting from the real soils of the proposed operating areas were determined. It was noted that combining the

characteristics of simulated loading of working parts with the parameters of real soil force equivalents makes it possible to predict the reliability and service life of the created structures of soil-cutting parts. (*Conclusions*) It has been established that the obtained model of the tribolithic process for abrasive wear of soil-cutting part ensures the superposition of simulated loading results with the values of real soil force equivalents, thus providing a 0.5-1 year reduction in the terms of creating new parts and maintaining the normative indices of technological process reliability and quality.

Keywords: tillage, tillage parts, wedge-grinder, abrasive wear, simulation modeling, force equivalents of soil loading.

For citation: Myalenko V.I. Modelirovanie tribologicheskikh protsessov abrazivnogo iznosa pochvovrezhushchikh detaley [Modeling of tribological processes for abrasive wear of soil-cutting part]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 69-75 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-69-75. EDN WEUTDP.

Имитационное моделирование физических процессов востребовано в инженерном поиске при совершенствовании рабочих органов сельскохозяйственных машин для обработки почвы и ухода за культурными растениями [1]. Оно дает возможность изучить процессы взаимодействия почвообрабатывающего орудия с почвой, когда требуется сжатие временной шкалы наблюдения.

В реальных условиях эксплуатации почвообрабатывающих орудий довольно сложно обеспечить необходимую приборную базу наблюдений за характером процессов, происходящих как в обрабатываемой почве, так и при силовом нагружении почворезущих деталей [2, 3].

Вместе с тем имитация реальных физических процессов даже с обеспечением высокой степени подобия своего осуществления позволяет лишь судить о характере протекания процесса, в данном случае, о характере распределения нагружения по поверхностям трения почворезущих деталей. Действительные значения величин нагружения можно установить только с учетом свойств реальных почвенных сложенных. Необходимо специальное «тестирование» почв, где предполагается дальнейшая эксплуатация почвообрабатывающих орудий.

Цель исследования – разработка модели трибологического процесса абразивного износа почворезущих деталей на основе совмещения имитационного нагружения поверхностей трения с параметрами силовых эквивалентов реальных почв при последующей эксплуатации.

Материалы и методы. Анализ процессов абразивного износа почворезущих деталей как правило проводят, основываясь на классических законах Амонтона-Кулона и Арчарда [4]:

$$F = \mu \cdot N, \quad (1)$$

где F – сила трения, Н;

μ – постоянный коэффициент трения;

N – нормальное давление, Н;

$$V = \mu NL/H, \quad (2)$$

где V – объем материала, выносимого с поверхности трения, мм³;

L – путь трения, мм;

H – твердость более мягкой из двух контактирующих поверхностей, МПа.

Сила трения и объем материала, выносимого с поверхности трения, зависят от одной переменной величины – нормального давления. Тогда при организации имитационного моделирования предопределяется техническая задача: найти возможность практического измерения величин нормального давления в разных точках поверхностей трения испытываемого образца при его физическом нагружении в лабораторных условиях.

При решении этой задачи всякое применение конструкторских решений, связанных с установкой специальных силоизмерителей, взаимодействующих с поверхностями трения испытываемых деталей, приводит к нарушениям самой природы перемещения почвы по поверхностям рабочих органов. В исследовательской практике в подобных случаях применяют методы косвенного измерения нормального давления [5, 6]. Так, при абразивном износе сопоставляют объемы изнашиваемого материала с величинами нормального давления (пропорциональная зависимость), выявляя те, которые были причиной износа.

Одним из наиболее распространенных способов измерения интенсивности абразивного износа (косвенно нормального давления) считается способ контрольных баз, или вырезанных лунок на исследуемых поверхностях трения [5, 7]. В процессе износа испытываемого образца по измерению глубины лунки до и после износа судят о величине нормального давления, которое вызвало этот износ. Однако лунки на поверхности детали создают дополнительное сопротивление и тем самым нарушают природу движения почвы по поверхности почворезущей детали. Известен оригинальный метод моделирования износа поверхностей трения почворезущих лезвий, проводимый в лабораторных условиях с искусственной абразивной средой [8]. В данном случае в состав абразивной среды входили парафин, кварцевые частицы, церезин и вазелин. Тем самым достигалась адекватность реальным суглинистым почвам, подтверждаемая критериями подобия. Вместе с тем реализация этого метода моделирования представляется весьма

трудоемкой в практическом использовании и требует специальной приборной базы. Наиболее перспективные методы оценки нормального давления основаны на нанесении на поверхности трения легкоистираемых материалов [9]. Тогда косвенным путем можно определить величины нормального давления в тех или иных точках поверхностей трения.

В качестве приборной базы применили круговой почвенный стенд (рис. 1).

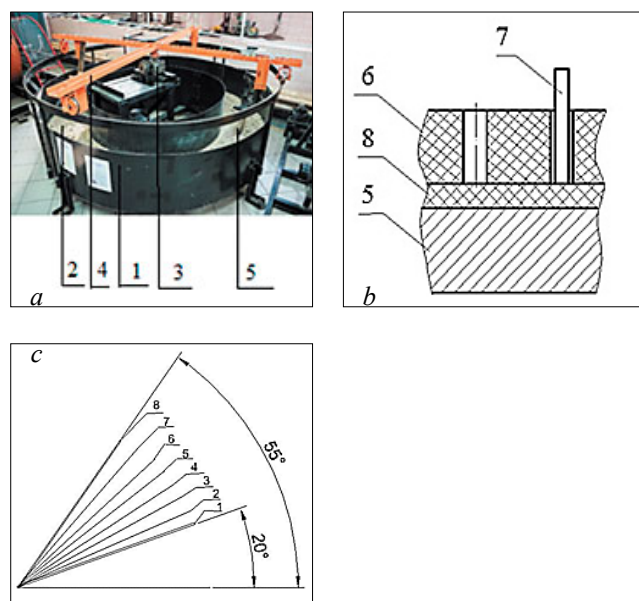


Рис. 1. Круговой имитационный стенд: а – общий вид; б – магнитоиндукционный измеритель; с – опытный образец с разными углами рыхления; 1 – емкость с почвенной средой; 2 – почвенная среда; 3 – привод вала вращения; 4 – водило; 5 – испытательный образец; 6 – кондуктор; 7 – щуп с сердечником; 8 – слой легкоистираемого материала

Fig. 1. Circular simulation bench: a – general view; b – magneto-induction meter; c – test sample with different loosening angles; 1 – vessel with soil medium; 2 – soil medium; 3 – rotation shaft drive; 4 – driver; 5 – test sample; 6 – conductor; 7 – probe with core; 8 – abradable material layer

При имитационном нагружении испытываемый образец помещали в заранее подготовленную почвенную среду. На его поверхность трения нанесен слой легкоистираемого материала. По интенсивности истирания магнитоиндукционным способом щупом измерителя оценивали вынос легкоистираемого материала с конкретных точек поверхности трения. Удельное нормальное давление определяли косвенным методом в соответствии с зависимостями (1) и (2):

$$N = \Delta V_{\text{из}} / \mu K, \quad (3)$$

где $\Delta V_{\text{из}}$ – точечная величина износа материала с поверхности трения, мм³.

K – коэффициент, характеризующий сопротивляемость абразивному износу легкоистираемого материала.

В качестве опытного образца почворежущей де-

тали исследовали прямой клин-рыхлитель (100×140 мм) с постановкой разных углов рыхления в интервале 20-55° к горизонту. Адекватность характера распределения внешнего нагружения по поверхности трения (эпюра) в имитационной модели достигалась с учетом трех основных составляющих подобия реальным условиям эксплуатации:

- обрабатываемой среды – почвы;
- геометрических параметров почворежущей детали;
- адекватных режимов перемещения почворежущей детали в имитационной среде, как в реальных условиях эксплуатации.

Почва – многомерная среда, состояние ее агротехнической спелости при прочих условиях (влажность, температура и др.) характеризуется снижением сил взаимодействия между отдельными микроагрегатами, когда при механическом рыхлении она способна распадаться на отдельные устойчивые совокупности [9]. В соответствии с этим при физическом моделировании имитационная среда представляла собой связно-сыпучую структуру, в основе которой были песчаные (абразивные) составляющие.

При имитационном нагружении геометрические параметры почворежущей детали (клина-рыхлителя) и режимы его перемещения в почвенной среде были сохранены и соответствовали реальным условиям эксплуатации почворежущей детали.

Контур эпюры нормальных давлений представляет собой объемную фигуру. Ее верхняя поверхность составлена величинами нормальных давлений, а нижняя представлена поверхностью трения с точками приложения нормальных давлений (рис. 2).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Угол рыхления влияет на характер распределения нормального давления по поверхности трения. Для дальнейшего анализа удобно перейти от объемной эпюры к ее плоской части, представляющей средние значения по всей ширине клина-рыхлителя. Положение центра давления плоской эпюры зависит от угла рыхления и площади эпюры $S = f(\alpha)$ (рис. 3).

При увеличении угла α центр давления эпюры L_0 перемещался ближе к кромке лезвия клина-рыхлителя, хотя при этом значительно увеличивалась площадь самой эпюры S .

Запишем уравнение регрессии верхнего контура плоской эпюры (усредненные значения, полученные для угла рыхления $\alpha = 35^\circ$):

$$N_{\text{н}} = 0,0028L^2 - 0,7195L - 75,962, \quad (4)$$

где $N_{\text{н}}$ – нормальное давление имитационного нагружения, Н;

L – текущее значение аргумента, расстояния от кромки лезвия до точки приложения нормального давления, мм (рис. 4).

Центр давления L_0 на поверхности трения опреде-

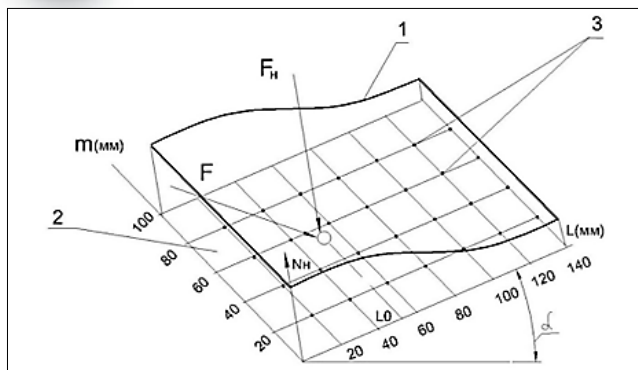


Рис. 2. Контур объемной эпюры нормального давления: 1 – верхняя грань эпюры; 2 – поверхность трения почворезущей детали; 3 – точки измерения выноса легкоистираемого материала; m – ширина клина; L – длина клина; N_H – положение вектора реактивного нормального давления; F – главный вектор внешнего имитационного нагружения; F_H – нормальная составляющая главного вектора имитационного нагружения; α – угол рыхления

Fig. 2. Contour of normal pressure volumetric diagram: 1 – the top edge of the diagram; 2 – the friction surface of the soil-cutting part; 3 – the points of measurement of abrasable material removal; m – wedge width; L – wedge length; N_H – position of reactive normal stress vector; F – the main vector of external simulated loading; F_H – normal component of the main vector of simulated loading; α – loosening angle

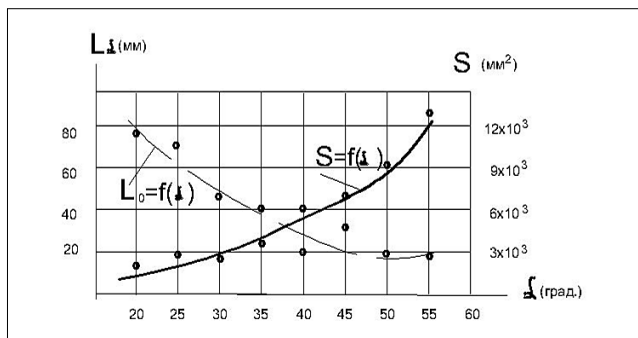


Рис. 3. Влияние угла рыхления на характер распределения нормального давления по поверхности трения клина-рыхлителя: L_0 – положение центра давления эпюры, расстояние от кромки лезвия; S – площадь эпюры давления; α – угол рыхления

Fig. 3. Influence of loosening angle on the characteristics of normal stress distribution over the wedge-roller friction surface: L_0 – position of diagram pressure center, distance from blade edge; S – the area of stress diagram; α – loosening angle

ляли в соответствии с выражением:

$$S_1 = \int_0^{L_0} f(L) dL = S_2 = \int_{L_0}^{140} f(L) dL, \quad (5)$$

где S_1 и S_2 – две равные по величине площади эпюры, расположенные с разных сторон относительно центра давления L_0 (в данном примере $L_0 = 51,2$ мм).

Необходимость определения центра давления вызвана требованиями проведения прочностных расчетов в случае применения новой конструкции рабочего органа, а также при обосновании устойчивого по-

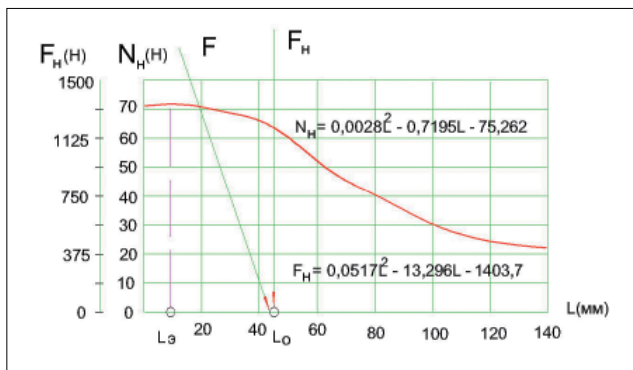


Рис. 4. Контур плоской эпюры нормального давления: N_H – нормальное давление имитационного нагружения; N_p – ожидаемое нормальное давление при реальной эксплуатации; L_s – абсцисса экстремума функции нормального давления; L_0 – абсцисса центра давления

Fig. 4. Contour of normal stress flat diagram: N_H – simulated loading normal stress; N_p – expected normal stress during the real operation; L_s – extremum abscissa of normal stress function; L_0 – the abscissa of stress center

ложения при движении почвообрабатывающего орудия из нескольких рабочих органов.

Полученная модель имитационного нагружения позволяет более детально рассматривать характер распределения внешней нагрузки по поверхностям трения клина-рыхлителя, устанавливать участки большей или меньшей нагруженности в случаях изменения технологических углов крошения. Вместе с тем действительные величины сил в реальных условиях эксплуатации вполне могут отличаться от значений, полученных при имитационном нагружении. Сопоставление результатов имитационного нагружения с характеристиками реальных почв позволит получить более точные параметры трибологического процесса нагружения поверхностей трения и последующего абразивного износа.

Обрабатываемые в реальных условиях почвы разнообразны по механическим свойствам и сопротивляемости механической обработки, при которой основной энергетической характеристикой их воздействия на рабочий орган служит силовой эквивалент внешнего нагружения [10, 11]. В случае плоскостной системы нагружения, применительно к клину-рыхлителю, учитываются экспериментальные данные о положении равнодействующей силе F как о некоторой суммарной силе, действующей со стороны почвы на поверхность трения [12-19].

Такая же суммарная сила N_H сумм по своим свойствам при имитационном нагружении может быть определена исходя из площади имитационной эпюры. Тогда для $\alpha = 35^\circ$ имеем:

$$N_{\text{исум}} = N_H S = N_H \int_0^{140} 0,0028L^2 - 0,7195L - 75,262 dL = 614,65H, \quad (6)$$

где $N_{\text{исум}}$ – суммарная величина нормального давле-

ния при имитационном нагружении, Н;

$N_{\text{и}}$ – удельное давление при имитационном нагружении, Н/мм²;

S – площадь эпюры, мм².

Показатели F и $N_{\text{исум}}$ имеют равнозначное смысловое значение: F – силовой эквивалент, полученный при нагружении в условиях реальной эксплуатации («тестирование» почв), а $N_{\text{исум}}$ – такой же силовой эквивалент, полученный путем имитационного нагружения. При этом в последнем случае изучен характер распределения нормального давления по поверхностям трения с построением соответствующих эпюр.

В зависимости (6) удельное давление при имитационном нагружении образца для удобства дальнейших преобразований принято равным единице, то есть $N_{\text{и}} = 1$ Н/мм². Величины F и $N_{\text{исум}}$ по определению имеют равный характер распределения по поверхности трения и отличаются только значениями этих сил, поэтому для их совмещения достаточны правила пропорций.

Функция имитационного нагружения $N_{\text{и}} = f(L)$ и функция реального давления обрабатываемой почвы $N_{\text{р}} = f(L)$ имеют равный характер распределения по аргументу. Экстремум функции в нашем примере:

$N_{\text{и}}' = f(L) = 0$ имеет аргумент $L_0 = 10,1$ мм и функцию $N_{\text{и}0} = 71$ Н.

Измеренная в реальных условиях эксплуатации равнодействующая сила F является суммарной, действующей со стороны почвы на поверхность трения, и имеет свою нормальную составляющую $F_{\text{н}}$. Действительно, нормальные силы $F_{\text{н}}$ и $N_{\text{и}}$, полученные на реальных почвах и путем имитационного нагружения, по своей природе – эквивалентные величины, имеющие одинаковый характер распределения давления по поверхности трения. Тогда по соотношению эквивалентных величин имеем:

$$F_{\text{н}}/N_{\text{и}} = F_{\text{р.э}}/N_{\text{и.э}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{р.э}}$, $N_{\text{и.э}}$ – экстремумы (максимумы) функций реального и имитационного нагружения.

Отсюда для данного примера имеем величину $F_{\text{р.э}} = 1312$ Н. Наносим вторую шкалу ординат $F_{\text{н}}$, посредством которой и ранее полученной кривой воспроизводятся реальные величины нормальных давлений по поверхности трения клина-рыхлителя (рис. 4). Аналитическая зависимость $F_{\text{н}} = f(L)$ будет иметь следующий вид:

$$F_{\text{н}} = 0,0517L^2 - 13,296L - 1403,77. \quad (8)$$

Таким образом, полученная кривая описывает характер изменения процесса нагружения поверхности трения при имитационном нагружении и при рыхлении реального почвенного сложения (рис. 4). При этом характер нагружения равный, но шкалы осей ординат разные.

Совмещение характеристик имитационного нагружения рабочих органов с параметрами силовых эквивалентов реальных почв позволяет прогнозировать ожидаемую надежность и срок службы создаваемых конструкций. Результаты моделирования служат исходными данными для инженерных расчетов и прогноза поведенческих характеристик в последующей эксплуатационной практике разрабатываемых конструкций рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

Выводы. Полученная модель триботического процесса абразивного износа почворезущих деталей обеспечивает совмещение результатов имитационного нагружения, полученных в качестве эпюр распределения нормальных давлений по поверхностям трения, с величинами силовых эквивалентов реальных почв предполагаемых зон последующей эксплуатации. Совмещение достигается путем использования характера имитационного нагружения и пропорциональностью экстремумов функций имитационного и реального нагружения. Применение полученной модели позволяет сократить сроки создания новых конструкций почворезущих деталей до 0,5-1 года с обеспечением нормативных показателей надежности и качества выполнения технологических операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скиркис Р., Янкаускас В., Гайдис Р. Моделирование рабочих контактных нагрузок почвообрабатывающего элемента // *Трение и износ*. 2016. Т. 37. №4. С. 510-515.
2. Дроздов Ю.Н., Юдин Е. Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). М.: Эко-Пресс. 2010. 603 с.
3. Григорьев П.А., Сладкова Л.А. Модель изнашивания рабочих органов землеройных машин при взаимодействии с грунтовым массивом // *Трение и износ*. 2022. Т. 43. №4. С. 397-404.
4. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C., Bianchi D., Eder S.J., Polak R., Pauschitz A. Combined experimental and numerical simulation of abrasive wear and its application to a tillage machine component. *Tribology International*. 2018. Vol. 127. 122-128.
5. Хрущев М.М., Бабищев М.Д. Абразивное изнашивание. М.: Наука. 1970. 252 с.
6. Севернев М.М., Подлекарев Н.Н., Сохадзе В.Ш., Китиков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин. Минск: Беларус. Навука. 2011. 334 с.
7. Янкаускас В., Катинас Э., Пусвашкис М., Лейшис Р. Исследование ресурса упрочненных плужных долот // *Трение и износ*. 2020. Т. 41. №1. С. 104-111
8. Миронов Д.А., Лискин И.В., Сидоров С.А., Нагорный В.Д., Афонина И.И., Костомахин М.Н. Моделирование изнашивания почворезущего лезвия // *Сельскохозяйствен-*

- ная техника: обслуживание и ремонт. 2019. N12. С. 61-68.
9. Мясенко В.И. Карта абразивного износа поверхности трения почворезущей детали // *Трение и износ*. 2020. N1(41). С. 128-132.
 10. 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.
 11. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс. 2008. 266 с.
 12. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 477 с.
 13. Моторин В.А., Гапич Д.С., Борисенко И.Б., Курбанов Д.Б. Моделирование процесса износа рабочих органов чизельного плуга // *Трение и износ*. 2020. N1(41). С. 95-103.
 14. Мясенко В.И. Методы экспериментального определения силовых характеристик рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Новосибирск: Новосибирский ГУ. 1991. 105 с.
 15. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings using plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. T. 60. N11-12. С. 1290-1294.
 16. Лобачевский Я.П., Эльшеих А.Х. Обоснование расстановки дисковых рабочих органов в комбинированных почвообрабатывающих агрегатах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N4. С. 22-25
 17. Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Миронов Д.А. и др. Новые износостойкие наплавочные материалы в сельскохозяйственном машиностроении // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. Т. 8. N1. С. 27-31.
 18. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С., Миронов Д.А., Зайцев А.И., Родионова И.Г., Павлов А.А., Амежнов А.В. Использование биметаллических сталей для повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. N2. С. 80-81.
 19. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Шогенов А.Х. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95.

REFERENCES

1. Skirkus R., Yankauskas V., Gaydis R. Modelirovanie rabochikh kontaktnykh nagruzok pochvoobrabatyvayushchego elementa [Modeling contact loads of tillage element]. *Trenie i iznos*. 2016. Vol. 37. N4. 510-515 (In Russian).
2. Drozdov Yu.N., Yudin E. G., Belov A.I. Prikladnaya tribologiya (trenie, iznos, smazka) [Applied tribology (friction, wear, lubrication)]. Moscow: Eko-Press. 2010. 603 (In Russian).
3. Grigor'ev P.A., Sladkova L.A. Model' iznashivaniya rabochikh organov zemleroynykh mashin pri vzaimodeystvii s gruntovym massivom [The model of wear of the working bodies of earthmoving machines in interaction with the soil mass]. *Trenie i iznos*. 2022. Vol. 43. N4. 397-404 (In Russian).
4. Bedolla P.O., Vorlaufer G., Rechberger C., Bianchi D., Eder S.J., Polak R., Pauschitz A. 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).
5. Khrushchev M.M., Babichev M.D. Abrazivnoe iznashivanie [Abrasive wear]. Moscow: Nauka. 1970. 252 (In Russian).
6. Severnev M.M., Podlekarev N.N., Sokhadze V.Sh., Kitikov V.O. Iznos i korroziya sel'skokhozyaystvennykh mashin [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Minsk: Belarus. Navuka. 2011. 334 (In Russian).
7. Yankauskas V., Katinas E., Pusvashkis M., Leyshis R. Issledovanie resursa uprochnennykh pluzhnykh dolot [Hardened plow bits capacity]. *Trenie i iznos*. 2020. Vol. 41. N1. 104-111 (In Russian).
8. Mironov D.A., Liskin I.V., Sidorov S.A., Nagornyy V.D., Afonina I.I., Kostomakhin M.N. Modelirovanie iznashivaniya pochvorezhushchego lezviya [Simulation of soil cutting blade wear]. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2019. N12. 61-68 (In Russian).
9. Myalenko V.I. Karta abrazivnogo iznosa poverkhnosti treniya pochvorezhushchey detali [Map of friction surface abrasive wear of the soil-cutting part]. *Trenie i iznos*. 2020. N1(41). 128-132 (In Russian).
10. 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).
11. Panov I.M., Vetokhin V.I. Fizicheskie osnovy mekhaniki pochv [Fundamentals of soil mechanics]. Kiev: Feniks. 2008. 266 (In Russian).
12. Goryacheva I.G. Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya [Mechanics of frictional interaction]. Moscow: Nauka. 2001. 477 (In Russian).
13. Motorin V.A., Gapich D.S., Borisenko I.B., Kurbanov D.B. Modelirovanie protsessa iznosa rabochikh organov chizel'nogo pluga [Simulation of the wear of the working bodies of chisel plows]. *Trenie i iznos*. 2020. N1(41). 95-103 (In Russian).
14. Myalenko V.I. Metody eksperimental'nogo opredeleniya silovykh kharakteristik rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh orudiy [Methods for experimental obtaining the power characteristics of tillage machinery working bodies]. Novosibirsk: Novosibirskiy GU. 1991. 105 (In Russian).
15. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevskii Y.P., Akhmedova T.S. Improving wear resistance of agricultural machine components by applying hard-alloy thick-layer coatings us-

- ing plasma surfacing. *Metallurgist*. 2017. Vol. 60. N11-12. 1290-1294 (In English).
16. Lobachevskiy Ya.P., El'sheikh A.Kh. Obosnovanie rasstanovki diskovykh rabochikh organov v kombinirovannykh pochvoobrabatyvayushchikh agregatakh [Justification of the arrangement of disk working bodies in combined tillage units]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2009. N4. 22-25 (In Russian).
 17. Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Mironov D.A., et al. Novye iznosostoykie naplavochnye materialy v sel'skokhozyaystvennom mashinostroenii [New wear-resistant surfacing materials in agricultural engineering]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2014. Vol. 8. N1. 27-31 (In Russian).
 18. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S., Mironov D.A., Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Pavlov A.A., Amezhnov A.V. Ispol'zovanie bimetallicheskikh staley dlya povysheniya resursa rabochikh organov selskokhozyaystvennykh mashin [The use of bimetallic steels to increase the resource of working bodies of agricultural machines]. *Vestnik Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2013. N2. 80-81 (In Russian).
 19. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Shogenov A.Kh. Trekhseksionnyy pochvoobrabatyvayushchiy agregat s universal'nymi smennymi rabochimi organami [Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian).

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

07.02.2023
 05.05.2023