

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

Даба Нимаевич Раднаев, доктор технических наук  
 Андрей Александрович Абидуев, доктор технических наук  
 Александр Сергеевич Пехутов, доктор технических наук  
 Петр Антонович Болоев, доктор технических наук  
 Галия Ергешевна Кокиева, доктор технических наук

Бурятская государственная сельскохозяйственная академия имени В.Р. Филиппова,  
 г. Улан-Удэ, Республика Бурятия, Россия  
 E-mail: daba01@mail.ru

**Аннотация.** Освоение и создание высокопроизводительных сельскохозяйственных машин во многом ограничивается из-за низкой износостойкости отдельных деталей и узлов. Российские ученые, инженеры и техники, работающие над проблемой повышения долговечности машин, добились существенных результатов. Используемые в некоторых случаях расчеты деталей сельскохозяйственных машин на долговечность при их конструировании несовершенны. Отсутствуют обоснованные расчеты допустимых износов, обеспечивающих высокое качество работы машины. Изучением абразивного изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин ученые занимаются на протяжении десятков лет, но этот вопрос окончательно не решен. Нет представления о сущности абразивного износа и факторов, которые его усугубляют. Мало исследованы вопросы изнашивающей способности почвы, отсутствует определяющий ее критерий, связь износа рабочих органов почвообрабатывающих машин с основными теоретическими положениями земледельческой механики. Для расчета долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин найдены величины давлений, возникающих при их взаимодействии с почвой.

**Ключевые слова:** почвообрабатывающие машины, рабочие органы, абразивный износ, удельное давление, долговечность деталей

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DURABILITY OF SOIL-CULTIVATING MACHINES WORKING BODIES OF PARTS

D.N. Radnaev, *Grand PhD in Engineering Sciences*  
 A.A. Abiduev, *Grand PhD in Engineering Sciences*  
 A.S. Pekhutov, *Grand PhD in Engineering Sciences*  
 P.A. Boloev, *Grand PhD in Engineering Sciences*  
 G.E. Kokieva, *Grand PhD in Engineering Sciences*

Filippov V.R the Buryat State Academy of Agricultural, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, Russia  
 E-mail: daba01@mail.ru

**Abstract.** The development and creation of high-performance machines for agricultural production is in many cases limited by the insufficient wear resistance of individual parts and assemblies. Russian scientists, engineers and technicians working on the problem of increasing the durability of machines have achieved significant results. However, theoretical conclusions and prerequisites for increasing durability and the method of calculating parts of agricultural machines for durability are not enough. The durability calculations of agricultural machine parts used in some cases during their design are imperfect. In addition, in most cases, there are no reasonable calculations of allowable wear that would ensure high quality machine operation, i.e. these calculations are not related to the tasks of preventive maintenance and operation of machines. A number of scientists have been studying the abrasive wear of working parts of soil-cultivating and seeding machines for decades, but this issue has not yet been finally resolved. Until now, there is no clear understanding of the essence of abrasive wear and the factors that determine it. Most of the work carried out on the study of abrasive wear of parts of working bodies of soil-cultivating machines is of a private nature. There are no works covering the study of the complex set of phenomena that occur during abrasive wear. At present, very little has been studied about the wear capacity of soils, there is no criterion that determines it, and there is no connection between the phenomena of wear of the working parts of soil-cultivating machines and the basic theoretical principles of agricultural mechanics. The study of the wear capacity of soils, as well as the determination of the magnitude of pressures that arise during the interaction of the working parts of agricultural machines with the soil, can be used when calculating the working parts of these machines for durability.

**Keywords:** tillage machines, working parts, abrasive wear, specific pressure, durability of parts

Характерная особенность современного машиностроения – создание машин повышенной производительности, малой металлоемкости, прочных, надежных и удобных в эксплуатации. Большинство деталей сельскохозяйственных машин в процессе работы сравнительно быстро теряют свои первоначальные качества из-за динамических нагрузок, абразивного износа и воздействия внешней среды. Сельскому хозяйству требуется значительно больше запасных

частей для замены изношенных деталей машин, чем угольной или нефтесырьевой промышленности, где степень механизации производственных процессов достигла высокого уровня. Быстрый износ деталей вызывает простои машин в ремонте. Поэтому мероприятия, связанные с улучшением качества сельскохозяйственных машин, увеличением их долговечности, приобретают большое народнохозяйственное значение. [1, 4, 6, 11–13]

Разработаны методы поверхностного упрочнения, в том числе наплавка различными сплавами, поверхностная закалка, гальваническое хромирование. [9, 10, 14] Проводят исследования по изменению и подбору конфигурации и размеров рабочих органов почвообрабатывающих машин, имеющих повышенную долговечность. [2, 3, 5, 7, 8] Мало изучены вопросы изнашивающей способности почв, отсутствует определяющий ее критерий, связь процесса износа рабочих органов почвообрабатывающих машин с основными теоретическими положениями земледельческой механики. Для раскрытия сущности абразивного износа недостаточно металловедческого анализа, необходимо изучить процесс взаимодействия рабочих органов с почвой в зоне соприкосновения почвенных частиц с рабочей поверхностью изнашиваемой детали.

Цель работы – изучить изнашивающую способность почв, определить величины давлений, возникающих при взаимодействии рабочих органов сельскохозяйственных машин с почвой.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За эталонную абразивную среду принят чистый кварцевый песок, применяемый в силикатной промышленности, с размером частиц 0,25...0,30 мм и нулевой влажностью ( $W = 0\%$ ). Натуральные почвы содержат наибольшее количество песчинок такого размера. Наличие кварцевых частиц в почве определяет ее абразивную способность. Принятие однородной абразивной среды за эталон во многом облегчает проведение исследований износостойкости деталей при износе нефиксированным абразивом в лабораторных условиях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для последовательности в решении вопроса расчета на долговечность деталей сельскохозяйственных машин, наряду с изучением общих закономерностей износа, следует также четко классифицировать детали, которые сравнительно быстро теряют свою работоспособность. Такая классификация значительно облегчает возможность создания единой теории и метода расчета для их группы, хотя общую закономерность и физическую сущность износа можно изучать на одной детали, характерной для данного класса (табл. 1).

Укрупненная классификация деталей сельскохозяйственных машин составлена на основе конструктивного сходства их по выполнению технологического процесса и вида износа. Все детали разбиты на девять основных классов. Каждый из них разделен на группы, из которых выделены подгруппы первого и второго порядка.

В классы деталей, работающих непосредственно в абразивной среде, а также деталей режущих аппаратов уборочных и кормоприготовительных машин входят основные, непосредственно соприкасающиеся с обрабатываемым объектом и выполняющие главную функцию в общем технологическом процессе. Большинство деталей этих классов – непарные.

Остальные шесть классов объединяют вспомогательные детали (парные) общего назначения, которые передают мощность, необходимую для выполнения рабочей функции основных деталей. Выход из строя непарных обусловлен искажением их геометрической

формы. Из приведенной классификации видно, что основные непарные детали подвержены абразивному износу, поэтому первоочередная задача исследований – изучить качественную и количественную стороны этого процесса.

Износ деталей зависит от качества металла, давления абразивной среды, изнашивающей способности абразива, времени протекания процесса или пути трения и выражается функцией:

$$\Delta G = f(P, L, S, m, H), \quad (1)$$

где  $P$  – давление абразива;  $L$  – путь трения;  $S$  – площадь трения;  $m$  – изнашивающая способность абразива;  $H$  – твердость металла.

Расчет на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин возможен, если известно влияние перечисленных факторов на абразивный износ.

Фактическое удельное давление превышает номинальное во много раз. При протаскивании образцов кварцевого песка по стальной и бронзовой пластинам установили, что только 8...10% песчинок, находящихся в контакте, истирают металл при своем перемещении. Значительная их часть в момент начального движения выходит из контакта и в процессе движения царапает металл на очень коротком пути своего перемещения. По характеру царапин можно судить о том, что, кроме скольжения песчинок, происходит их поворот и качение.

При повороте или выходе песчинок из контакта нарушаются связи, имеющиеся между частицами, контактируемыми с металлом, и расположенными выше, в так называемой граничной зоне. Поворачивающаяся песчинка вовлекает в движение вокруг себя другие, часть из которых вступает в контакт с металлом, его истирание при этом повторяется.

Таким образом, в процессе движения почвенных частиц в граничной зоне происходит непрерывная потеря и возобновление контакта. При возобновлении контакта более активные частицы, то есть те, которые удерживаются соседними частицами силой, большей, чем сопротивление скольжению внедрившейся частицы, истирают металл.

Исследования показали, что скорость относительного перемещения почвенных частиц по поверхностям рабочего органа почвообрабатывающих машин значительно меньше поступательной скорости самого рабочего органа.

Скорость относительного перемещения почвенных частиц в зоне контакта их с рабочим органом определяем по формуле:

$$v_{от} = v_n \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

где  $v_n$  – поступательная скорость движения рабочего органа;  $\alpha$  – угол установки рабочего органа к горизонту или направлению движения;  $\varphi$  – угол между направлением абсолютного перемещения грунта в граничной зоне и нормалью к рабочей поверхности.

Находим угол  $\varphi$ :

$$\varphi = \arctg \left( \frac{f - \varepsilon}{f + f_1 - \varepsilon} \operatorname{ctg} \alpha \right), \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения грунта о поверхность рабочего органа;  $f_1$  – коэффициент трения грунта о грунт;  $\varepsilon$  – величина отношения усилия подпора к силе трения.

Таблица 1.

Укрупненная классификация деталей сельскохозяйственных машин

| Класс  | Группа                          | Подгруппа   |  |
|--|---------------------------------|---|--|
|  |                                 | первого порядка   | второго порядка  |
| Детали, работающие в абразивной среде              | одиночные                       | 1. Лемехи<br>2. Отвалы<br>3. Диски борон<br>4. Зубья борон<br>5. Лапы культиваторов<br>6. Сошники сеялок<br>7. Опорные детали машин                                       | —<br>—<br>—<br>—<br>—<br>1. Дисковые<br>2. Анкерные<br>1. Ободы колес<br>2. Башмаки, траки и зацепы<br>3. Покрышки |
|  | парные                          | 1. Шарниры гусениц<br>2. Встряхиватели картофелеуборочных машин<br>3. Поддерживающие ролики в картофелеуборочных машинах<br>4. Звенья элеваторов картофелеуборочных машин | —<br>—<br>—<br>—   |
| Детали режущих аппаратов борочных машин            | 1. Сегменты ножей               | —   | —  |
|  | 2. Противорежущие пластинки     | —   | —  |
|  | 3. Пластинки трения             | —   | —  |
|  | 4. Прижимные лапки              | —   | —  |
|  | 5. Спинки ножей                 | —   | —  |
|  | 6. Пальцы пальцевых брусьев     | —   | —  |
| Детали рабочих органов кормоприготовительных машин | 1. Ножи                         | —   | —  |
|  | 2. Противорежущие пластинки     | —   | —  |
|  | 3. Молотки дробилок             | —   | —  |
|  | 4. Деки дробилок                | —   | —  |
|  | 5. Вальцы зерноплющилок         | —   | —  |
|  | 6. Шипы жмыхо-дробилок          | —   | —  |
|  | 7. Пальцы картофелемялок        | —   | —  |
|  | 8. Решетки картофелемялок       | —   | —  |
|  | 9. Шнеки кормосмесителей        | —   | —  |
|  | 10. Кожухи кормосмесителей      | —   | —  |
| Валы и подшипники                                  | 1. С постоянной нагрузкой       | 1. Подшипники шариковые   | 1. Радиальные<br>2. Упорные<br>3. Радиально-упорные  |
|  | 2. Со знакопеременной нагрузкой |   | 1. Ролики цилиндрические<br>2. Ролики бочкообразные<br>3. Ролики конические<br>4. Ролики игольчатые                |
|  | 3. С ударной нагрузкой          | 2. Подшипники роликовые   |  |
|  | 4. С движением качения          | 3. Подшипники скольжения  | —  |
| Шестерни   | 1. Цилиндрические               | 1. С прямым зубом   | —  |
|  | 2. Конические                   | 2. С косым зубом  | —  |
| Цепи и звездочки                                   | 1. Цепи                         | 1. Роликовые<br>2. Крючковатые<br>3. Комбинированные  | —<br>—<br>—  |
|  | 2. Звездочки                    | 1. Роликовых цепей<br>2. Крючковатых цепей<br>3. Комбинированных цепей  | —<br>—<br>—  |
|  |                                 |   |  |
| Ремни приводные                                    | 1. Плоские                      | —   | —  |
|  | 2. Клиновидные                  | —   | —  |
| Рессоры и пружины                                  | 1. Рессоры                      | 1. Однолистовые<br>2. Многолистовые   | —<br>—   |
|  | 2. Пружины                      | 1. Плоские<br>2. Спиральные   | —<br>—   |
| Шлицевые соединения                                | 1. Прямоугольные                | 1. Центрированные по боковым сторонам<br>2. Центрированные по наружному диаметру<br>3. Центрированные по внутреннему диаметру   | —<br>—<br>—  |
|  | 2. Эвольвентные                 | —   | —  |
|  | 3. Треугольные                  | —   | —  |

Таблица 2.

Гранулометрический состав каштановой почвы Забайкалья при различных системах ее обработки

| Система обработки | Глубина, см | Количество частиц различного диаметра, % |             |             |              |               |         |        |
|-------------------|-------------|--|-------------|-------------|--------------|---------------|---------|--------|
|                   |             | 0...0,25                                 | 0,25...0,05 | 0,05...0,01 | 0,01...0,005 | 0,005...0,001 | < 0,001 | < 0,01 |
| Отвальная         | 0...20      | 28,4                                     | 34,0        | 21,9        | 4,8          | 5,4           | 5,5     | 15,7   |
|                   | 20...30     | 28,8                                     | 34,5        | 18,7        | 4,3          | 6,9           | 6,8     | 18,0   |
| Плоскорезная      | 0...20      | 26,8                                     | 33,2        | 21,4        | 4,8          | 6,9           | 6,9     | 16,6   |
|                   | 20...30     | 29,4                                     | 31,8        | 19,8        | 5,5          | 5,9           | 7,6     | 18,7   |
| Комбинированная   | 0...20      | 28,2                                     | 33,3        | 22,1        | 4,2          | 6,1           | 6,1     | 16,4   |
|                   | 20...30     | 29,1                                     | 35,0        | 20,0        | 4,3          | 5,2           | 6,4     | 15,8   |

Необходимо изучить влияние различных свойств почвы на абразивный износ, а также классифицировать почвы по их изнашивающей способности.

Исследование проводили в лабораторных и полевых условиях на пяти видах почв (табл. 2–4). Полевые опыты выполняли с лемехами, отвалами и полевыми досками, лабораторные – с образцами круглой формы на специальной установке.

Процесс изменения гранулометрического состава почвы наблюдается при различных системах обработки, но интенсивность его меньше, чем на бессменном пару в почве и севообороте (табл. 2). При отвальной системе обработки почвы в слое 0...20 см – наибольшее снижение содержания илистой фракции. В результате ветровой эрозии происходит безвозвратное отчуждение почвы за пределы поля и ухудшается ее механический состав.

Данные химического анализа не обнаруживают миграции веществ по профилю каштановой почвы (табл. 3).

Для более полного представления о влиянии влажности на износ провели специальные опыты со всеми образцами почв. Существует предел влажности для каждой почвы, при котором наблюдается наибольшая абразивная способность (табл. 4).

Почвы расположены в порядке убывания их изнашивающей способности, наибольшей обладает песчаная, наименьшей – глинистая.

Таблица 3.

Химический состав исследуемых почв, %

| Проба | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | Прочие примеси | Сумма |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|----------------|-------|
| 1     | 64,69            | 17,9                           | 4,20                           | 2,83 | 0,11 | Нет             | 2,42           | 97,66 |
| 2     | 62,00            | 17,75                          | 2,40                           | 2,79 | 0,18 | –               | 2,85           | 96,17 |
| 3     | 66,60            | 15,4                           | 3,60                           | 1,6  | 0,19 | –               | 1,51           | 98,70 |
| 4     | 68,44            | 16,15                          | 3,80                           | 2,53 | 0,27 | Следы           | 1,81           | 98,20 |
| 5     | 68,20            | 10,95                          | 3,60                           | 1,06 | 0,17 | Нет             | 2,52           | 97,00 |

Таблица 4.

Изменение изнашивающей способности почв в зависимости от влажности

| Почва                      | Коэффициент изнашивающей способности при влажности, % |      |      |      |
|----------------------------|---|------|------|------|
|                            | 5   | 10   | 15   | 20   |
| Каштановая песчаная        | 1,57  | 1,85 | 2,4  | 1,4  |
| Каштановая суглинистая     | 0,57  | 1,07 | 1,23 | 0,64 |
| Темно-каштановая глинистая | 0,49  | 0,71 | 0,51 | 0,33 |

Чем больше внутреннее сцепление частиц почвы, тем менее они свободны и больше изнашивают образец, и наоборот.

Опыты показали, что износ находится в прямой зависимости от удельного давления (р):

$$\Delta G = kp, \tag{4}$$

где *k* – коэффициент, который зависит от физико-механических свойств почвы.

Мощность трения также возрастает с увеличением удельного давления:

$$N_m = a + bp, \tag{5}$$

где *a* и *b* – коэффициенты, зависящие от свойств почвы при одном и том же материале испытуемых образцов.

При постоянной влажности коэффициенты изнашивающей способности почвы не изменяются, несмотря на разное удельное давление.

Полевые опыты, проведенные с деталями рабочих органов почвообрабатывающих машин, показали, что почвы по изнашивающей способности располагаются в такой же последовательности, как и при лабораторных исследованиях.

В качестве примера приводим расчеты долговечности серийного лемеха из стали Л53. Для различных почв при давлении 0,05 Н/см<sup>2</sup> интенсивность износа колеблется от 0,2 до 2,5 мг/сек., то есть увеличивается в 12,5 раза, мощность трения – в 1,37 раза. Не всегда большему износу соответствует большая работа трения. При давлении 0,08 Н/см<sup>2</sup> для песчаной почвы износ составил 2000 мг, работа трения – 71000 Нм, для суглинистой при том же давлении – 270 мг (в 7,4 раза меньше), работа трения – 6000 Нм (в 1,28 раза меньше). Этот пример показывает, что только незначительная часть работы трения затрачивается непосредственно на износ, то есть на удаление микростружек частицами почвы.

Чтобы найти нормальное давление на рабочие органы почвообрабатывающих машин была сконструирована специальная электроизмерительная установка. Опыты по определению давления грунта на лемех и отвал тракторного плуга проводили на всех видах почв. Наибольшее давление действует на носок лемеха – 0,042...0,06 Н/см<sup>2</sup> для глинистой почвы и 0,018...0,022 Н/см<sup>2</sup> песчаной. Давление почвы у пятки лемеха на 30...40% меньше, чем на носке. У нижней части груди отвала для глинистой почвы давление находится в пределах 0,015...0,018 Н/см<sup>2</sup>, верхней – 0,001...0,0015 Н/см<sup>2</sup>. Давление почвы на отвал падает по его высоте. Наибольшее давление на крыле отвала у нижнего обреза (0,004...0,006 Н/см<sup>2</sup>).

Найденные величины давлений можно использовать для расчета долговечности рабочих органов сельскохозяйственных машин.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бернштейн Д.Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга // Тракторы и сельхозмашины. 2002. № 6. С. 39–42.
2. Ерохин М.Н., Новиков В.С., Петровский Д.И. К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 121. С. 206–212.
3. Ерохин М.Н., Новиков В.С., Петровский Д.И. Прогнозирование ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // Сельский механизатор. 2015. № 11. С. 6–9.
4. Измайлов А.Ю., Сидоров С.А., Лобачевский Я.П. и др. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 3. С. 5–7.
5. Новиков В.С. Методика расчета почворезущих рабочих органов на долговечность. Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. № 2. 2008. С. 143–149
6. Сидоров С.А. Методика расчета на износостойкость моно- и биметаллических почворезущих рабочих органов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. № 12. С. 35–39.
7. Сидоров С.А. Методика расчета рабочих органов почвообрабатывающих машин на прочность // Лесной вестник. 2008. № 2. С. 74–79.
8. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K. et al. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 59. Pp. 208–210. DOI: 10.1007/si 1041-017-0130-0
9. Lobachevskii Y.P., Au-lov V.F., Ishkov A.V. et al. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Bonding // Metallurgist. 2019. Vol. 62. Pp. 986–993. DOI: 10.1007/sl 1015-019-00731-z
10. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P. et al. Modeling the Technological Process of Tillage // Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 190. Pp. 70–77. DOI: 10.1016-j.still.2018.12.004
11. Ryabov V.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I. et al. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests // Metallurgist. 2016. Vol. 60. Pp. 839–844. DOI: 10.1007/si 1015-016-0374-8
12. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevsky Y.P. et al. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing // Metallurgist. 2017. Vol. 60. Pp. 1290–1294. DOI: 10.1007/s 11015-017-0443-7
13. Sidorov S.A., Lobachevskii Ya.P., Khoroshenkov V. K. et al. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide //Metallurgist. 2018. Vol. 61. Pp. 1023–1028. DOI: 10.1007/s11015-018-0602-5
14. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines // Welding International. 2016. Vol. 30, Issue 10. Pp. 808–812. DOI: 10.1080 09507116.2016.114S408

#### REFERENCES

1. Bernshtejn D.B. Abrasive wear of the moldboard plow blade and its working ability // Traktory i sel'hozmashiny. 2002. № 6. S. 39–42.
2. Erohin M.N., Novikov V.S., Petrovskij D.I. K voprosu ob importozameshchenii rabochih organov zarubezhnyh pochvoobrabatyvayushchih mashin // Trudy GOSNITI. 2015. T. 121. S. 206–212.
3. Erohin M.N., Novikov V.S., Petrovskij D.I. Prognozirovaniye resursa rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin // Sel'skij mekhanizator. 2015. № 11. S. 6–9.
4. Izmajlov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevskij Ya.P. i dr. Nauchnye principy povysheniya iznosostojkosti rabochih organov pochvoobrabatyvayushchej tekhniki // Vestnik Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk. 2012. № 3. S. 5–7.
5. Novikov V.S. Metodika rascheta pochvorezhushchih rabochih organov na dolgovechnost'. Vestnik FGOU VPO MGAU. № 2. 2008. S. 143–149
6. Sidorov S.A. Metodika rascheta na iznosostojkost' mono- i bimetallicheskikh pochvorezhushchih rabochih organov // Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny. 2003. № 12. S. 35–39.
7. Sidorov S.A. Metodika rascheta rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin na prochnost' // Lesnoj vestnik. 2008. № 2. S. 74–79.
8. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K. et al. Novel High-Alloy Boron-Containing Steels for Driven Elements of Tilling Machines // Metal Science and Heat Treatment. 2017. Vol. 59. Pp. 208–210. DOI: 10.1007/si 1041-017-0130-0
9. Lobachevskii Ya.P., Au-lov V.F., Ishkov A.V. et al. Method for Preparing an Efficient Master Alloy for Steel Bonding // Metallurgist. 2019. Vol. 62. Pp. 986–993. DOI: 10.1007/sl 1015-019-00731-z
10. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Ya.P. et al. Modeling the Technological Process of Tillage // Soil & Tillage Research. 2019. Vol. 190. Pp. 70–77. DOI: 10.1016-j.still.2018.12.004
11. Ryabov V.V., Motovilina G.D., Khlusova E.I. et al. Study of the Structure of New Wear-Resistant Steels for Agricultural Machinery Components After Operational Tests // Metallurgist. 2016. Vol. 60. Pp. 839–844. DOI: 10.1007/si 1015-016-0374-8
12. Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Lobachevsky Y.P. et al. Improving Wear Resistance of Agricultural Machine Components by Applying Hard-Alloy Thick-Layer Coatings Using Plasma Surfacing // Metallurgist. 2017. Vol. 60. Pp. 1290–1294. DOI: 10.1007/s 11015-017-0443-7
13. Sidorov S.A., Lobachevskii Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Wear and Breakage Resistance of Hard Alloy Coatings Strengthened with Tungsten Carbide //Metallurgist. 2018. Vol. 61. Pp. 1023–1028. DOI: 10.1007/s11015-018-0602-5
14. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing Methods for Increasing the Service Life of Rapidly Wearing Working Tools of Agricultural Machines // Welding International. 2016. Vol. 30, Issue 10. Pp. 808–812. DOI: 10.1080 09507116.2016.114S408

Поступила в редакцию 26.09.2023  
Принята к публикации 10.10.2023