

EDN: AYYRVH

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97



Научная статья

УДК 620.16



Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве

Дмитрий Михайлович Скороходов,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Александр Сергеевич Павлов,
соискатель,
e-mail: pavlov810720@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Реферат. Разработка отечественных технологий повышения надежности сельскохозяйственной техники, в том числе сборных элементов, узлов, механизмов и отдельных деталей, составляет один из важных этапов сельскохозяйственного производства. С целью выбора износостойкого материала при изготовлении рабочих органов и оценки эффективности упрочняющих технологий их рабочих поверхностей под конкретные условия эксплуатации необходимо проводить ускоренные ресурсные испытания соответствующими современными методами и средствами. (*Цель исследования*) Разработать установку, обеспечивающую ускоренные испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования, применяемых в животноводстве при изготовлении и подготовке кормов. (*Материалы и методы*) Разработана методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства. Представлены кинематическая схема установки и возможная фиксация рабочих органов на рабочем валу установки. Дана оценка уровня механического и коррозионного изнашивания рабочих органов при ускоренных ресурсных испытаниях. (*Результаты и обсуждение*) Модуль управления установкой включает в себя электрическую схему и пульт управления, позволяющий регулировать частоту вращения испытуемых рабочих органов, изменение направления вращения (прямое и обратное) вала установки, экстренное торможение. Выбраны электродвигатель установки, частота вращения вала. Рассчитаны параметры клиноременной передачи привода установки: тип и количество ремней, диаметры ведущего и ведомого шкивов, передаточное число, обеспечивающие необходимую частоту вращения вала. Проведен прочностной расчет в случае заклинивания рабочего вала одним из держателей среднего ряда ножей, подтверждающий прочностной запас. (*Выводы*) Предлагаемая установка обеспечивает ускоренные ресурсные испытания рабочих органов машин и оборудования, позволяет оценивать эффективность технологий упрочнения рабочих поверхностей. Суть методики заключается в определении коррозионно-механического изнашивания рабочих органов в субстрате, имитирующем физико-химические свойства растительной среды, при осуществлении процесса резания в установленных режимах испытаний. Предлагаемая установка полностью соответствует прочностным характеристикам и сохранит свою работоспособность при возможных перегрузках.

Ключевые слова: производство кормов, установка, автоматизация, ускоренные испытания, рабочие органы, упрочняющие технологии, методы и средства.

■ **Для цитирования:** Скороходов Д.М., Павлов А.С. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов машин в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N4. С. 91-97. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97. EDN: AYYRVH.

Scientific article

Accelerated Testing Installation for Working Parts of Livestock Machinery

Dmitry M. Skorokhodov,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: d.skorokhodov@rgau-msha.ru;

Aleksandr S. Pavlov,
Ph.D. applicant (Eng.),
e-mail: pavlov810720@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Abstract. The development of domestic technologies aimed at improving the durability of agricultural machinery, including assemblies, units, mechanisms, and individual parts, represents a key stage in agricultural production in the Russian Federation. To select wear-resistant materials for manufacturing working parts and to evaluate the effectiveness of surface strengthening technologies under specific operating conditions, it is essential to conduct accelerated service life tests using modern methods

and tools. (*Research purpose*) To design a testing installation for accelerated corrosion-mechanical wear testing of working parts used in agricultural machinery and livestock equipment, particularly those involved in feed production and preprocessing. (*Materials and methods*) A methodology was developed for service life testing of cutting elements used in agricultural machinery for livestock and feed production. The study presents a kinematic diagram describing the testing installation, outlines possible mounting configurations for the working parts on the installation's shaft, and assesses the levels of mechanical and corrosion wear experienced by the working parts under accelerated testing conditions. (*Results and discussion*) The control module of the installation includes an electrical schematic and a control panel which enables the regulation of shaft rotation frequency, selection of rotation direction (forward and reverse), and emergency braking. The electric motor was selected and the target shaft rotation frequency specified. Parameters of the V-belt transmission drive system, including belt type and quantity, diameters of the drive and driven pulleys, and transmission ratio, were calculated to ensure the required shaft speed. A strength calculation was performed to simulate a potential jamming scenario involving one of the middle-row knife holders and the results confirmed an adequate safety margin. (*Conclusion*) The proposed installation enables accelerated service life testing of working parts in machinery and equipment and allows evaluation of the effectiveness of surface hardening technologies. The testing methodology is based on determining corrosion-mechanical wear in a substrate that simulates the physicochemical properties of plant environments under specified cutting process conditions. The proposed installation complies with the required strength parameters and maintains its functionality even under potential overloads.

Keywords: feed production, installation, automation, accelerated testing, working parts, working bodies, surface hardening technologies, methods and tools.

■ **For citation:** Skorokhodov D.M., Pavlov A.S. Accelerated testing installation for working parts of livestock machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N4. 91-97 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-4-91-97. EDN: AYYRVH.

Импортозамещение сельскохозяйственной техники и всех компонентов, связанных с ее техническим обслуживанием, является одной из основных задач. Ее решение во многом зависит от успешной модернизации инженерной службы агропромышленного комплекса в рамках создания отечественной техники [1]. Разработка отечественных технологий повышения надежности техники, в том числе сборных элементов, узлов, механизмов и отдельных деталей, составляет важный этап научных и инженерных исследований [2].

В настоящее время большинство парка сельскохозяйственной техники в Российской Федерации зарубежного производства. По данным Министерства сельского хозяйства, ее доля в животноводстве достигает 95%. Рабочие органы тоже импортные, они изготовлены из износостойких и прочных материалов, двукратно превосходящих отечественные. В условиях санкций особенно остро стоит вопрос о импортозамещении дорогостоящих рабочих органов с высокими показателями надежности и работоспособности [3].

С целью выбора износостойкого материала для рабочих органов сельскохозяйственных машин под конкретные условия эксплуатации необходимо проводить ускоренные ресурсные испытания [4, 5].

Увеличить ресурс рабочих органов путем упрочнения их рабочей поверхности возможно различными способами, как это показано, например, в [6-8]. В частности, важно проводить исследования износостойкости [9] ножей в оборудовании для получения растительных кормов, и оценку эффективных

методов их упрочнения [10, 11]. Для определения целевых параметров в режиме реального времени необходимы современные методы и средства, которые могут быть автоматизированы [12], в том числе с внедрением цифровых технологий [13, 14]. Автоматизация позволяет управлять исследовательским технологическим процессом [15] с минимальным участием человека.

Цель исследования: разработать установку, обеспечивающую ускоренные испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования для животноводства.

Материалы и методы. Проведенный анализ различных методов по испытаниям режущих элементов на абразивный и коррозионный износ послужил основой для создания новой методики ресурсных испытаний режущих элементов машин, используемых в животноводстве и кормопроизводстве. Данная методика утверждена и внедрена в мае 2025 г. ФГБУ «Государственный испытательный центр» и ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Скороходов Д.М. и др. Методика ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства. М.: Российский государственный аграрный университет, 2025. 28 с.). Эта методика позволяет оценивать ресурс работы режущих элементов, изготовленных из различных материалов, и определять наиболее эффективные упрочняющие технологии.

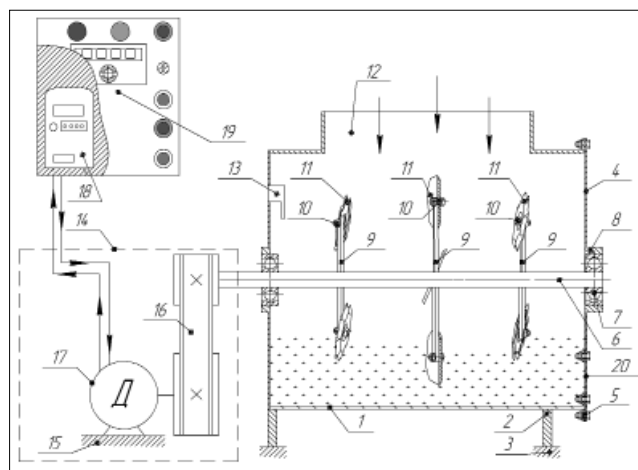


Рис. 1. Кинематическая схема установки для ресурсных испытаний на коррозионно-механический износ рабочих органов

Fig. 1. Kinematic diagram of the installation for service life testing of machine working elements under corrosion-mechanical wear

Согласно новой методике, в РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева на кафедре сопротивления материалов и деталей машин разработана установка для проведения стендовых ускоренных ресурсных испытаний (патент RU 2842437). Кинематическая схема установки приведена на рисунке 1.

В состав установки входят: корпус 1; стойки 2, смонтированные на опоре 3; крышка 4, закрепленная при помощи болтового соединения 5 на корпусе, для монтажа и демонтажа вращающегося вала 6. Вал закреплен в подшипниках 7, установленных во втулках 8; к валу под углом 90° друг к другу приварены держатели 9, к ним при помощи болтового соединения 10 прикреплены испытуемые режущие элементы 11.

Установка оснащена датчиком влажности 13; приводным механизмом 14 на опоре 15, включающим ременную передачу 16 и электродвигатель 17; частота вращения вала регулируется с помощью частотного преобразователя, установленного в модуле управления 19.

Методика предусматривает проведение ускоренных ресурсных испытаний режущих элементов в субстрате, имитирующем физико-химические свойства растительной среды.

Основными компонентами загружаемого субстрата являются: древесные опилки крупной фракции (от 3,0 до 5,5 мм); мелкозернистый кварцевый песок (от 0,1 до 0,25 мм); кислотные добавки (молочная, пропионовая, уксусная и масляная кислоты). Влажность среды в пределах 10-90%. Измельчаемый субстрат загружается через окно 12 и выгружается через окно 20.

Особенностью данной установки является возможность испытаний одновременно нескольких (до

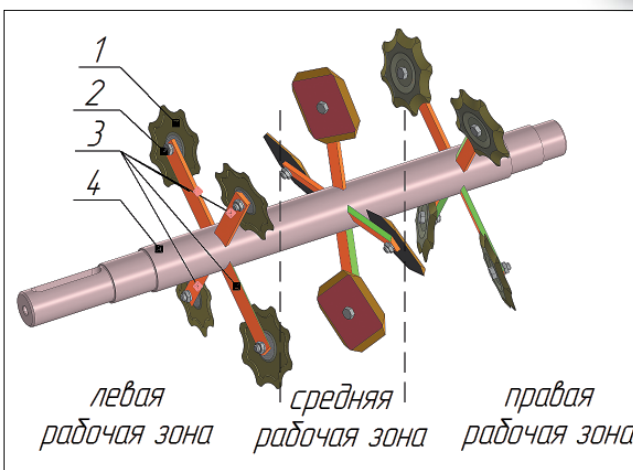


Рис. 2. Фиксация рабочих органов на валу установки: 1 – испытуемые режущие элементы; 2 – болтовое соединение; 3 – держатель; 4 – вал

Fig. 2. Mounting of the tested working elements on the shaft of the installation: 1 – tested cutting elements; 2 – bolted connection; 3 – holder; 4 – shaft

12 шт.) режущих элементов при одинаковых условиях (рис. 2). Это позволяет оценивать коррозионно-механическое изнашивание ножей из разных материалов, в том числе эффективность технологий, упрочняющих рабочих поверхностей. Дополнительно возможно проводить анализ и оптимизацию процесса резания [16].

Каждый держатель сконструирован под определенным углом, что приближает испытания к реальным условиям смешивания субстрата в процессе работы установки.

Оценка ресурса износа рабочих органов осуществляется согласно ГОСТ 23.205-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Ускоренные ресурсные испытания с периодическим форсированием режима». Определяется массовый износ испытуемых образцов в зависимости от наработки, выполняется построение регрессионной модели износа [12, 17] рабочих органов с указанием их типа, материала и технологии упрочнения. По результатам измерений геометрических параметров рабочих органов выполняется построение сетки изнашивания рабочей поверхности деталей. Исследовать износ геометрических параметров можно с применением бесконтактных средств измерения на основе триангуляционного метода [18].

Оценка коррозионного изнашивания согласно ГОСТ 9.908-85 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости» проводится по степени поражения поверхности металла, вычисляется площадь коррозионного пятна, при необходимости выполняется металлографическая экспертиза коррозионных поражений с указанием типа коррозии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Разработан модуль управления установкой (рис. 3), позволяющий регулировать частоту вращения испытуемых рабочих органов, изменять направление вращения вала (прямое и обратное), включать экстренное торможение (команда «СТОП»). Модуль предусматривает защиту электродвигателя от возможных перегрузок.

Установка для ускоренных испытаний на коррозионно-механический износ рабочих органов машин схожа по устройству с измельчителями кормов, в том числе по принципу работы, смесителями-кормораздатчиками. В связи с этим мощность электродвигателя выбрана по аналогичному (габаритам рабочей камеры) измельчителю кормов: $P_{дв} = 2,2$ кВт, частота вращения вала двигателя $n_{дв} = 750$ об/мин.

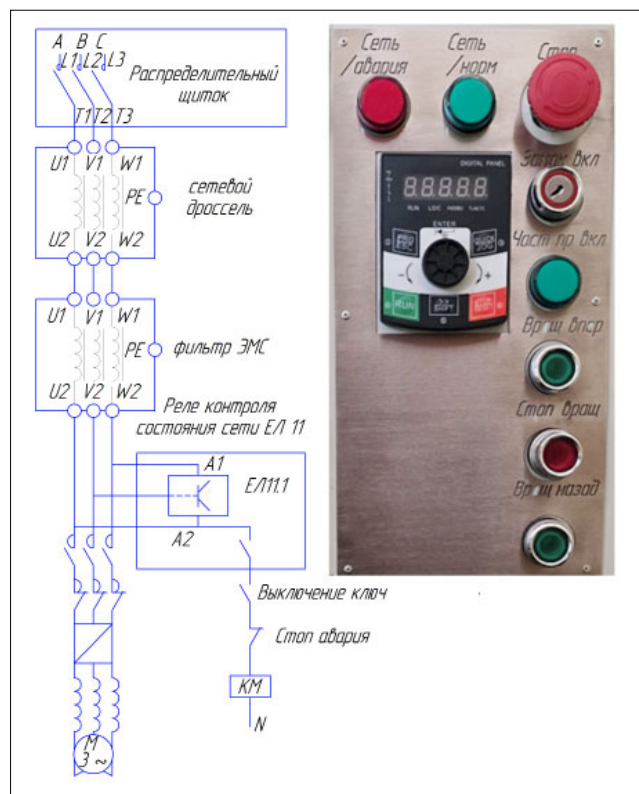


Рис. 3. Модуль управления установкой: слева – электрическая схема; справа – пульт управления

Fig. 3. Control module of the installation electrical circuit diagram and control panel

Нужная частота вращения вала задается с использованием клиноременной передачи с передаточным числом $u_{рп} = 4$. Расчет клиноременной передачи осуществлялся в САПР «Компас-3D» с помощью библиотеки «Расчет механических передач». В результате расчета принята клиноременная передача со следующими параметрами: тип ремня А-1400 IV ГОСТ 1284.1-89; число ремней $z = 4$ шт.; диаметр ведущего шкива $D_1 = 80$ мм; диаметр ведомого шкива $D_2 = 320$ мм.

Определен крутящий момент на рабочем валу установки:

$$T_{рв} = \frac{9550 \cdot N \cdot \eta_{рп}}{n_2} = \frac{9550 \cdot 2,2 \cdot 0,95}{187,5} = 106,45 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где 9550 – коэффициент перевода единиц измерений; N – мощность двигателя, кВт; $\eta_{рп}$ – КПД ременной передачи; n_2 – частота вращения рабочего вала, об/мин.

Изменение режима вращения рабочего вала за счет преобразователя частоты (ADV-M420) позволяет выбрать частоту, которая применяется в конкретных условиях измельчения кормов.

Диаметр конца рабочего вала установки:

$$d_{рв} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot T_{рв}}{0,2 \cdot [\tau]}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 106,45}{0,2 \cdot [10]}} \approx 40 \text{ мм},$$

где $[\tau]$ – допускаемое напряжение на кручение, МПа. Для валов из низкоуглеродистых сталей $[\tau] = 10-20$ МПа.

По диаметру вала и ширине шкива выбрана шпонка размером $12 \times 8 \times 56$ мм (ГОСТ 23360-78). Шпонка проверяется на смятие и срез:

$$\sigma_{см} = \frac{4 \cdot k_A \cdot T_{рв} \cdot 10^3}{d_{рв} \cdot h \cdot (l - b)} \leq [\sigma_{см}],$$

$$\tau_{ср} = \frac{2 \cdot k_A \cdot T_{рв} \cdot 10^3}{d_{рв} \cdot b \cdot (l - b)} \leq [\tau_{ср}],$$

где k_A – коэффициент динамической нагрузки. $k_A = 1,5$; b, h, l – ширина, высота и длина шпонки, мм; $[\sigma_{см}]$ – допускаемое напряжение смятия, МПа; $[\sigma_{см}] = 80-150$ МПа; $[\tau_{ср}]$ – допускаемое напряжение среза, МПа, $[\tau_{ср}] = 70-100$ МПа.

$$\sigma_{см} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 106,45 \cdot 10^3}{40 \cdot 8 \cdot (56 - 12)} = 32,4 \text{ МПа},$$

$$\tau_{ср} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 106,45 \cdot 10^3}{40 \cdot 12 \cdot (56 - 12)} = 10,8 \text{ МПа}.$$

Условие прочности шпоночного соединения выполняется.

Прочностной анализ рабочего вала установки выполнен в программе Solidworks Simulation (рис. 4). Максимальные напряжения возникнут в случае заклинивания рабочего вала одним из держателей среднего ряда ножей.

Как видно из анализа, максимальное напряжение в месте соединения держателя ножа и вала составляет 90 МПа; максимальная деформация – 0,154 мм; минимальный запас прочности – 1,615. Таким образом, рабочий вал соответствует условиям прочности с запасом, и установка сохранит работоспособность при заклинивании вала.

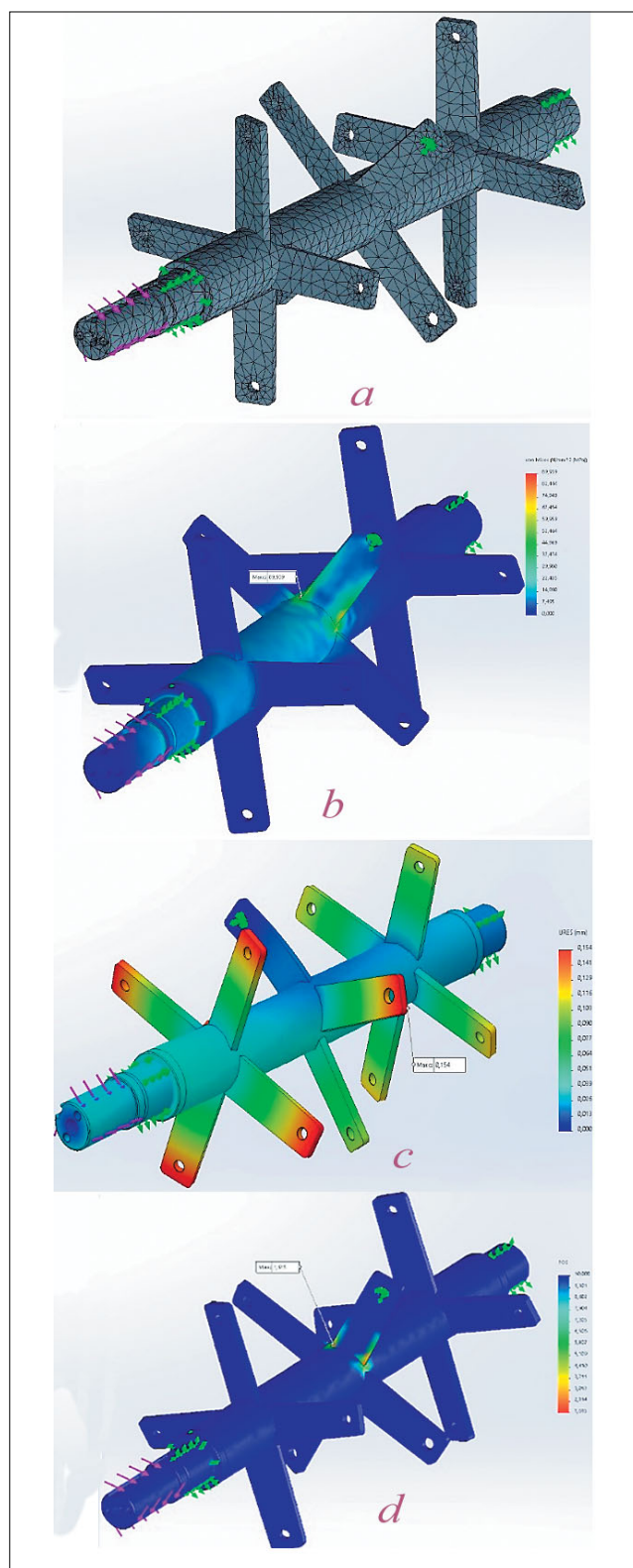


Рис. 4. Прочностной анализ рабочего вала установки в программе Solidworks Simulation: а – расчетная схема; б – напряжения; в – деформация под нагрузкой; д – запас прочности

Fig. 4. Strength analysis of the working shaft of the installation using Solidworks Simulation: a – calculation model; b – stress distribution; c – deformation under load; d – safety factor

Согласно кинематической схеме установки и проведенным расчетам создана работающая модель установки ускоренных испытаний на износ рабочих органов машин для измельчения и смешивания кормов (рис. 5).

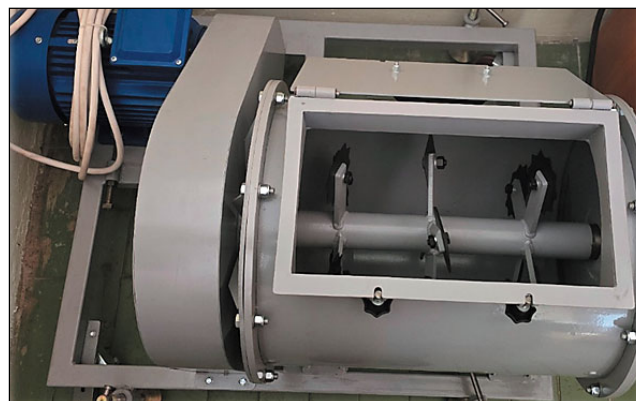


Рис. 5. Установка для ускоренных испытаний рабочих органов на коррозионно-механический износ

Fig. 5. Installation for accelerated testing of working parts for corrosion-mechanical wear

На базе кафедры сопротивления материалов и деталей машин РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева проводятся испытания на коррозионно-механическое изнашивание рабочих органов оборудования с целью выбора материала для их изготовления и определения эффективного метода упрочнения рабочих поверхностей. Это позволит внедрить в производство отечественные рабочие органы, не уступающие по ресурсу работы и долговечности зарубежным аналогам.

Выводы. Предлагаемая установка обеспечивает ускоренные ресурсные испытания рабочих органов, а также позволяет оценивать эффективность упрочняющих технологий рабочих поверхностей рабочих органов машин и оборудования.

Установка разработана согласно новой методике ресурсных испытаний режущих элементов сельскохозяйственных машин для животноводства и кормопроизводства, утвержденная и внедренная ФГБУ «Государственный испытательный центр». Суть методики заключается в определении коррозионно-механического изнашивания рабочих органов при измельчении субстрата, имитирующего физико-химические свойства растительной среды, при установленных режимах испытаний. Установка полностью соответствует необходимым прочностным характеристикам и сохранит свою работоспособность при возможных перегрузках.

Установка и методика представляют собой инструментально-методический комплекс для научных и инженерных исследований, направленных на повышение надежности, эффективности и долговечности сельскохозяйственной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А., Казакова В.А. Эволюция технического сервиса в агропромышленном комплексе // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. N3. С. 47-52. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
2. Ценч Ю.С., Миронов Д.А., Пыжов В.В. Развитие методов восстановления деталей тракторных двигателей // *Технический сервис машин*. 2025. Т. 63. N1. С. 102-110. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
3. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N3. С. 72-78. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
4. Федотов А.В., Дорохов А.С., Гвоздев А.А. Триботехнические материалы для технического обслуживания сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2022. N4(149). С. 37-45. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
5. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N. et al. The tribotechnical properties of electrosparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12 (3): 312. DOI: 10.3390/coatings12030312.
6. Latypov R., Serov A., Serov N., Chekha O. Technology of hardening plowshares by electrocontact welding using waste from tool production. *Smart Innovation. Systems and Technologies*. 2022. Vol. 247. 197-203. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2_21.
7. Серов А.В., Серов Н.В., Бурак П.И. Функциональные покрытия // *Электрометаллургия*. 2020. N11. С. 25-33. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
8. Скороходов Д.М., Басов С.С., Денисов В.А., Свиридов А.С. Исследование микротвердостебординных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борлирующих смесей // *Технический сервис машин*. 2021. Т. 59. N2(142). С. 144-150. DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150.
9. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2024. N1. С. 97-106. DOI: 10.31857/S0235711924010117.
10. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Оценка износостойкости и ресурса двухслойных упрочненных почворезающих рабочих органов в различных почвенных условиях // *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30. С. 699-710. DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
11. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. Vol. 53. N1. 80-87. DOI: 10.1134/S1052618824010072.
12. Максимов П.Л., Иванов А.Г., Мохов А.А., Петров В.А. // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. N3(44). С. 32-38. EDN: UMXEZZ.
13. Дорохов А.С., Денисов А.В., Соломашкин А.А., Герасимов В.С. Стратегии технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин // *Технический сервис машин*. 2020. N3(140). С. 38-48. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.
14. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
15. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Колесникова В.А. и др. Средства автоматизации для управления сельскохозяйственной техникой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N3. С. 3-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
16. Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Ишков А.В. и др. Анализ и оптимизация процесса резания ножа измельчителя-разбрасывателя соломы зерноуборочного комбайна для увеличения его срока службы // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. N5(223). С. 70-78. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
17. Дородов П.В., Петров В.А., Торопов Л.А. Регрессионная модель износа рабочей поверхности лопастей барабана дробилки зерна серии ДКР // *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. N3(79). С. 106-113. DOI: 10.48012/1817-5457-2024-3-106-113.
18. Скороходов Д.М., Краснящих К.А., Свиридов А.С. Использование бесконтактных методов и средств контроля для проверки качества запасных частей сельскохозяйственной техники // *Технический сервис машин*. 2020. N2(139). С. 141-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-141-148.

REFERENCES

1. Kataev Yu.V., Gerasimov V.S., Tishaninov I.A., Kazakova V.A. Evolution of technical service in the agricultural industrial complex. *Machinery Technical Service*. 2024. Vol. 62. N3. 47-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-3-47-52.
2. Tsench Yu.S., Mironov D.A., Pyzhov V.V. Development of methods for restoring tractor engine parts. *Machinery Technical Service*. 2025. Vol. 63. N1. 102-110 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-1-102-110.
3. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in an abrasive environment. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N3. 72-78 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
4. Fedotov A.V., Dorokhov A.S., Gvozdev A.A. Tribotechnical

- materials for the maintenance of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2022. N4(149). 37-45 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-37-45.
5. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N. et al. The tribotechnical properties of electrosprays with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022. Vol. 12 (3): 312 (In English). DOI: 10.3390/coatings12030312.
 6. Latypov R., Serov A., Serov N., Chekha O. Technology of hardening plowshares by electrocontact welding using waste from tool production. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 247. 197-203 (In English). DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_21.
 7. Serov A.V., Serov N.V., Burak P.I. Functional coatings. *Electrometallurgy*. 2020. N11. 25-33 (In Russian). DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-11-25-33.
 8. Skorokhodov D.M., Basov S.S., Denisov V.A., Sviridov A.S. Microhardness of boride coatings obtained on 65g steel from different compositions of borating mixtures. *Machinery Technical Service*. 2021. Vol. 59. N2(142). 144-150 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150.
 9. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
 10. Sidorov S.A., Mironov D.A., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Assessment of durability and service life of two-layer hardened earth cutters in various soil condition. *Engineering Technologies and Systems*. 2020. Vol. 30. 699-710 (In Russian). DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.699-710.
 11. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Study of wear resistance of harvester knives during operation and evaluation of effective methods for hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. Vol. 53. N1. 80-87 (In English). DOI: 10.1134/S1052618824010072.
 12. Maksimov P.L., Ivanov A.G., Mokhov A.A., Petrov V.A. Possibilities of agricultural labor automation. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2015. N3(44). 32-38 (In Russian). EDN: UMXEZZ.
 13. Dorokhov A.S., Denisov A.V., Solomashkin A.A., Gerasimov V.S. Strategies of maintenance and repair of agricultural machinery. *Machinery Technical Service*. 2020. N3(140). 38-48 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-38-48.
 14. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
 15. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Kolesnikova V.A. et al. Automation facilities for agricultural machinery control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N3. 3-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
 16. Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., Ishkov A.V. et al. Analysis and optimization of cutting process of straw chopper-spreader knife of grain harvester in order to increase its durability. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2023. N 5 (223). 70-7838 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-223-5-70-78.
 17. Dorodov P.V., Petrov V.A., Toropov L.A. Regression model of wear of the working surface of blades of the DKR series grain crusher drum. *Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2024. N3 (79). 106-11338 (In Russian). DOI: 10.48012 / 1817-5457-2024-3-106-113.
 18. Skorokhodov D.M., Krasnyashchikh K.A., Sviridov A.S. Use of contactless methods and means for checking the quality of agricultural machinery spare parts. *Machinery Technical Service*. 2020. N2 (139). 141-148 (In Russian). DOI: 10.22314 / 2618-8287-2020-58-2-141-148.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Скорыходов Д.М. – научное руководство, постановка цели и формирование методики исследования, подготовка рукописи, анализ и доработка текста, формирование общих выводов;

Павлов А.С. – обобщение и описание результатов, визуализация материалов, подготовка рукописи, анализ литературных данных, формирование результатов исследования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Skorokhodov D.M. – scientific supervision, formulation of the research objective and methodology, manuscript preparation, text analysis and revision, and development of general conclusions;

Pavlov A.S. – synthesis and description of results, visualization of materials, manuscript preparation, literature review, and development of research findings.

The authors 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

10.09.2025

28.11.2025