

ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ / FRICTION AND WEAR IN MACHINES



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553>

EDN: <https://elibrary.ru/bypvzg>

УДК 620.193/.197:629.7.035.5

Оригинальная статья / Original article

Закон распределения коррозии узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана

Н. В. Лимаренко , Д. Н. Савенков,
Д. И. Гладких, А. А. Щербаков

*Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

 nlimarenko@donstu.ru

Аннотация

Введение. Развитие агропромышленного комплекса требует повышения эффективности использования машинотракторного парка. При этом необходимо учитывать коррозионные процессы, ускоряющие износ техники. Существующие методы оценки состояния основаны на эмпирических данных и не обеспечивают точного прогнозирования. Внедрение искусственного интеллекта и цифровых решений позволит автоматизировать испытания, сократить затраты и повысить точность оценки деградации, вызванной коррозионными процессами.

Цель исследования. Определить соответствие экспериментальных данных по влиянию солевого тумана на коррозию узлов сельхозтехники закону распределения на примере выключателей заднего хода.

Материалы и методы. Объектом исследования выбраны выключатели света заднего хода, широко используемые в сельскохозяйственной технике. Исследования проводились в камере солевого тумана с параметрами, соответствующими ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302, в течение 200 ч с промежуточными осмотрами каждые 48 ч. Во время испытаний определена степень коррозии, вычисленная по площади поврежденных участков. Математические методы включали вычисление среднего, медианы, дисперсии, стандартного отклонения, асимметрии, эксцесса и размаха выборки.

Результаты исследования. В результате испытаний была подтверждена работоспособность образцов и проведена оценка соответствия данных закону распределения Вейбулла. Экспериментально удалось установить, что активная фаза деградации поверхности выключателей заднего хода возрастает начиная с 96 ч экспозиции в камере солевого тумана, что связано с разрушением защитных покрытий и развитием питтинговой коррозии. Использование квадратичной регрессионной модели позволило описать зависимость коррозионных повреждений от времени экспозиции.

Обсуждение и заключение. Статистический анализ выборки подтвердил соответствие распределения Вейбулла, что позволяет прогнозировать дальнейшее распространение коррозии и улучшить оценку работоспособности изделий в условиях солевого тумана. Полученные параметры позволяют прогнозировать ресурс узлов.

© Лимаренко Н. В., Савенков Д. Н., Гладких Д. И., Щербаков А. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования создают основу для создания цифровых двойников и адаптивных систем обслуживания с использованием искусственного интеллекта, минимизирующих простой техники.

Ключевые слова: ресурсные испытания сельскохозяйственной техники, ускоренные ресурсные испытания, воздействия соевым туманом, коррозия в сельскохозяйственных машинах

Финансирование: исследование выполнено в рамках реализации Грантового проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-03-2025-302/1 от 25.03.2025.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лимаренко Н.В., Савенков Д.Н., Gladkih Д.И., Щербakov А.А. Закон распределения коррозии узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(3):529–553. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553>

Distribution Law of Corrosion of Agricultural Machinery Components under the Influence of Salt Spray

N. V. Limarenko , D. N. Savenkov,
D. I. Gladkih, A. A. Shcherbakov
Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russian Federation
 nlimarenko@donstu.ru

Abstract

Introduction. The development of the agro-industrial complex until 2030 requires increasing the efficiency of the machine and tractor fleet with account for corrosion processes accelerating equipment wear. Existing assessment methods are based on empirical data and do not provide accurate forecasting. The introduction of AI and digital solutions will automate testing, reduce costs and improve the accuracy of assessing degradation caused by corrosion processes.

Aim of the Study. The aim is to determine the compliance of experimental data on the effect of salt spray on the corrosion of agricultural machinery components with the distribution law through the example of reversing light switches.

Materials and Methods. The object of study was reversing light switches widely used in agricultural machinery. The studies were carried out in a salt spray chamber with parameters corresponding to GOST R 52230 and GOST 9.302 for 200 hours with intermediate inspections every 48 hours. During the tests, the degree of corrosion was determined, calculated by the area of damaged sections. Using mathematical methods there was calculated the mean deviation, median, variance, standard deviation, skewness, kurtosis, and range of the sample.

Results. As a result of the tests, the operability of the samples was confirmed and the obtained data compliance with the Weibull distribution law was assessed. It was experimentally established that the active phase of surface degradation of reversing light switches increases starting from 96 hours of exposure in the salt spray chamber that is caused by the destruction of protective coatings and progress of pitting corrosion. The use of a quadratic regression model made it possible to describe the dependence of corrosion damage on exposure time.

Discussion and Conclusion. The statistical analysis of the sample confirmed Weibull distribution fit that makes it possible to predict further corrosion progress and improve performance assessment of products in salt spray conditions. Obtained parameters allow predicting the resource of components. The results of the study provide a basis for creating digital twins and adaptive maintenance systems using artificial intelligence, which minimize machinery downtime.

Keywords: resource testing of agricultural machinery, accelerated resource testing, salt spray exposure, corrosion in agricultural machinery

Funding: The study was carried out within the framework of the implementation of the Grant Project of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 075-03-2025-302/1 dated 03.25.2025.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Limarenko N.V., Savenkov D.N., Gladkih D.I., Shcherbakov A.A. Distribution Law of Corrosion of Agricultural Machinery Components under the Influence of Salt Spray. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):529–553. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.529-553>

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение требований Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации¹, увеличение объемов экспорта сельхозпродукции, вовлечение новых земель в сельскохозяйственный оборот, а также внедрение цифровых сервисов является ключевым для принятой Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов². Основываясь на экспертных оценках ФГБНУ «Росинформагротех», Росстата к 2030 г. планируется увеличение объема экспорта сельскохозяйственной продукции до 41 млрд долл., что на 30 % выше текущей отметки. Наряду с наращиванием экспортного потенциала стратегически важной задачей является вовлечение в сельскохозяйственный оборот не менее 13,2 млн га земли к 2030 г.

Учитывая масштабы и агроклиматические особенности посевных площадей Российской Федерации, на которых осуществляется эксплуатация машинотракторного парка, необходимым является предложение программно-аппаратных технических решений, направленных на повышение эффективности использования их эксплуатационного потенциала [1; 2]. Как показал анализ практик [3–5], а также результаты предварительных исследований³, одной из наиболее частых причин отказа является образование коррозии на рабочих органах и основных компонентах машин в результате агрессивных воздействий внешних сред. Известно [6; 7], что коррозионное воздействие на узлы и агрегаты сельскохозяйственной техники запускается комплексом негативных воздействий, среди которых ультрафиолетовое облучение [8; 9], мелкодисперсные абразивы [6; 10], влажность и химические

¹ Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564161398?marker=65A0IQ> (дата обращения: 21.10.2024).

² Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/46497/> (дата обращения: 25.02.2025).

³ Способы и инструменты повышения эксплуатационной эффективности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники : моногр. / Н. В. Лимаренко [и др.]. Ростов-на-Дону, 2024. URL: <https://clck.ru/3PDXuU> (дата обращения: 28.03.2025).

удобрения [9–11]. Перечисленное приводит к снижению эксплуатационного ресурса и увеличению затрат на техническое обслуживание и ремонт. Соответственно, проведение ресурсных испытаний деталей, компонентов и узлов сельскохозяйственной техники, направленное на прогнозирование остаточного ресурса и оценку коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации является необходимым, но не достаточным условием реализации эксплуатационного потенциала. Кроме проведения ускоренных ресурсных испытаний необходима разработка предиктивных математических моделей, позволяющих сформировать массивы размеченных данных, которые будут положены в основу элементов искусственного интеллекта (ИИ) и прикладных программных продуктов. Как показал анализ информационных источников [12–15], применяемые сегодня средства и методы оценки состояния технических средств, эксплуатируемых в агропромышленный комплекс (АПК), основаны на эмпирических зависимостях и прямом наблюдении [16–18], что не позволяет с достаточной точностью прогнозировать поведение сложных технических систем в условиях внешних агрессивных сред. Установлено, что внедрению цифровых решений, способных автоматизировать проведение натурных испытаний, препятствуют значительные финансовые затраты на приобретение и обслуживание испытательного оборудования, создание массивов данных их разметки, нормировке и последующей математической формализации. Кроме этого присутствует сложность интерпретации полученных результатов при масштабировании на реальные условия эксплуатации [15; 18]. Практика показывает важность внедрения элементов ИИ в процессы моделирования и прогнозирования коррозионных процессов, проявляемых при эксплуатации сельскохозяйственной техники, позволяющих существенно сократить временные и финансовые затраты на ресурсные испытания, а также повысить точность и достоверность последующей оценки. Научная проблема состоит в необходимости иметь унифицированные и достоверные инструменты разметки и нормировки результатов ускоренных ресурсных испытаний для каждого конкретного узла, компонента и агрегата. Согласно данным исследований [19–21] определение закона распределения плотности вероятностей тех или иных параметров, характеризующих отказ или деградацию детали, компонента или узла сельскохозяйственной машины, не подчиняется закону нормального (Гауссовского) распределения⁴. В работах [19, 22] отмечен положительный опыт использования законов нормального распределения, распределения Релея и Вейбулла для описания рассматриваемых процессов [23]. Соответственно, определение принадлежности параметрических выборок закону распределения с последующим подбором его параметров является актуальной и значимой научной задачей, способной внести вклад в развитие прикладных цифровых решений для АПК.

Цель исследования – определить параметры соответствия экспериментальных данных, обобщающих влияния солевого тумана на коррозию узлов сельскохозяйственной техники, на примере выключателей заднего хода закону распределения.

⁴ Рабинович А. Ш., Сельцер А. А., Шаровский А. А. Методические указания по оценке, прогнозированию и нормированию ресурса и безотказности сельскохозяйственной техники. М.: ГОСНИТИ, 1975. 272 с.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить параметры экспозиции образцов в солевом тумане (режимы, продолжительность, метрики и инструментарий контроля, критерии отказа);
- осуществить статистическое моделирование, включающее проверку полученных выборок критерию согласия ($K-C/\chi^2$), выявление критических интервалов и оценку соответствия результатов закону распределения Вейбулла;
- провести инженерную интерпретацию, включающую прогноз ресурса и технического обслуживания исследуемых компонентов в соответствии с полученными экспериментально данными.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известно, что ресурсные испытания являются критически важным этапом проектирования и производства сельскохозяйственной техники, обеспечивая прогнозирование срока службы, выявление слабых мест конструкции и оптимизацию технических характеристик.

Одним из технологических трендов повышения эффективности ресурсных испытаний является развитие методов имитационного моделирования [24–26] и цифровых двойников [27; 28], позволяющих проводить исследования на основе математических моделей и компьютерных симуляций [29].

Активное внедрение получают контрольно-измерительные комплексы состояния оборудования и прогнозирования ресурса, включающие методы неразрушающего контроля и алгоритмов машинного обучения [30; 31]. Использование данного комплекса технологий для мониторинга текущего состояния рабочих органов сельскохозяйственной техники и других ее значимых компонентов позволяет снизить риски отказов до 60 % [16; 31]. Однако реализация архитектуры данных решений требует создания адекватных математических моделей, учитывающих значительное число факторов, влияющих на ресурс конкретного агрегата и компонента. Попытки формализовать подобные исследования предприняты в работах отечественных ученых [19; 23]. С математической точки зрения сложность в формализации данных процессов состоит в отсутствии четких рекомендаций по использованию того или иного математического аппарата [2; 9; 17]. По данной причине цифровизация и интеллектуализация данных процессов продвигается достаточно низкими темпами. Так, несмотря на представительность полученных результатов [18; 23], исследования не позволяют получить закономерности, определяющие основу моделирования физических явлений на составные элементы сельскохозяйственной техники.

В результате проведенного анализа информационных источников [15; 26; 27] установлено, что для прогнозирования коррозионной стойкости узлов сельскохозяйственной техники при воздействии солевого тумана стоит оценивать не только скорость разрушения материала, но и создание инструмента, позволяющего прогнозировать динамику коррозионного износа с учетом совокупности факторов, таких как состав материала, условия эксплуатации и продолжительность воздействия агрессивной среды.

Стоит отметить, что научные исследования зарубежных коллективов [30–32] в период с 2020 по 2024 гг. позволили значительно расширить понимание не только

общих закономерностей и зависимостей, но и механизмов [33–35] коррозионного разрушения и износа [36; 37] узлов сельскохозяйственной техники. Так, в отечественных и зарубежных работах [38–40] представлены принципы возникновения и протекания коррозионных процессов. Ряд авторов предлагает применение метода электрохимической импедансной спектроскопии для определения влияния концентраций солевого тумана ($\text{NaCl} \geq 3,5 \%$) на порог активации коррозии для низколегированных сталей, широко применяемых в сельхозмашиностроении и ее питтингового проявления. Представляет интерес диссертационное исследование А. С. Барчуковой⁵, в котором отмечается, что наибольшее влияние на динамику коррозии сельскохозяйственных машин оказывает комплекс воздействий в виде повышенной влажности, температурных колебаний, а также остатки удобрений. Предлагается в зависимости от специфики эксплуатации сельскохозяйственных машин корректировать состав удобрений и антикоррозионных покрытий. Р. Сан и др. [32], а также российские ученые [40–42] отмечают, что глубина коррозионных поражений при продолжительности испытаний свыше 500 ч способна достигать глубины свыше 1,2 мм, что существенно превышает допустимые нормы. Обобщив результаты исследований [8; 12; 40], можно сделать вывод, что влияние комбинированного воздействия коррозии и вибрационных нагрузок наиболее достоверно моделирует реальные условия работы большинства сельскохозяйственных машин. Например, экспериментальные исследования показали, что при частоте вибраций 25–35 Гц (характерной для работы культиваторов) скорость коррозионного растрескивания способна увеличиваться более на 30 % по сравнению со статическими условиями [6; 34; 42]. Практика показывает, что в значительной мере развитию коррозии подвержены сварные соединения, трещины в которых развиваются по границам зерен аустенита⁶. Сравнительный анализ стандартных методов ускоренных коррозионных испытаний, на основании которого удалось сформулировать некоторые дополнения для Международной методики тестирования устойчивости металлических материалов к коррозии ASTM B117⁷, представлен в работах ученых, среди которых: отсутствие циклов высыхания (в реальных условиях техника подвергается периодическому высыханию под солнцем) постоянная температура порядка $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, не отражающая суточных колебаний в полевых условиях игнорирование механических нагрузок и вибраций, присутствующих при эксплуатации сельскохозяйственной техники [32; 40; 41]. Данные выводы также нашли подтверждение в исследованиях [12; 36; 41], в которых представлен сравнительный анализ динамики развития коррозионных очагов с учетом факторов, характеризующих климатические зоны. Установлено, что стандартные испытания в солевом тумане минимизируют реальную скорость коррозии на 25–30 % для умеренного климата и порядка 40–45 % для приморских регионов. Практический интерес представляют работы отечественных

⁵ Барчукова А. С. Повышение сохраняемости сельскохозяйственной техники применением хелатного комплекса меди : дис. ... канд. техн. наук. М., 2025. 152 с.

⁶ Способы и инструменты повышения эксплуатационной эффективности узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники : моногр.

⁷ Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. [Электронный ресурс]. URL: <https://store.astm.org/b0117-19.html> (дата обращения: 25.02.2025).

ученых по изучению влияния агрохимикатов на коррозионные процессы⁸ [43]. Учеными установлено, что современные фосфорсодержащие удобрения создают локальные питтинговые зоны на поверхности металла, что приводит к развитию кислотной коррозии с характерной скоростью порядка 1,2–1,8 мм/год. Одним из трендов в области ресурсных испытаний являются исследования [12; 27; 36], связанные с изучением коррозии композитных материалов [40; 41; 43]. Обобщив представленные авторами [41; 44; 45] тезисы, можно сделать вывод, что полимерные покрытия на основе эпоксидных смол с наночастицами TiO₂ или аналогичных по физико-механическим свойствам пленок способны увеличить стойкость в условиях воздействия солевого тумана по сравнению с традиционными лакокрасочными покрытиями до 40 %.

Несмотря на многообразие рассматриваемых исследователями вопросов, удалось выделить те, которым уделено недостаточно внимания. Например, отсутствуют рекомендации по выбору того или иного закона распределения параметров, характеризующих распространение очагов коррозии в условиях эксплуатации сельскохозяйственных машин с агрессивными средами. Данный фактор в значительной степени затрудняет нормировку данных при разработке интеллектуализированных цифровых решений, позволяющих осуществлять ускоренные ресурсные испытания, в том числе и с использованием цифровых двойников [46–48]. Согласно данным⁹ ежегодные потери от коррозии в сельхозтехнике составляют порядка 12–15 % от стоимости новой техники в умеренном климате, 20–25 % в приморских и засушливых регионах, до 40 % при эксплуатации в условиях интенсивного применения удобрений. Таким образом, необходимость разработки методики статистического анализа закономерностей распространения коррозии является обоснованной. Создание подобного инструментария позволит повысить точность прогнозирования износа, а также шаблонизировать адаптацию антикоррозионных мер к реальным условиям эксплуатации, повысив при этом долговечность сельскохозяйственной техники.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования, предназначенного для изучения воздействия солевого тумана на коррозию узлов сельскохозяйственной техники, были выбраны выключатели света заднего хода. Такой выбор обусловлен широкой распространенностью этих компонентов в различных марках и моделях комбайнов, выпускаемых разными производителями. Выключатели света заднего хода применяются не только в комбайностроении, но и в тракторной, автомобильной, судостроительной и других отраслях промышленности. Согласно информации, предоставленной производителем машиностроительной продукции, основной причиной отказа

⁸ Павлов В. С., Смирнов А. Г., Гордеев А. А. Коррозионная стойкость конструкционных материалов в контакте с комплексными удобрениями // Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. (15 ноября 2021 г., г. Чебоксары). Чебоксары : Чувашский государственный аграрный университет, 2021. С. 619–624. <https://elibrary.ru/uaoufl>

⁹ Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистика [Электронный ресурс] : сайт. URL: <https://www.fao.org/statistics/ru/> (дата обращения: 25.02.2025).

выключателей света заднего хода является окисление контактов и залипание подвижных элементов. В рамках данного исследования рассматривались два типа выключателей, различающихся материалом контактных элементов. Первый тип (М) был оснащен медными контактами, которые демонстрируют достаточно высокую электропроводность, однако подвержены окислению с образованием различных химических отложений, особенно при эксплуатации в условиях повышенной влажности. Такие выключатели рекомендуются для применения в стабильных сухих условиях, например, в сельскохозяйственной технике, работающей в засушливых регионах [19; 20]. Второй тип выключателей (МС) имел посеребренные медные контакты, сочетающие преимущества меди с дополнительными защитными свойствами серебряного покрытия, благодаря которому достигается повышение электропроводности и коррозионной стойкости контактной группы при эксплуатации в агрессивных средах. Несмотря на увеличенную стоимость, данный тип выключателей является предпочтительным выбором для техники, эксплуатирующейся в условиях повышенной влажности, химического загрязнения или значительных температурных колебаний, включая зерноуборочные комбайны и морское оборудование [19; 20; 42]. Преждевременный выход из строя данного узла, по данным производителя, обусловлен несоответствием фактического срока службы паспортным характеристикам изделия. Объем экспериментальной выборки насчитывал по 50 образцов каждой категории. Общий вид выключателей заднего хода С-исполнения с медными клеммами представлен на рисунке 1 до воздействия и после.



Р и с. 1. Общий вид выключателей заднего хода зерноуборочного комбайна С-исполнения с медными клеммами:

а) до; б) после воздействия солевым туманом

F i g. 1. General view of the reversing switches of the combine harvester C-versions with copper terminals:

а) before; б) after exposure to salt spray

Источник: фотографии сделаны А. А. Щербаковым во время исследования ресурса выключателей заднего хода зерноуборочного комбайна РСМ в центре ресурсных испытаний Института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета в 2024 г.

Source: the photographs were taken by A. A. Shcherbakov during a study of the reverse (backup) switches durability on the RSM grain harvester at the Resource Testing Center of the Institute of Advanced Engineering of Don State Technical University, 2024.

Свойства и состав исследуемых выключателей представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Компонентный состав исследуемых выключателей заднего хода

The component composition of the studied reversing switches

№	Компонент выключателя заднего хода / Reverse switch component	Материал / Material	Функционал компонента / Component functionality
1	Корпус выключателя / Switch housing	Полиформальдегидное основание, АВС-пластик / Polyformaldehyde base, ABC-plastic	Защищает внутренние элементы от пыли, влаги и механических повреждений / Protects internal components from dust, moisture and mechanical damage
2	Контактная группа / Contact group	Бронза / Bronze	Замыкает или размыкает электрическую цепь при включении заднего хода / Closes or opens the electrical circuit when reverse gear is engaged
3	Пружинный механизм / Spring mechanism	Сталь 40X / Steel 40X	Обеспечивает возврат контактов в исходное положение / Ensures the contacts return to their original position
4	Толкатель или шток / Pusher or rod	Сталь 40X / Steel 40X	Механический элемент, срабатываемый при включении передачи заднего хода / Mechanical element triggered when reverse gear is engaged
5	Клеммы / Terminals	Медь или посеребренная медь / Copper or silver-plated copper	Подключение к бортовой системе электропитания / Connection to the on-board power supply system

Согласно ГОСТ 9.908-85¹⁰ степень поражения поверхности металла коррозией пятнами (G) вычислялась по формуле:

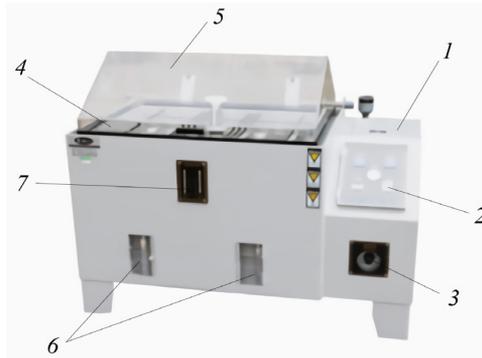
$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где S_i – площадь i -го пятна, м²; S – площадь поверхности образца, м²; n – количество пятен, шт.

Для решения поставленной задачи были проведены ресурсные испытания в специализированной камере, моделирующей неблагоприятные условия. Устойчивость к воздействию солевого тумана была проведена в камере соляного тумана (Corrosion Test Chamber SH-90), представленной на рисунке 2. Более подробно с характеристиками испытательного стенда можно познакомиться на сайте изготовителя¹¹.

¹⁰ ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007383> (дата обращения: 25.02.2025).

¹¹ Salt Spray Test Cabinet [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3PDZPx> (дата обращения: 25.02.2025).



Р и с. 2. Общий вид камеры солевого тумана Corrosion Test Chamber SH-90:
 1 – емкость входного раствора; 2 – панель управления; 3 – регулировочный клапан;
 4 – испытательная камера; 5 – крышка; 6 – мерные цилиндры;
 7 – датчики температуры и влажности

F i g. 2. General view of salt spray chamber “Corrosion Test Chamber SH-90”:
 1 – inlet solution container; 2 – control panel; 3 – control valve; 4 – test chamber; 5 – lid;
 6 – measuring cylinders; 7 – temperature and humidity sensors

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами статьи.

Source: hereinafter in this article the diagrams are compiled by the authors of the article.

Представленный на рисунке 2 испытательный стенд состоит из емкости ввода испытательного раствора 1, куда загружается испытательный раствор, в котором автоматически происходит распределение солевого раствора в отверстия для предварительного нагрева. С фронтальной стороны находится панель управления 2 с сигнализатором, сообщающим об ошибке или завершении испытания, и регулировочный клапан 3 необходимого давления (по умолчанию $1,00 \pm 0,01$ кгс/см²). Кроме основной испытательной камеры 4, находящейся под крышкой 5, также имеется отверстие корпуса управления, датчики температуры и влажности в камере 7 и мерные цилиндры 6 для определения объема раствора в камере.

Параметры, при которых произведены испытания по ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302¹², обозначены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

Параметры испытаний в камере соляного тумана
Test parameters in the salt spray chamber

№	Параметр, размерность / Parameter, dimension	Значение / Meaning
1	pH раствора / Solution pH	6,5
2	Температура, °С / Temperature, °C	30
3	Плотность соляного раствора, г/л / Density of brine solution, g/l	32
4	Продолжительность экспозиции, ч / Exposure duration, h	200
5	Интервал контроля, ч / Control interval, h	48

¹² ГОСТ Р 52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200035698> (дата обращения: 21.10.2021); ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/19600> (дата обращения: 21.10.2021).

Экспериментальные исследования проводились с учетом требований ГОСТ Р 52230 и ГОСТ 9.302¹³ с использованием методик планирования эксперимента. Испытания проводились в течение 200 ч с промежуточными осмотрами через каждые 48 ч. На протяжении испытания на воздействие солевого тумана при визуальном осмотре разрушения пластика не выявлено, при этом защитные металлические покрытия корродировали. Работоспособность образцов группы С-выключателей с медными и посеребренными клеммами сохранилась. Результат проведения испытаний выключателей положительный.

В процессе проведения экспериментальных исследований определялся процент поражения объекта исследования коррозионными пятнами каждые 48 ч. После чего для каждой из интервальных категорий выборок определялись их статистические характеристики, на основании которых строились гипотезы относительно соответствия закону распределения Вейбулла. Ниже представим используемый математический аппарат.

Среднее арифметическое значение выборки определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где n – число наблюдений выборки; x_i – отдельный элемент выборки.

Медиана выборки параметра, характеризующего процент коррозионного повреждения выключателей, определялась по следующей формуле:

$$M_e = \frac{x\left(\frac{n}{2}\right) + x\left(\frac{n}{2} + 1\right)}{2}. \quad (3)$$

Дисперсия выборки:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4)$$

Стандартное отклонение:

$$s = \sqrt{S^2}. \quad (5)$$

Асимметрия выборки:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3. \quad (6)$$

Экцесс выборки:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3. \quad (7)$$

Размах выборки:

$$R = x_{\max} - x_{\min}. \quad (8)$$

¹³ ГОСТ Р 52230-2004. Электрооборудование автотракторное. Общие технические условия; ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля.

Число интервалов выборки согласно правилу Стерджеса:

$$k = 1 + \log_2 n. \quad (9)$$

Длина интервала:

$$h = \frac{R}{k}, \quad (10)$$

где k — число интервалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После проведения экспериментальных исследований получения соответствующих выборок, характеризующих распределение коррозии по образцам с интервалом контролирования 48 ч, была получена следующая зависимость (рис. 3), отражающая степень поражения образца (выключателей заднего хода коррозионными пятнами (%)) в зависимости от продолжительности экспозиции до 200 ч). На протяжении испытаний при визуальном осмотре на группах C -выключателей и H -выключателей разрушения пластика не выявлено. Защитные металлические покрытия корродировали только на C -выключателях. Установлено, что работоспособность образцов группы H -выключателей с медными и посеребренными клеммами сохранилась; для выключателей C -исполнения с медными клеммами отклонение по работоспособности после 144 ч испытаний. Работоспособность образцов группы C -выключателей с медными и посеребренными клеммами после 240 ч испытаний не сохранилась. На основании программы и методики испытаний были выявлены критерии прохождения испытаний, обобщенные в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Table 3

Работоспособность выключателей после прохождения испытаний

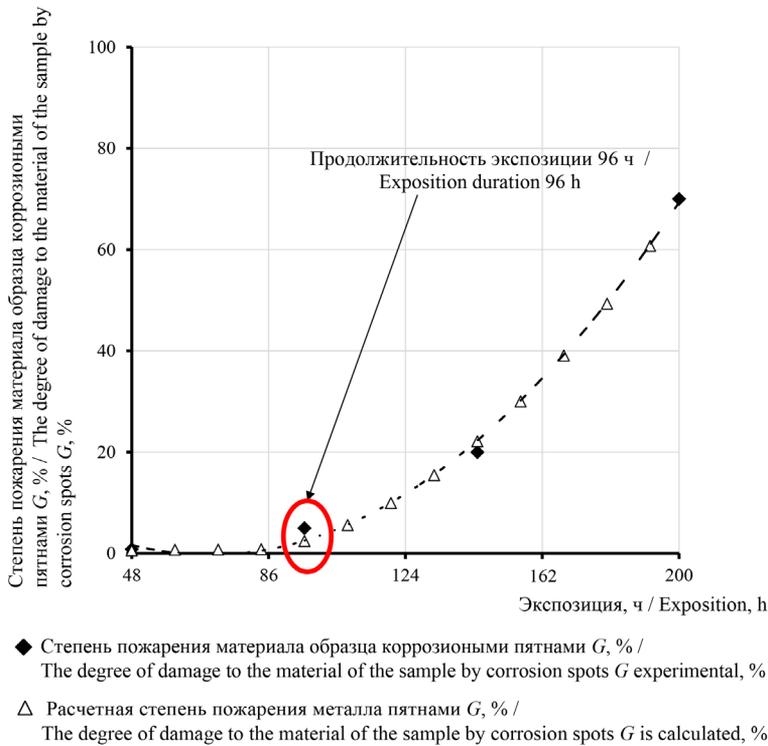
Performance of circuit breakers after testing

№	Исполнение образца / Sample execution	Обозначение образца / Sample Description	Площадь коррозии, % / Corrosion area, %	Показатель работоспособности / Performance indicator		Время отклонения по работоспособности / Performance deviation time
				Проведение электрического сигнала / Conducting an electrical signal	Подвижность кнопки-шарика / Ball button mobility	
1	C -выключатель /	M	85	+	–	144
2	C -switch	MC	85	+	–	240
3	H -выключатель /	M	5	+	+	*
4	H -switch	MC	8	+	+	*

Примечание: * – время отклонения по работоспособности H -выключателей не было зафиксировано, так как после обозначенных часов (240 ч) не было выявлено технических неисправностей.

Note: * – the time of deviation in the operability of the H -switches was not recorded, since no technical malfunctions were detected after the indicated hours (240 h).

Зависимость поражения образцов выключателей заднего хода коррозионными пятнами представлена на рисунке 3. На координатной плоскости присутствуют экспериментальные и расчетные данные (%) коррозионных повреждений.



Р и с. 3. График изменения поражения образцов
F i g. 3. Graph of changes in the lesions of the samples

Формализовать зависимость, представленную на рисунке 3, можно с использованием квадратичной регрессионной модели:

$$G = 19,717 + 0,004 \cdot t^2 - 0,573 \cdot t. \quad (11)$$

где t – продолжительность экспозиции образцов в камере солевого тумана, ч.

Модель (11) статистически значима и формализует результаты экспериментальных исследований с коэффициентом детерминации $r^2 = 0,99$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Проанализировав результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 3, можно определить, что начиная с 96 ч наблюдается значительный рост процента коррозионных пятен на поверхностях выключателей заднего хода, причина данного явления состоит в следующем. На начальных стадиях воздействия солевого тумана возможно наличие оксидной пленки или антикоррозионного покрытия, которое частично защищает металл и к 96 ч разрушается или перестает эффективно препятствовать коррозии. Следующим эффектом, позволяющим объяснить данную зависимость, является то, что в условиях солевого

тумана присутствует возникновение очагов питтинговой коррозии, обладающих кумулятивным эффектом. Образование коррозионных питтингов также способствует возникновению капиллярных эффектов, результатом которых является образование на поверхности металла накоплений влаги и солевых отложений, создающих микрогальванические пары, значительно ускоряющие коррозию. Соответственно, в качестве начальной точки прогнозирования распространения коррозии на образцах закону распределения Вейбулла примем продолжительность экспозиции в солевом тумане 96 ч. Распределение Вейбулла, задаваемое двумя функциями:

$$f(x) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^\beta}, \quad x \geq 0, \quad \beta, \lambda > 0, \quad (12)$$

где β — коэффициент формы; λ — параметр масштаба распределения.

Функция риска, характеризующая интенсивность отказов по Вейбуллу:

$$h(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\beta-1}. \quad (13)$$

Функция риска $h(x)$, она же интенсивность отказов технической системы, характеризует вероятность того, что объект выйдет из строя в момент x при условии, что он функционировал до этого времени. Для распределения Вейбулла она имеет вид $\beta < 1$ — убывающий риск (износостойкие системы); $\beta = 1$ — постоянный риск (экспоненциальное распределение, случайные отказы); $\beta > 1$ — возрастающий риск (износ, усталость материалов). Используя формулу (1), определим процент коррозии каждого образца, получив таким образом выборку объемом 50 наблюдений. Коэффициент формы $\beta = 5,9$; параметр масштаба распределения $\lambda = 5,6$. По формулам (2)–(10) рассчитаем наиболее представительные статистические характеристики полученной выборки, результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Статистические параметры и характеристики выборки
Statistical parameters and characteristics of the sample

№	Параметр / Parameter	Значение / Value	Характеристики выборки / Characteristics of the sample	Значение / Meaning
1	Среднее арифметическое \bar{x} / Arithmetic mean \bar{x}	5,190	Объем n / Volume n	50,00
2	Медиана M_e / Median M_e	5,150	Минимальное значение / Minimum value	4,35
3	Стандартное отклонение s / Standard deviation s	0,530	Максимальное значение / Maximum value	6,94
4	Асимметрия A / Asymmetry A	-0,050	Размах R / Swing R	1,59
5	Экссес K / Excess K	-0,120	Длина интервала h / Interval length h	0,22
6	Дисперсия S^2 / Dispersion S^2	0,284	Число интервалов k / Number of intervals k	7,00

Анализ статистических параметров выборки подтверждает ее соответствие закону распределения Вейбулла. Близкие значения среднего арифметического ($\bar{x} = 5,19$) и медианы ($M_e = 5,15$) указывают на слабую асимметрию, что согласуется с низким значением коэффициента асимметрии ($A = -0,05$). Размах выборки ($R = 1,59$) и стандартное отклонение ($s = 0,53$) свидетельствуют о сравнительно небольшом разбросе значений, характерном для распределения Вейбулла при умеренных значениях параметра формы. Значение эксцесса ($K = -0,12$) указывает на слабо выраженные хвосты распределения, что соответствует форме плотности вероятности Вейбулла при параметре формы $k > 3$. Длина интервала ($h = 0,22$) и число интервалов ($k = 7$) обеспечивают корректное разбиение данных, что важно для оценки соответствия эмпирического распределения теоретическому. Таким образом, совокупность параметров выборки подтверждает гипотезу о ее соответствии распределению Вейбулла.

Для строгой проверки гипотезы о соответствии выборки распределению Вейбулла необходимо построить гистограмму и эмпирическую функцию распределения, а также рассчитать функции риска (13). Как показал анализ информационных источников в качестве критерия достоверности соответствия плотности вероятностей распределения коррозии образцов при экспозиции 96 ч в камере солевого тумана закону распределения Вейбулла необходимо принять критерий согласия Колмогорова-Смирнова, χ^2 . Критерий Колмогорова-Смирнова проверяет, насколько эмпирическая функция распределения выборки отличается от предполагаемой теоретической функции распределения:

$$\chi_{est}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (14)$$

где O_i – наблюдаемая частота в i -м интервале; E_i – ожидаемая частота в i -м интервале.

Значение χ_{est}^2 сравнивается с критическим значением распределения χ_{crit}^2 при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы:

$$v = k - m - 1, \quad (15)$$

где m – число оцениваемых параметров распределения.

Если выполняется условие $\chi_{est}^2 < \chi_{crit}^2$, гипотеза о соответствии выборки заданному распределению принимается. В таблице 5 представлены статистические характеристики сопоставление эмпирических и теоретических частот распределения Вейбулла.

На рисунке 4 представлено распределение плотности вероятностей эмпирических и теоретических частот выборки в соответствии с законом Вейбулла.

Сопоставив данные (рис. 4, табл. 4), показывающие распределение эмпирических и теоретических частот, можно сделать вывод о достаточной степени соответствия выборки закону распределения Вейбулла. Различия между эмпирическими и теоретическими частотами в каждом интервале незначительны, что подтверждает согласованность данных с моделью. Максимальное отклонение составляет не более 0,2...0,3 единицы, что находится в пределах допустимых статистических флуктуаций. Суммарные частоты совпадают, что дополнительно свидетельствует

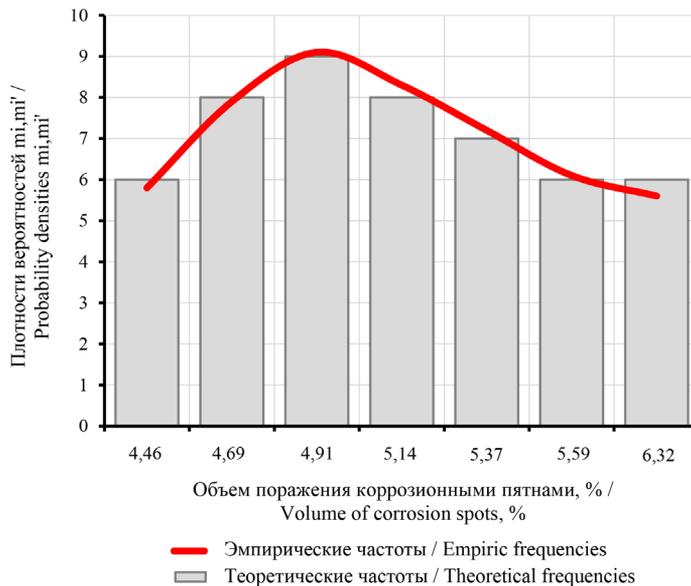
об адекватности примененной модели распределения. Таким образом, результаты анализа подтверждают гипотезу о соответствии выборки закону распределения Вейбулла. Используя данные экспериментальных исследований, представленные в таблице 4 результаты, осуществив расчет по формуле (14), были определены $\chi_{est}^2 = 0,057$ и $\chi_{crit}^2 = 9,49$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что подтверждает гипотезу о соответствии выборки, характеризующей распространение коррозии на выключателях заднего хода закону распределения Вейбулла при экспозиции в камере солевого тумана продолжительностью 96 ч.

Таблица 5

Table 5

Сопоставление эмпирических и теоретических частот распределения Вейбулла
Comparison of empirical and theoretical frequencies of the Weibull distribution

№	Границы интервалов / Interval boundaries			Эмпирическая частота / Empirical frequency	Теоретические частоты / Theoretical frequencies
	Нижняя / Lower	Верхняя / Upper	Средняя / Medium		
1	4,350	4,576	4,350	6	5,8
2	4,576	4,801	4,576	8	7,9
3	4,801	5,027	4,801	9	9,1
4	5,027	5,252	5,027	8	8,3
5	5,252	5,478	5,252	7	7,2
6	5,478	5,704	5,478	6	6,1
7	5,704	6,940	5,704	6	5,6
	Сумма / Amount			50	50,0



Р и с. 4. Распределение плотности вероятностей эмпирических и теоретических частот выборки в соответствии с законом Вейбулла

Fig. 4. Probability density distribution of empirical and theoretical sampling frequencies according to the Weibull law

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования выключателей заднего хода в условиях воздействия солевого тумана, характерного для агрессивных условий эксплуатации сельскохозяйственной техники в полевых условиях. Спецификой эксплуатации сельскохозяйственных машин в полевых условиях является значительное число факторов, способствующих развитию коррозии и, как следствие, преждевременным отказам рабочих органов и компонентов, приводящим к дополнительным издержкам.

В качестве ключевых показателей коррозионной стойкости использовались средний объем коррозии после воздействия солевого тумана и изменение контактного сопротивления. Значение параметра формы ($\beta = 5,9$) указывает на предсказуемый механизм износа с четко выраженной критической фазой, наступающей после 80 ч испытаний (мода распределения). Вероятность отказа в первые 48 ч минимальна ($<1\%$), что подтверждает достаточную коррозионную стойкость выключателей в начальный период эксплуатации. Слабая асимметрия $A = -0,05$ подтверждает стабильность процесса без внезапных отказов.

Статистический анализ достоверности соответствия экспериментально полученной выборки по критерию Колмогорова-Смирнова (χ^2 -критерий = 0,057 при критическом значении 9,49) подтвердил высокую степень соответствия экспериментальных данных закону распределения Вейбулла. Экспериментально выявлены критические временные интервалы начала активной коррозии 80...100 ч, сохранение работоспособности 95 % образцов до 96 ч. Полученные параметры распределения позволяют прогнозировать ресурс узлов, оптимизировать интервалы технического обслуживания, обоснованно выбрать материалы и защитные покрытия.

Полученные результаты представляют исходные данные для создания цифровых двойников рабочих органов и других значимых компонентов и узлов сельхозтехники, которые позволят моделировать процессы коррозионного старения в виртуальной среде, оптимизировать конструктивные решения на этапе проектирования, проводить виртуальные испытания различных защитных покрытий и материалов. Перечисленное открывает перспективы для создания адаптивных систем управления сервисным обслуживанием с автоматической корректировкой межсервисных интервалов в зависимости от фактической агрессивности среды и персонализированными графиками технического обслуживания для каждой единицы техники, а также позволяет минимизировать простои за счет точного прогнозирования их ресурса с учетом специфики среды эксплуатации.

Направлением дальнейших исследований является разработка методов адаптации параметров распределения в реальном времени на основе данных с датчиков коррозионного мониторинга в системы ИИ, что позволит создать импортозамещающие самообучающиеся средства прогнозирования ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катаев Ю.В., Загоруйко М.Г., Тишанинов И.А., Градов Е.А. Прогнозирование отказов в двигателях сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий. *Аграрный научный журнал*. 2022;(2):79–82. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp79-82>

2. Гайдар С.М., Мирзаев Р.Р., Пикина А.М., Балькова Т.И. Разработка математической модели определения эффективности сельскохозяйственной техники на отдельных уровнях многоуровневой системы оценки качества. *Агроинженерия*. 2023;25(5):46–51. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-5-46-51>
3. Ерохин М.Н., Дорохов А.С., Катаев Ю.В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники. *Агроинженерия*. 2021;(2):45–50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
4. Зайберт А.В. Тенденции развития рынка сельскохозяйственной техники в России. *Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета*. 2024;(2):80–83. <https://elibrary.ru/mqvqho>
5. Чавыкин Ю.И. Формирование автоматизированных интерактивных ресурсов сельхозмашин и оборудования, зарубежного опыта их использования и технического обслуживания. *Техника и оборудование для села*. 2023;(11):18–21. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-18-21>
6. Лукиенко Л.В. Анализ отказов эксплуатируемой сельскохозяйственной техники российского производства. *Агропродовольственная экономика*. 2024;(5):7–11. <http://apej.ru/article/01-05-24>
7. Герасимов В.С., Игнатов В.И., Буряков С.А., Мишина З.Н. Анализ состояния и направления развития сервисно-технологических услуг по поддержанию ресурса сельскохозяйственной техники в АПК. *Техника и оборудование для села*. 2020;(2):35–39. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-35-39>
8. Шуханов С.Н., Кузьмин А.В., Болоев П.А. Надежность работы машинно-тракторного агрегата. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(1):8–20. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>
9. Комаров В.А., Курашкин М.И. Исследование работоспособности зерноуборочных комбайнов в гарантийный период. *Инженерные технологии и системы*. 2021;(2):188–206. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>
10. Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С., Быков В.В., Голубев М.И. Перспективные направления использования аддитивных технологий в ремонтном производстве. *Техника и оборудование для села*. 2023;(6):35–38. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>
11. Сенин П.В., Чаткин М.Н., Кильмяшкин Е.А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(4):584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
12. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023;17(1):41–50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
13. Трубицын Н.В., Таркинский В.Е., Подольская Е.Е. Измерительная информационная система для полевых испытаний сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села*. 2023;(8):18–20. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-18-20>
14. Никитченко С.Л., Капкаев А.А., Юхнов В.И., Муконина М.И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства. *Аграрный научный журнал*. 2023;(10):194–204. <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>
15. Саяпин А.С., Петрищев Н.А., Пестряков Е.В. Совершенствование управления техническим состоянием машин за счет использования цифровых средств мониторинга. *Технический сервис машин*. 2023;61(4):10–17. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17>
16. Голубев И.Г., Быков В.В., Голубев М.И., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Перспективные направления цифровизации в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники. *Технический сервис машин*. 2023;61(4):18–25. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-18-25>
17. Основин В., Клавсуть П., Основина Л., Основин С. Информационное обеспечение в системе технического обслуживания и ремонта кормоуборочных комбайнов. *Аграрная экономика*. 2023;(3):74–82. <https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-3-74-82>

18. Родионов Ю.В., Данилин С.И., Ломовских А.Е., Север А.В., Киселев М.Г., Рыбин Г.В. Способ повышения технико-эксплуатационных свойств образцов сельскохозяйственной техники. *Наука в центральной России*. 2024;(6):19–33. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-6-19-33>
19. Малышев Е.Н., Лошкарева Е.А., Зенкин В.Н. О статистической устойчивости параметров распределения Вейбулла в практическом описании стойкости металлорежущих инструментов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024;(12):44–51. URL: <https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/2301/2301.pdf> (дата обращения: 10.06.2025).
20. Wang J., Yin H. Failure Rate Prediction Model of Substation Equipment Based on Weibull Distribution and Time Series Analysis. *IEEE Access*. 2019;7:85298–85309. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926159>
21. Ramos P.L., Nascimento D.C., Cocolo C. Nicola M.J., Carlos A., Ribeiro L.G., et al. Reliability-Centered Maintenance: Analyzing Failure in Harvest Sugarcane Machine Using Some Generalizations of the Weibull Distribution. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2018;(1):241856. <https://doi.org/10.1155/2018/1241856>
22. Verma A., Narula A., Katyal A., Yadav S.K., Anand P., Jahan A. Failure Rate Prediction of Equipment: Can Weibull Distribution be Applied to Automated Hematology Analyzers? *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*. 2018;56(12):2067–2071. <https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0569>
23. Чиганова Н. М. Приближенная оценка надежности изделий при Вейбулловском распределении отказов. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2024;(3):137–140. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/NTVP_3_2024.pdf (дата обращения: 10.06.2025).
24. Подольская Е.Е., Таркинский В.Е., Свиридова С.А., Иванов А.Б. Нормативно-методическое обеспечение испытаний сельскохозяйственной техники. *Техника и оборудование для села*. 2022;(5):18–21. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-5-18-20>
25. Миронов Д.А. Эксплуатационно-ресурсные испытания импортзамещающих рабочих органов комбинированного агрегата. *Техника и оборудование для села*. 2022;(6):34–37. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-6-34-37>
26. Басинюк В.Л., Волкотруб Р.Е., Лобкова М.П., Глазунова А.А. Ускоренные испытания и экспресс-анализ служебных свойств конструкционных материалов. *Актуальные вопросы машиноведения*. 2024;13: 119–122. <https://elibrary.ru/nslrji>
27. Балкаров Р.А., Ашабоков Х.Х. Сохраняемость и защита от коррозии сельскохозяйственной техники в условиях КБР. *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова*. 2024;(1):88–98. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-1-43-88-98>
28. Бадалян В.Г., Вopilкин А.Х. Применение нейронных сетей в ультразвуковом неразрушающем контроле (обзор). *Контроль. Диагностика*. 2022;(5):12–25. <https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.012-025>
29. Долматов Д.О. Применение искусственных нейронных сетей для решения задач акустического неразрушающего контроля (обзор). *Контроль. Диагностика*. 2023;(11):44–50. <https://doi.org/10.14489/td.2023.11.pp.044-050>
30. Pourhashem S., Saba F., Duan J., Rashidi A., Guan F., Nezhad E.G. Polymer/Inorganic Nanocomposite Coatings with Superior Corrosion Protection Performance: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020;88:29–57 <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.029>
31. Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review. *Smart Agricultural Technology*. 2023;3:100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
32. Sun R., Zeng Z., Zhu Y. Case Study on the Failure of World Agricultural Machinery IPO. *Highlights in Business, Economics and Management*. 2024;37:55–63. <https://doi.org/10.54097/nxegwt47>
33. Hamid Z.A. Reducing the Wear and Corrosion of the Agricultural Mower Steel Knives by Electrodeposition Nanocomposite Coatings – Review. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020;63(3):3075–3095. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.28677.2615>

34. Li X., Li Ya., Li F., Huang Z., Chen H. Failure Analysis and Experimental Study on Bolted Composite Joints Based on Continuum Damage Mechanics. *Composite Structures*. 2023;303:116274. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116274>
35. Жиздюк А.А., Буйлов В.Н., Чумакова С.В., Ахилбеков М.Н. Применение цифровых двойников технологических машин в АПК при эксплуатации и сервисном обслуживании. *Агроинженерия*. 2025;27(1):20–25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>
36. Liu H., Zhang L., Zhao B., Tang J., Luo J., Wang Sh. Research on Emergency Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm in Harvester Failure Scenarios. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1413595. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413595>
37. Hwang In.S., Kim J.H., Im W.T., Jeung H.H., Nam Ju.S., Shin Ch.S. Analyzing Safety Factors and Predicting Fatigue Life of Weak Points in an Electrically Driven, Multi-Purpose Cultivation Tractor. *Agriculture*. 2024;14(3):416. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030416>
38. Zhang H., Chen Ya., Cong J., Liu Ju., Zhang Zh., Zhang X. Reliability Study of an Intelligent Profiling Progressive Automatic Glue Cutter Based on the Improved FMECA Method. *Agriculture*. 2023;13(8):1475. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081475>
39. Gehling T., Schieppati Ja., Balasooriya W., Kerschbaumer R.Ch., Pinter G. Fatigue Behavior of Elastomeric Components: A Review of the Key Factors of Rubber Formulation, Manufacturing, and Service Conditions. *Polymer Reviews*. 2023;63(3):763–804. <https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2166955>
40. Ушаков М.В., Кутепов С.Н., Калинин А.А., Гречишкина Е.А. Исследование коррозионной стойкости комбинированных металлизационно-лакокрашочных защитных покрытий. *Известия Тульского государственного университета*. 2023;(5):319–325. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-5-319-320>
41. Мозговой Н.И., Раченкова М.С. Повышение коррозионной стойкости ответственных деталей сельскохозяйственной техники методом оксикарбонитрации. *Агротехника и энергообеспечение*. 2022;(4):182–187. <https://elibrary.ru/ocauqp>
42. Дорохов А.С., Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Пестряков Е.В., Саяпин А.С. Управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024;(5):51–56. <https://doi.org/10.31857/S2500262724050102>
43. Карасева Т.Н. Оценка коррозионной активности минеральных удобрений. *Технологии и инновации*. 2022:179–181. <https://elibrary.ru/dfpvng>
44. Das K. A Comparative Study of Exponential Distribution vs Weibull Distribution in Machine Reliability Analysis in a CMS Design. *Computers & Industrial Engineering*. 2008;54(1):12–33. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.030>
45. Sizaya O.I., Kvashuk Yu.V., Korolyov O.O., Dmytriiev V.A., Pavlenko A.H., Savchenko O.M. Corrosion of Structural Steels under the Action of N, S-Containing Mineral Fertilizers. *Materials Science*. 2021;57:119–127. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00522-5>
46. Hozhimatov A. Analysis of Destruction and Protection of Details of Agricultural Machinery. *E3S Web of Conferences*. 2023;383:04064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304064>
47. Al-Goul S.T., Abdel-Hamid S.M.S., Bassyouni M. Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel in Acidic Media Using PVA-Chitosan-Dopamine Composite Coatings. *ChemistrySelect*. 2024;9(30):202402161. <https://doi.org/10.1002/slct.202402161>
48. Popovych P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Science*. 2014;49:819–826. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9679-6>

Об авторах:

Лимаренко Николай Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории РСМ-Star института перспективного машиностроения Донского

государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, nlimarenko@donstu.ru

Савенков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры техники и технологий пищевых производств, заведующий научно-исследовательской лабораторией PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4546-424X>, savenkov-dstu@yandex.ru

Гладких Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры металлорежущих станков и инструментов, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>, Researcher ID: HDM-6104-2022, ya@dgladckih.ru

Щербаков Алексей Алексеевич, ассистент кафедры техники и технологии пищевых производств, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории PCM-Star института перспективного машиностроения Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6856-2219>, Researcher ID: GQI-3325-2022, aatsherbakov@donstu.ru

Вклад авторов:

Н. В. Лимаренко – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Д. Н. Савенков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Д. И. Гладких – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

А. А. Щербаков – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 14.04.2025; поступила после рецензирования 22.04.2025;
принята к публикации 13.05.2025*

REFERENCE

1. Kataev Yu.V., Zagoruiko M.G., Tishaninov I.A., Gradov E.A. Prediction of Failures in Agricultural Machinery Engines Using Digital Technologies. *Agrarian Scientifi Journal*. 2022;(2:)79–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2PP79-82>
2. Gaidar S.M., Mirzaev R.R., Pikina A.M., Balkova T.I. Developing a Mathematical Model for Determining the Efficiency of Agricultural Machinery at Separate Levels of a Multilevel Quality Assessment System. *Agricultural Engineering*. 2023;25(5):46–51. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/26871149202354651>

3. Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent System for Diagnosing the Parameters of the Technical Condition of Tractors. *Agricultural Engineering*. 2021;(2):45–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
4. Zaybert A.V. Trends in the Development of the Agricultural Machinery Market in Russia. *Vestnik Molodezhnoj Nauki Altajskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2024;(2):80–83. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/mqvqho>
5. Chavykin Yu.I. Formation of Automated Interactive Informational Resources of Agricultural Machinery and Equipment, Foreign Experience of Their Use and Maintenance. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(11):18–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-18-21>
6. Lukienko L.V. Analysis of Failures of Russian-Made Agricultural Machinery in Operation. *Agro Production and Economics Journal*. 2024;(5):7–11. (In Russ., abstract in Eng.) <http://apej.ru/article/01-05-24>
7. Gerasimov V.S., Ignatov V.I., Buryakov S.A., Mishina Z.N. Analysis of the Status and Areas of Development of Maintenance and Technological Services for Keeping the Lifetime of Agricultural Machinery in the Agricultural Sector. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(2):35–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-2-35-39>
8. Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Boloyev P.A. Reliability of Machine-Tractor Aggregates Operation. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(1):8–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.008-020>
9. Komarov V.A., Kurashkin M.I. Studying the Normal Operation of Grain Harvesters within the Warranty Period. *Engineering Technologies and Systems*. 2021;(2):188–206. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.188-206>
10. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S., Bykov V.V., Golubev M.I. Promising Paths for the Use of Additive Technologies in the Repair Industry. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(6):35–38. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>
11. Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmayashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>
12. Lobachevskiy Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Increasing The Operating Lifetime of Wearable Working Bodies of Agricultural Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):41–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/110.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
13. Trubitsyn N.V., Tarkivsky V.E., Podolskaya E.E. Measuring Information System for Field Tests of Agricultural Machinery. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;(8):18–20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-18-20>
14. Nikitchenko S.L., Kapkaev A.A., Yukhnov V.I., Mukonina M.I. Life Cycle Management of Agricultural Machinery at the Operational Stage in the Conditions of Digitalization of Production. *Agrarian Scientific Journal*. 2023;(10):194–204. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>
15. Sayapin A.S., Petrishchev N.A., Pestryakov E.V. The Need to Improve the Management of the Equipment Technical State through the Use of Digital Monitoring Tools. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):10–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-10-17>
16. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Promising Areas of Digitalization in the Technical Maintenance and Repair of Agricultural Machinery. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):18–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2023-61-4-18-25>
17. Osnovin V., Klavsut P., Osnovina L., Osnovin S. Information Support in the System of Maintenance and Repair of Forage Harvesters in Agriculture. *Agrarian Economics*. 2023;(3):74–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-3-74-82>

18. Rodionov Yu.V., Danilin S.I., Lomovskikh A.E., Sever A.V., Kiselev M.G., Rybin G.V. Method of Increasing the Technical and Operational Properties of Agricultural Machinery Samples. *Science in the Central Russia*. 2024;(6):19–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.3587/2305-2538-2024-6-19-33>
19. Malyshev E.N., Loshkareva E.A., Zenkin V.N. On Statistical Stability of the Weibull Distribution Parameters in Practical Description of the Metal-Cutting Tool Resistance. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2024;(12):44–51. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/2301/2301.pdf> (accessed 10.06.2025).
20. Wang J., Yin H. Failure Rate Prediction Model of Substation Equipment Based on Weibull Distribution and Time Series Analysis. *IEEE Access*. 2019;7:85298–85309. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2926159>
21. Ramos P.L., Nascimento D.C., Cocolo C. Nicola M.J., Carlos A., Ribeiro L.G., et al. Reliability-Centered Maintenance: Analyzing Failure in Harvest Sugarcane Machine Using Some Generalizations of the Weibull Distribution. Modelling and Simulation in Engineering. 2018;(1):241856. <https://doi.org/10.1155/2018/1241856>
22. Verma A., Narula A., Katyaj A., Yadav S.K., Anand P., Jahan A. Failure Rate Prediction of Equipment: Can Weibull Distribution be Applied to Automated Hematology Analyzers? *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*. 2018;56(12):2067–2071. <https://doi.org/10.1515/cclm-2018-0569>
23. Chiganova N.M. [A Close Assessment of the Reliability of Products at the Veibullovsky Distribution of Failures]. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2024;(3):137–140. (In Russ.) Available at: file:///C:/Users/User/Downloads/NTVP_3_2024.pdf (accessed 10.06.2025).
24. Podolskaya E.E., Tarkivskiy V.E., Sviridova S.A., Ivanov A.B. Regulatory and Methodological Support for Agricultural Machinery Testing. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(5):18–21. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-5-18-20>
25. Mironov D.A. Operational and Resource Tests of Import-substituting Working Bodies of the Combined Unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(6):34–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-6-34-37>
26. Basiniuk V.L., Volkotrub R.E., Lobkova M.P., Glazunova A.A. Accelerated Testing and Rapid Analysis of Service Properties of Structural Materials. *Actual Issues of Machine Studies*. 2024;13:119–122. <https://elibrary.ru/nslrji>
27. Balkarov R.A., Ashabokov Kh.Kh. Preservation and Corrosion Protection of Agricultural Machinery in the Conditions of KBR. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2024;(1):88–98. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2024-1-43-88-98>
28. Badalyan V.G., Vopilkin A.Kh. Application of Neural Networks in Ultrasonic Non-Destructive Testing (Review). *Testing. Diagnostics*. 2022;(5):12–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14489/td.2022.05.pp.012-025>
29. Dolmatov D.O. Application of Artificial Neural Networks for Solving Problems of Acoustic Non-destructive Testing (Review). *Testing. Diagnostics*. 2023;(11):44–50. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14489/td.2023.11.pp.044-050>
30. Pourhashem S., Saba F., Duan J., Rashidi A., Guan F., Nezhad E.G. Polymer/Inorganic Nanocomposite Coatings with Superior Corrosion Protection Performance: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020;88:29–57 <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.029>
31. Purcell W., Neubauer T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-Art Review. *Smart Agricultural Technology*. 2023;3:100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
32. Sun R., Zeng Z., Zhu Y. Case Study on the Failure of World Agricultural Machinery IPO. *Highlights in Business, Economics and Management*. 2024;37:55–63. <https://doi.org/10.54097/nxegwt47>
33. Hamid Z.A. Reducing the Wear and Corrosion of the Agricultural Mower Steel Knives by Electrodeposition Nanocomposite Coatings – Review. *Egyptian Journal of Chemistry*. 2020;63(3):3075–3095. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2020.28677.2615>

34. Li X., Li Ya., Li F., Huang Z., Chen H. Failure Analysis and Experimental Study on Bolted Composite Based on Continuum Damage Mechanics. *Composite Structures*. 2023;303:116274. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116274>
35. Zhizdyuk A.A., Builov V.N., Chumakova S.V., Akhilbekov M.N. Application of Digital Twins of Technological Farm Machines During Their Operation and Maintenance. *Agricultural Engineering*. 2025;27(1):20–25. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-20-25>
36. Liu H., Zhang L., Zhao B., Tang J., Luo J., Wang Sh. Research on Emergency Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm in Harvester Failure Scenarios. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1413595. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1413595>
37. Hwang In.S., Kim J.H., Im W.T., Jeung H.H., Nam Ju.S., Shin Ch.S. Analyzing Safety Factors and Predicting Fatigue Life of Weak Points in an Electrically Driven, Multi-Purpose Cultivation Tractor. *Agriculture*. 2024;14(3):416. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030416>
38. Zhang H., Chen Ya., Cong J., Liu Ju., Zhang Zh., Zhang X. Reliability Study of an Intelligent Profiling Progressive Automatic Glue Cutter Based on the Improved FMECA method. *Agriculture*. 2023; 13 (8): 1475. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081475>
39. Gehling T., Schieppati Ja., Balasooriya W., Kerschbaumer R.Ch., Pinter G. Fatigue Behavior of Elastomeric Components: A Review of the Key Factors of Rubber Formulation, Manufacturing, and Service Conditions. *Polymer Reviews*. 2023;63(3):763–804. <https://doi.org/10.1080/15583724.2023.2166955>
40. Ushakov M.V., Kutepov S.N., Kalinin A.A., Grechishkina E.A. Research of the Corrosion Resistance of Combined Metallization and Paint Protective Coatings. *Izvestiya Tula State University*. 2023;(5):319–325. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-5-319-320>
41. Mozgovoy N.I., Rachenkova M.S. Improving Corrosion Resistance of Agricultural Machinery Parts by Oxidation. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2022;(4):182–187. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ocauqp>
42. Dorokhov A.S., Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Pestryakov E.V., Sayapin A.S. Management of the Technical Condition of Agricultural Machinery Using Digital Technologies. *Rossiyskââ sel'skohozâjstvennaâ nauka*. 2024;(5):51–56. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/s2500262724050102>
43. Karaseva T.N. Assessment of the Corrosion Activity of Mineral Fertilizers. *Technology and Innovation*. 2022:179–181. <https://elibrary.ru/dfpvjq>
44. Das K. A Comparative Study of Exponential Distribution vs Weibull Distribution in Machine Reliability Analysis in a CMS Design. *Computers & Industrial Engineering*. 2008;54(1):12–33. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.030>
45. Sizaya O.I., Kvashuk Yu.V., Korolyov O.O., Dmytriiev V.A., Pavlenko A.H., Savchenko O.M. Corrosion of Structural Steels under the Action of N, S-Containing Mineral Fertilizers. *Materials Science*. 2021;57:119–127. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00522-5>
46. Hozhimatov A. Analysis of Destruction and Protection of Details of Agricultural Machinery. *E3S Web of Conferences*. 2023;383:04064. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338304064>
47. Al-Goul S.T., Abdel-Hamid S.M.S., Bassyouni M. Enhanced Corrosion Resistance of Mild Steel in Acidic Media Using PVA-Chitosan-Dopamine Composite Coatings. *ChemistrySelect*. 2024;9(30):202402161. <https://doi.org/10.1002/slct.202402161>
48. Popovych P.V., Slobodyan Z.B. Corrosion and Electrochemical Behaviors of 20 Steel and St.3 Steel in Ammonium Sulfate and Nitrophoska. *Materials Science*. 2014;49:819–826. <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9679-6>

About the authors:

Nikolay V. Limarenko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Chief Researcher of the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering FSBEI, Don State Technical University (1 Gagarin

Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, nlimarenko@donstu.ru

Dmitry N. Savenkov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Food Production Technologies, Head of the Research Laboratory RSM-Star of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4546-424X>, savenkov-dstu@yandex.ru

Dmitry I. Gladkih, Postgraduate Student of the Department of Metal-Cutting Machines and Tools, Research Fellow of the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2292-256X>, Researcher ID: HDM-6104-2022, ya@dgladkih.ru

Alexey A. Shcherbakov, Assistant at the Department of Food Production Engineering and Technology, Research Fellow at the RSM-Star Research Laboratory of the Institute of Advanced Mechanical Engineering, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6856-2219>, Researcher ID: GQI-3325-2022, aatsherbakov@donstu.ru

Authors contribution:

N. V. Limarenko – controlling and mentoring the study planning and conducting; formulating the study ideas, aims and objectives; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

D. N. Savenkov – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

D. I. Gladkih – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

A. A. Shcherbakov – conducting the study, specifically performing the experiments, collecting data; preparing and presenting the manuscript, specifically visualizing and presenting the data.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 14.04.2025; revised 22.04.2025; accepted 13.05.2025