

Научная статья

УДК 621.351

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ СПЛАВАМИ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

¹Антон Михайлович Никитин, ¹Ольга Евгеньевна Широбокова,²Юрий Евгеньевич Кисель, ²Кирилл Викторович Муймаров, ²Петр Евгеньевич Кисель¹ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия²ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Брянск, Россия

Аннотация. Разработан технологический процесс повышения износостойкости уплотнительных колец водоотливных установок нанесением на их рабочие поверхности железо-кобальтовых сплавов, обладающих высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Предложена теоретическая зависимость, устанавливающая связь между рабочими параметрами и свойствами материала уплотнительных колец и механическими свойствами упрочняющих покрытий. Определены требуемые механические свойства железо-кобальтовых осадков, обеспечивающие повышение долговечности уплотнительных колец в несколько раз. На основе лабораторных исследований влияния легирующих добавок в электролите и режимов электролиза на микротвердость, прочность сцепления и износостойкость железо-кобальтовых сплавов установлены условия получения покрытий, позволяющие значительно повысить их износостойкость в условиях абразивного изнашивания. Проведены испытания технологического процесса нанесения железо-кобальтовых покрытий в лаборатории БГИТУ. Разработана и изготовлена установка, оснастка и электролиты для нанесения железо-кобальтовых сплавов на рабочие поверхности уплотнительных колец. Выбраны апробированы режимы анодной обработки поверхности деталей, обеспечивающие высокую прочность сцепления покрытий с основой. Показано, что высокая равномерность наносимых покрытий позволяет исключить последующую механическую обработку деталей. Проведены полевые испытания упрочненных колец карьерного земснаряда Watermaster, показавшие их надежную работу в течение межремонтного срока службы. Установлено, что нанесение покрытий на рабочую часть колец позволяет повысить износостойкость рабочей поверхности в 2...3 раза до полной выработки упрочненного слоя. Предложены рекомендации по совершенствованию технологии упрочнения уплотнительных колец. Показана высокая эффективность применения технологии повышения износостойкости уплотнительных колец электрохимическими железо-кобальтовыми сплавами в сравнении с другими методами упрочнения поверхностей деталей.

Ключевые слова: электрохимические покрытия, износостойкость, микротвердость, сельскохозяйственная техника.

Для цитирования. Повышение износостойкости уплотнительных колец водоотливных установок электрохимическими сплавами на основе железа / А.М. Никитин, О.Е. Широбокова, Ю.Е. Кисель и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2026. № 3 (115). С. 72-79.

Original article

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF SEALING RINGS OF WATER REMOVAL INSTALLATIONS THROUGH ELECTROCHEMICAL FERROUS ALLOYS

¹Anton M. Nikitin, ¹Ol'ga Ye. Shirobokova, ²Yuri Ye. Kisel', ²Kirill V. Muymarov, ²Pyotr Ye. Kisel'¹Bryansk State Agrarian University, Bryansk Region, Kokino, Russia²Bryansk State Engineering and Technology University

Abstract. A technological process has been developed to increase the wear resistance of the sealing rings of the water removal installations by applying iron-cobalt alloys with high mechanical and operational properties to their working surfaces. A theoretical dependence has been proposed that establishes a relationship between the working parameters and properties of the sealing ring material and the mechanical properties of the hardening coatings. The required mechanical properties of the iron-cobalt deposits have been determined to increase the durability of the sealing rings by several times. Based on laboratory researches of the effect of alloying additives in the electrolyte and electrolysis modes on the microhardness, adhesion strength, and wear resistance of iron-cobalt alloys, the conditions for obtaining coatings have been established that significantly increase their wear resistance under conditions of abrasive wear. The technological process of applying iron-cobalt coatings was tested in the BSETU laboratory. A setup, tooling, and electrolytes were developed and manufactured for applying iron-cobalt alloys to the working surfaces of sealing rings. The modes of anodic treatment of the part surface were selected and tested to ensure high adhesion strength of the coatings to the base. It has been shown that the high uniformity of the applied coatings makes

it possible to eliminate subsequent mechanical processing of parts. Field tests of hardened sealing rings for the Watermaster quarry dredger were conducted, demonstrating their reliable operation throughout the service life between repairs. It was found that coating the working surface of the rings increases wear resistance by 2-3 times until the hardened layer is completely worn out. Recommendations for improving sealing ring hardening technology are proposed. Electrochemical iron-cobalt alloy coating for increasing sealing ring wear resistance is shown to be highly effective compared to other surface hardening methods.

Keywords: *electrochemical coatings, wear resistance, microhardness, agricultural machinery.*

For citation. *Improving the wear resistance of sealing rings of water removal installations through electrochemical ferrous alloys / A.M. Nikitin, O.E. Shirobokova, Yu.E. Kisel, et al. // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2026. No. 3 (115). pp. 72-79.*

Введение. Современные водоотливные установки отечественного и зарубежного производства, применяемые при создании сельскохозяйственных гидромелиоративных систем и сооружений, удалении подземных или поверхностных вод из горных выработок, водоотливе карьерных вод и открытой разработке месторождений испытывают острую потребность в деталях, изготовленных из материалов, которые обладают высокой износостойкостью, способны выдерживать высокие механические нагрузки, противостоять воздействию знакопеременных и контактных нагрузок [1-3]. Особенно остро эта проблема стоит для центробежных многоступенчатых секционных насосов, детали которых испытывают высокие контактные знакопеременные нагрузки [4,5]. Преждевременный выход из строя таких деталей снижает средний ресурс водоотливных установок.

Основными затратами на эксплуатацию насосного оборудования водоотливных установок, оснащенных центробежными секционными насосами, являются затраты на электроэнергию и выполнение капитальных ремонтов, связанных с процессами гидроабразивного изнашивания деталей проточной части насосных систем [6-9]. Таким образом, повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей водоотливных установок позволит повысить эффективность их работы за счет снижения потребления электроэнергии, сохраняя исходные эффективные размеры деталей, и затрат на ремонт оборудования, так как периодичность капитальных ремонтов зависит от интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхностей щелевых уплотнений за заданный промежуток времени количества. Изменение исходных размеров щелевых уплотнений рабочих колес вследствие износа приводит к преждевременному снижению эксплуатационных характеристик насосного оборудования [1,2].

Износ деталей проточной части секционных насосов вызван воздействием на их рабочие поверхности гидроабразивного, коррозионного, кавитационного и адгезионного видов изнашивания, где степень влияния каждого из представленных деградиационных процессов зависит от гидрогеологических условий выполняемых работ, характеристик грунта, способов их забора и перемещения [4,5]. Ряд исследований показывает, что преобладающим видом изнашивания их поверхностей является гидроабразивный, который более интенсивно проявляется в местах образования коррозионной пленки [7-9].

Для изготовления деталей водоотливных установок используют дорогостоящие высоколегированные стали с последующей химико-термической обработкой, так как в большей степени ресурс деталей определяет свойства их поверхностного слоя [11-17]. Поэтому применение износостойких электрохимических покрытий на основе сплавов железа, обладающих высокой твердостью и износостойкостью, для повышения долговечности деталей водоотливных установок является актуальным направлением [1-5].

Вопросы исследования физико-механических свойств железных покрытий и их применения в ремонтном производстве нашли отражение в многочисленных статьях и монографиях [11-17]. Вместе с тем, недостаточное развитие теории и практики получения таких покрытий сдерживает их широкое применение в технике. Поэтому целью работы было экспериментально проверить предпосылки получения железо-кобальтовых сплавов, обладающих высокими механическими и эксплуатационными свойствами, и на их основе разработать технологический процесс повышения износостойкости уплотнительных колец водоотливных установок. Для достижения цели работы необходимо было решить следующие задачи: установить теоретическую зависимость между параметрами детали и механическими свойствами покрытий; определить условия получения качественных прочностеплеченных сплавов; выполнить опытную проверку технологического процесса упрочнения деталей в лабораторных и полевых условиях.

Теоретические исследования. По оценкам многих исследований [1,2] при нормальной эксплуатации уплотнительных колец отказ может наступать в результате достижения предельного износа поверхностей деталей (рис.1). Таким образом, для повышения долговечности уплотнительных колец необходимо обеспечить высокую износостойкость их внутренней рабочей поверхности.

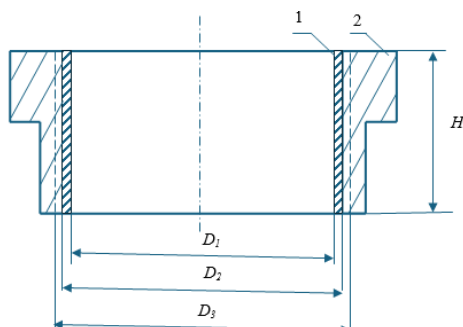


Рисунок 1 - Схема нанесения покрытия на рабочую поверхность кольца: 1 - покрытие; 2 - корпус кольца

Величину износа и относительную износостойкость материала уплотнительного кольца, интенсивность изнашивания (j) определим с помощью выражений (рис. 2):

$$j_k = \frac{I_k}{P_k}, \quad (1)$$

где j_k - корпуса кольца; P_k - средний ресурс корпуса кольца.

Связь между интенсивностью изнашивания упрочняющего покрытия (j_n) и материала корпуса уплотнительного кольца можно охарактеризовать зависимостью:

$$j_n = \frac{I_n}{P_n} = \frac{j_k}{B}, \quad (2)$$

где I_n - износ упрочняющего покрытия; P_n - средний ресурс покрытия; B - коэффициент относительной износостойкости покрытия.

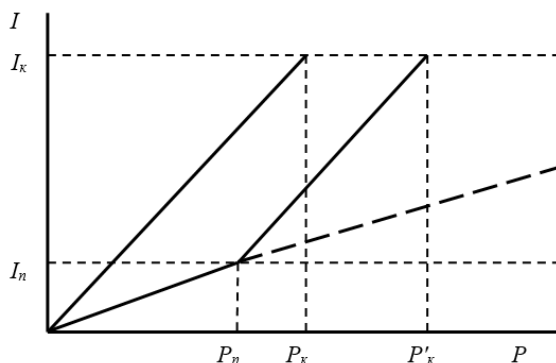


Рисунок 2 - График интенсивности изнашивания

С учетом (3) средний ресурс покрытия можно представить в виде:

$$P_n = \frac{I_n}{j_n} = \frac{B I_n}{j_k} \quad (3)$$

Наибольшую долговечность уплотнительного кольца с упрочняющим покрытием (P'_k) можно определить с помощью выражения:

$$P'_k = P_n + \frac{I_k - I_n}{j_k} = \frac{B I_n}{j_k} + \frac{I_k - I_n}{j_k} = \frac{(B-1) I_n + I_k}{j_k}. \quad (4)$$

В случае равномерного изнашивания рабочей поверхности уплотнительных колец в процессе эксплуатации максимальную величину износа покрытия можно принять равной массе осадка:

$$I_n = V_n \times \rho, \quad (5)$$

где V_n и ρ - объем и плотность покрытия.

Объем осадка связан с размерами уплотнительного кольца зависимостью (см. рис.1):

$$V_n = \pi D_1 H t. \quad (6)$$

Тогда долговечность упрочненных колец можно определить из уравнения:

$$P'_k = \frac{(B-1) \pi D_1 H t \rho + I_k}{j_k}. \quad (7)$$

Расчет требуемой толщины упрочняющего покрытия выполнили на примере уплотнительного кольца ($D_1=200$ мм; $D_2=201$ мм; $D_3=203$ мм; $\rho=7870$ кг/м³; $I_n=0,002...0,003$ кг; $I_k=140...160$ г; $j_k=8...10$ г/час; $j_n=0,1...0,2$ г/час).

Анализ зависимости (7) показал, что для повышения ресурса уплотнительных колец в 2 раза необходимо получить железо-кобальтовые покрытия с относительной износостойкостью $B 3...4$ и толщиной осадков $0,5...1$ мм. Электрохимические сплавы на основе железа имеют высокую твердость и износостойкость, превышающие свойства закаленных высокоуглеродистых сталей [11-17]. Исследования по их применению для повышения долговечности деталей, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания, показали перспективность их применения. Вместе с тем, для разработки технологического процесса необходимо установить режимы нанесения осадков, отвечающих наибольшей износостойкости, откорректировать конструкцию ванн и оснастки для их нанесения на рабочие поверхности деталей и исследовать работу деталей с покрытиями в производственных условиях.

Экспериментальные исследования. Железо-кобальтовые сплавы осаждали из электролита состава: железо хлористое 500...550 кг/м³; кобальт сернокислый- 100...150 кг/м³. Анодную подготовку выполняли в 30% растворе серной кислоты [11]. Влияние режимов электроосаждения на микротвердость и износостойкость осадков изучали с применением плана эксперимента ЦКР 2³ [18]: температура электролита (Т) - от 30 до 80 °С, плотность тока (Дк) - от 13,4 до 46,8 А/дм², pH раствора - от 0,2 до 1,2. Микротвердость покрытий определяли по ГОСТ 9450-76. Исследования абразивной износостойкости покрытий проводили в соответствии с ГОСТ 23.208-79.

Установлено, что износ железо-кобальтовых покрытий в условиях абразивного изнашивания зависел от параметров электролиза (рис.1). Наибольшее влияние на износостойкость оказывала температура электролита, снижение которой до 30...35°С приводило к уменьшению износа сплавов. При повышении Дк до 35...40 А/дм² износостойкость сплавов увеличивалась до максимального значения (рис. 1, б). Значение pH электролита соответствующее минимальному износу осадков было в центре плана эксперимента (рис. 1, а, в)

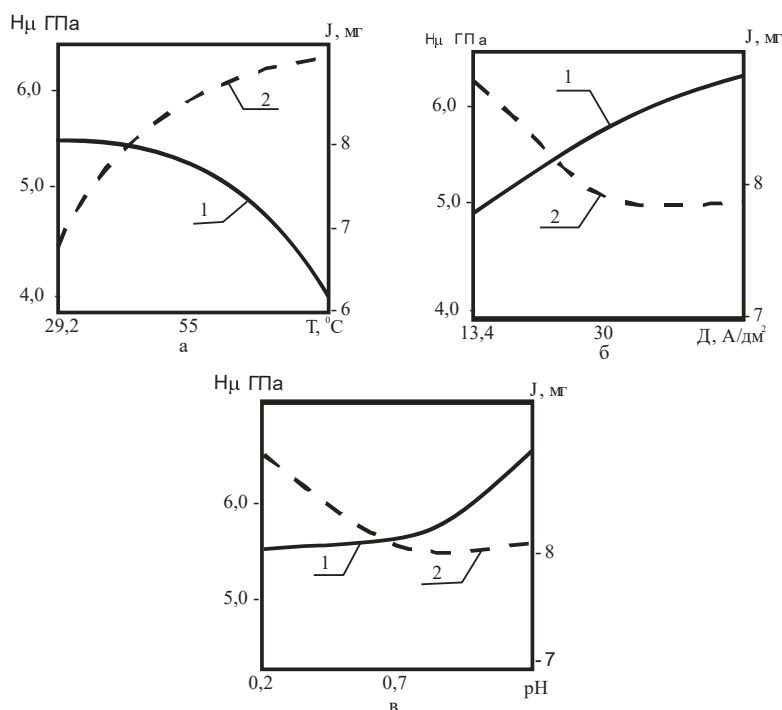


Рисунок 3 - Влияние режимов электролиза (а,б,в) на микротвердость (1) и износ (2)

С помощью регрессионного анализа полнофакторного эксперимента были установлены режимы осаждения, обеспечивающие наибольшую износостойкость железо-кобальтовых покрытий: pH раствора - $0,7...1,0$; $Дк$ - $35...40$ А/дм²; T - $40...45$ °С. Образцы, полученные при рекомендуемых условиях осаждения, имели износ в 2...3 раза меньше, чем образцы из закаленной стали 65Г.

Апробацию технологического процесса проводили на примере повышения долговечности уплотнительного кольца водоотливной установки карьерного земснаряда Watermaster 4. Покрытие на детали наносили по схеме, представленной на рисунке 2.

Перед нанесением сплавов очистку, мойку и дефектовку деталей целесообразно проводить согласно требованиям [17]. Упрочняемые поверхности уплотнительных колец перед нанесением покрытий были доведены до требуемых размеров и шероховатости. Для защиты поверхностей уплотни-

тельных колец, для которых не требовалось нанесение покрытий, использовали цапон-лак и защитную пленку ПФХ (рис. 2).



Рисунок 4 - Защита поверхностей кольца, не подлежащих нанесению покрытий

Электроосаждение сплавов на уплотнительные кольца производили на специальной опытной установке в лаборатории гальванических покрытий Брянского ГИТУ. В процессе подготовки деталей к нанесению покрытий были откорректированы форма защитных экранов и подвесных приспособлений (рис.3).



Рисунок 5 - Опытная установка для нанесения покрытий на детали

Электрохимическое обезжиривание деталей выполняли в стандартном электролите при плотности тока 1,0...2,0 А/дм² [11,12]. Режимы анодной обработки позволяют получать высокую прочность сцепления с основой 300...350 МПа.

Покрытия наносили при режимах, отвечающих получению осадков с наибольшей износостойкостью. Лак для защиты поверхностей не подлежащих осаждению необходимо было наносить в несколько слоев, что приводило к большому расходу материалов и увеличивало время на подготовку. Как показали лабораторные исследования, в процессе электроосаждения сплавов происходило растворение и отслоение слоев лака, приводящее к загрязнению электролита. Лучшие результаты показали защитные чехлы из винипласта и пластика (рис. 2). Покрытия получались равномерными, гладкими, без сколов и трещин, что позволило исключить последующую механическую обработку (рис. 3). После нанесения покрытий детали нейтрализовали в соответствии с требованиями технологии железнения [11].



а



б

Рисунок 6 - Опытная установка для нанесения сплавов на детали

Для эксплуатационных испытаний уплотнительных колец была подготовлена партия деталей, на поверхность которых были нанесены покрытия толщиной 0,5...0,6 мм по схеме, представленной на рисунке 2. Детали для испытаний, с нанесенными покрытиями были поставлены на испытания на водоотливную машину (рис. 7).



Рисунок 7 - Проведение эксплуатационных испытаний деталей с покрытием

В процессе работы систематически проводили осмотр и микрометраж деталей. Износостойкость покрытий оценивали по среднему износу и сравнением его с износостойкостью серийных колец (рис.8). Анализ результатов полевых испытаний показал, что опытные кольца надежно работали в течение межремонтного срока службы. Нанесение покрытий на рабочую часть колец позволяет повысить износостойкость рабочей поверхности в 2...3 раза до полной выработки упрочненного слоя. Таким образом, полученные данные полевых исследований позволяют сделать заключение о целесообразности внедрения железо-кобальтовых покрытий и технологии повышения долговечности уплотнительных колец в производство.

На основе результатов эксплуатации упрочненных уплотнительных колец для повышения их долговечности можно рекомендовать следующее:

- опробовать композиционные покрытия с твердым дисперсным наполнителями, например, электрокорундом, карбидом кремния или карбидом бора;
- осуществить упрочнение кольца с тыльной стороны.



Рисунок 8 - Общий вид кольца после эксплуатации

Как показали лабораторные испытания, технология повышения износостойкости рабочих поверхностей уплотнительных колец нанесением железо-кобальтовых сплавов имеет ряд технических и экономических преимуществ в сравнении с другими методами [16]. Для организации производства можно использовать недорогое стандартное оборудование. Электролиты готовить из недорогих широкодоступных реактивов. Технология позволяет в процессе нанесения упрочняющих осадков в широких пределах регулировать их толщину и твердость. Высокая гладкость и равномерность осадков позволяет исключить последующую механическую обработку деталей с покрытиями. В отличие от наплавки и напыления, где каждую деталь необходимо обрабатывать отдельно, железнением можно упрочнять несколько деталей одновременно. Наиболее важным преимуществом технологии можно считать отсутствие высокотемпературного нагрева деталей, что полностью исключает нарушение структуры основного металла детали и ее коробление. Экономические расчеты подтверждают эффективность внедрения технологии упрочнения деталей электрохимическими сплавами на предприятиях [11,12].

Вывод. Установлены условия получения износостойких прочносцепленных железо-кобальтовых покрытий обладающих повышенной до 2...3 раз износостойкостью по сравнению с закаленными легированными сталями. Апробация технологии упрочнения деталей электрохимическими железо-кобальтовыми сплавами, на примере повышения долговечности уплотнительных колец водоотливных машин, показала ее высокую эффективность и целесообразность внедрения на производстве.

Список источников

1. Ерофеева Н.В. Стационарные установки. Водоотливные и вентиляторные установки. Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2021. 182 с.
2. Влияние гидроабразивного износа на экономичность работы водоотливных установок шахт и рудников / А.В. Долганов, В.Я. Потапов, С.В. Белов и др. // Математическое моделирование механических явлений: материалы Всерос. науч.-техн. конф. памяти доцента А.П. Золкина, 03-04 октября 2025 года. Екатеринбург: Уральский гос. горный ун-т, 2025. С. 45-48.
3. Обоснование рациональной частоты вращения центробежных насосов шахт и рудников / А.В. Долганов, В.Я. Потапов, С.В. Белов и др. // Математическое моделирование механических явлений: материалы Всерос. науч.-техн. конф. памяти доцента А. П. Золкина, 03-04 октября 2025 года. Екатеринбург: Уральский гос. горный ун-т, 2025. С. 54-57.
4. Казанцев Д.К., Ерофеева Н.В. Методы контроля износа рабочих колес центробежных секционных насосов // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф., 22 мая 2025 года. Междуреченск: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева, 2025.
5. Огурцов С.А., Алныкин Е.Н., Ерофеева Н.В. Водоотливная установка с гибким мобильным напорным рукавом на разрезе АО «Междуречье» // Научно-инновационный вектор современного развития: электронный сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Новокузнецк, 30 мая 2025 года. Самара: Самарама, 2025. С. 170-173.
6. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Ю.С. Тюляева // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13, № 3 (49). С. 406-415.
7. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора / М.Г. Рахутин, К.К. Занг, А.Е. Кривенко, В.Х. Чан // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 374-383.
8. Разработка модели оценки эффективности системы охлаждения рабочей жидкости гидравлического карьерного экскаватора / К.К. Занг, А.Е. Кривенко, Е.Ю. Пудов, Е.Г. Кузин // Горный журнал. 2021. № 12. С. 64-69.
9. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» / В.В. Зотов, В.У. Мнацаканян, М.М. Базлин и др. // Промышленность. 2024. № 2. С. 143-146.
10. Применение электролитических сплавов для повышения долговечности зубьев дорожных фрез / А.С. Зятиков, П.Е. Кисель, Ю.Е. Кисель и др. // Вестник Брянской ГСХА. 2025. № 2 (108). С. 68-71.
11. Кисель Ю.Е., Симохин С.П., Мурачев С.А. Восстановление деталей железнением в потоке электролита // Сельский механизатор. 2021. № 4. С. 35-37.
12. Широбокова О.Е., Кисель Ю.Е., Безик Д.А. Применение электротехнологий для восстановления деталей сельскохозяйственной техники // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 10 (107). С. 22-26.
13. Nanoparticle-based hardening of galvanic coatings: a one-dimensional superposition model / V.V. Safonov, S.A. Shishurin, P.A. Gorbushin et al. // The Agrarian Scientific Journal. 2024. N 6. P. 125-133.
14. Поликомпозиционное гальваническое хромирование как способ получения заданных свойств покрытия режущих элементов уборочных машин / П.А. Горбушин, В.В. Сафонов, С.А. Шишурин и др. // Инновационное техническое обеспечение агропромышленного комплекса: материалы науч.-техн. конф. с междунар. участием им. А.Ф. Ульянова, 03 октября 2025 года. Саратов: Саратовский гос. ун-т генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова, 2025. С. 223-229.
15. Агеев Е.В. Ремонт машин в АПК / Е.В. Агеев, В.И. Серебровский, В.А. Кончин. Курск: Планета+, ЗАО "Университетская книга", 2025. 192 с.
16. Восстановление и упрочнение плазменно-порошковой наплавкой рабочих органов машин для посева и уборки сахарной свеклы: монография / В.И. Серебровский, Е.В. Агеев, Е.В. Агеева, В.А. Кончин. Курск: Курский ГАУ, 2025. 104 с.
17. Косенко Е.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2023. 202 с.

Информация об авторах:

А.М. Никитин - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, a.m.nikitin32@mail.ru.

О.Е. Широбокова - кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехнологий, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ.

Ю.Е. Кисель – доктор технических наук, профессор кафедры общетехнических дисциплин и физики ФГБОУ ВО БГИТУ.

К.В. Муймаров – кандидат технических наук, главный инженер проекта ООО «ЮМакс».

П.Е. Кисель – аспирант ФГБОУ ВО БГИТУ

Information about the authors:

A.M. Nikitin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering and Electrotechnologies, Bryansk State Agrarian University, a.m.nikitin32@mail.ru.

O.Ye. Shirobokova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrotechnologies, Bryansk State Agrarian University.

Yu.Ye. Kisel' - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of General Engineering Disciplines and Physics, Bryansk State Institute of Technology.

K.V. Muymarov – Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer of the UMax LLC Project.

P.Ye. Kisel' – Postgraduate Student of the Bryansk State Institute of Technology.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18.04.2026, одобрена после рецензирования 17.05.2026, принята к публикации 23.05.2026.

The article was submitted 18.04.2026, approved after reviewing 17.05.2026; accepted for publication 23.05.2026.

© Никитин А.М., Широбокова О.Е., Кисель Ю.Е., Муймаров К.В., Кисель П.Е.