

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.79.03:631.331

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>**Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника****М.Н. Ерохин<sup>1</sup>, А.Г. Пастухов<sup>2</sup>, Е.П. Тимашов<sup>3</sup>, С.П. Казанцев<sup>4</sup>, С.Ф. Вольвак<sup>5</sup>, М.И. Волков<sup>6</sup>**<sup>1,4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>2,3,5</sup> Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина; г. Белгород, Россия<sup>6</sup> ЗАО «Сокол-АТС»; г. Белгород, Россия<sup>1</sup> er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970><sup>2</sup> pastukhov\_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950><sup>3</sup> timachov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714><sup>4</sup> kasansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709><sup>5</sup> volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144><sup>6</sup> volkov.mikhail2017@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>

**Аннотация.** Работоспособный двухдисковый сошник, формируя плотное и равномерно заглубленное ложе для семян, обеспечивает хорошую всхожесть и урожайность зерновых культур. Значительный абразивный диаметральный износ дисков сошников при эксплуатации обуславливает необходимость их частого восстановления. Цель исследований – обосновать выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец на примере дисков сошников. Выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали проводили на основе их многокритериальной оценки. Методика основана на ранговом сравнении характеристик и параметров с последующим критериальным условием максимума или минимума показателей. Учитывали технико-экономический критерий (сварочный аппарат и вид сварки), технологический критерий (марку электрода), критерий, характеризующий сварной шов (диаметр электрода), и прочностной критерий (материал ремонтной детали). Окончательную оценку выполняли с использованием обобщенного интегрального критерия – минимального расстояния до цели, полученного в результате анализа оценочных графов многокритериальных моделей. Рассмотрели 4 типа сварочных аппаратов, 7 марок электродов диаметром 2,5; 3,0; 3,2; 4,0 мм, и в качестве материала ремонтной детали – 4 типа стали. На основании выполненных расчетов и обобщенного интегрального критерия минимального расстояния до цели выбрали следующие технические средства: сварочный аппарат марки Кедр ВД-500.01 ( $\mu_{1min} = 3,66$ ); электрод марки УОНИ-13/45 ( $\mu_{2min} = 4,19$ ); электрод диаметром 3,2 мм ( $\mu_{3min} = 3,87$ ); материал ремонтной детали – сталь 30MnB5 ( $\mu_{4min} = 4,00$ ). Выбранные основные технические средства на основе эвристического метода многокритериальной оценки 23 показателей по обобщенному интегральному критерию расстояния до цели рекомендуется применять при реализации технологического процесса восстановления дисков сошников путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец.

**Ключевые слова:** сошник сеялки; диск сошника; приварка; материал ремонтной детали; электрод; технические средства; критерий; ранг; оценочный радар

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

**Для цитирования:** Ерохин М.Н., Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Казанцев С.П., Вольвак С.Ф., Волков М.И. Критериальное обоснование выбора технических средств для способа приварки ремонтной детали к диску сошника // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 2. С. 56-66. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>

## ORIGINAL ARTICLE

## Criterion-based selection of technical means for welding a repair part to the coulter disk

M.N. Erokhin<sup>1</sup>, A.G. Pastukhov<sup>2</sup>, E.P. Timashov<sup>3</sup>, S.P. Kazantsev<sup>4</sup>, S.F. Volvak<sup>5</sup>, M.I. Volkov<sup>6</sup>

<sup>1,4</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>2,3,5</sup> Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Belgorod, Russia

<sup>6</sup> Sokol-ATS ZAO; Belgorod, Russia

<sup>1</sup> er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>

<sup>2</sup> pastukhov\_ag@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>

<sup>3</sup> timachov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>

<sup>4</sup> kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>

<sup>5</sup> volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>

<sup>6</sup> volkov.mikhail2017@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>

**Abstract.** A serviceable double-disc coulter, forming a dense and evenly embedded seedbed, ensures good germination and yield of grain crops. Significant abrasive diametral wear of the coulter discs during operation necessitates their frequent restoration. The study aimed to justify the selection of technical means for welding a repair part in the form of ring fragments, using coulter discs as an example. The selection of technical means for welding the repair part was based on a multi-criteria evaluation. The methodology employs a ranking comparison of characteristics and parameters, followed by a criterion-based condition of maximizing or minimizing indicators. The following criteria were considered: technical–economic criterion (the welding machine and welding type); technological criterion (the electrode grade); weld joint criterion (the electrode diameter); and strength criterion (the repair part material). The final evaluation was performed using a generalized integral criterion – the minimum distance to the goal – obtained through analysis of evaluation graphs of multi-criteria models. The authors examined four types of welding machines, seven electrode grades with diameters of 2.5, 3.0, 3.2, and 4.0 mm, and four steel types as the repair part material. Based on the calculations and the generalized integral criterion of minimum distance to the goal, the following technical means were selected: the welding machine Kedr VD-500.01 ( $\mu_1_{\min} = 3.66$ ); the electrode grade: UONI-13/45 ( $\mu_2_{\min} = 4.19$ ); the electrode diameter: 3.2 mm ( $\mu_3_{\min} = 3.87$ ); and the repair part material: 30MnB5 steel ( $\mu_4_{\min} = 4.00$ ). The selected primary technical means, based on a heuristic multi-criteria evaluation of 23 indicators using the generalized integral criterion of distance to the goal, are recommended for implementation in the technological process of restoring coulter discs by welding repair parts in the form of ring fragments.

**Keywords:** seeder coulter; coulter disc; welding; repair part material; electrode; technical means; criterion; rank; evaluation radar

**Acknowledgments.** The study was performed as part of the project aimed at establishing and developing the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 of June 16, 2025).

**For citation:** Erokhin M.N., Pastukhov A.G., Timashov E.P., Kazantsev S.P., Volvak S.F., Volkov M.I. Criterion-based selection of technical means for welding a repair part to the coulter disk. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(2):56-66 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-2-56-66>

### Введение

С целью научно-технологического обеспечения реализации задачи продовольственной безопасности Российской Федерации необходимо разрабатывать инновационные отечественные технологии обеспечения работоспособности сельскохозяйственной техники с целью повышения технического уровня – в частности, производственной ремонтной базы [1]. Анализ опыта ремонта сельскохозяйственной техники показывает, что при дефектации машин после

разборки пригодными к дальнейшей эксплуатации остаются примерно 45% деталей. При этом около 50% деталей подлежат восстановлению и порядка 5% их направляются на утилизацию [2]. Однако анализ диаметрального износа дисковых сошников сеялок СЗ-3,6 и СЗТ-3,6А показал, что по опытному распределению данных из 96 дисков 10% имеют износ 0...10 мм, 37,6% – 10,0...24,0 мм, а остальные 52,4% – свыше 24 мм; это свидетельствует о необходимости их выбраковки и утилизации [3].

При проектировании технологических процессов в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве для обоснования технологических процессов, выбора материалов и инструментов ранее применялись технический, технологический и технико-экономический критерии [5, 6].

Анализ источников в области многокритериальной инженерной оценки показывает, что применительно к автомобильному транспорту распространены критерии оценки техники и технологий по показателям экономической эффективности, качества и конкурентоспособности [7], трансформируемые в трехступенчатую оценочную модель по экономической эффективности грузовых автомобилей за период эксплуатации [8]. В машиностроении используют комплексный экономический критерий, учитывающий этапы производства и эксплуатации материалов деталей [9, 10]. С учетом весовой значимости характеристик автотракторной техники применяют методы многокритериальной оценки конкурентоспособности технических изделий с выходом на интегральный конечный критерий [11, 12].

Предлагаем выбор технических средств для технологического процесса восстановления дисков сошников проводить на основе многокритериальной оценки их характеристик и параметров.

**Цель исследований:** обосновать выбор технических средств для реализации приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец на примере дисков сошников.

### Материалы и методы

Для повторного использования изношенных дисков сошников предложены приспособление (RU1777811) и способ восстановления путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец<sup>1</sup> [2, 4].

Многокритериальная оценка учитывает выбор сварочного аппарата (вида сварки) по технико-экономическому критерию, марку электрода по технологическому критерию, диаметр электрода (режимы сварки) по критерию характеристик сварных швов и марку материала ремонтной детали по прочностному критерию.

Основу методики составляет ранговое сравнение характеристик и параметров с последующим критериальным условием максимума или минимума

<sup>1</sup> Бердышев В.Е., Валиев А.Р., Зиганшин Б.Г. и др. Сельскохозяйственные машины. Машины для посева. Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2022. 239 с. EDN: PEFTAU

показателей<sup>2</sup> [5, 6]. В процессе практической обработки многокритериальной оценки применен эвристический метод оценки технических и технологических решений на основе обобщенного интегрального критерия расстояния до цели [13].

Сущность обобщенного интегрального критерия расстояния до цели заключается в обосновании идеального варианта и в оценке меры приближения к нему каждого из альтернативных вариантов. Идеальный вариант характеризует такую систему, для которой каждый из критериев достигает идеализированного значения, обоснованного теоретически или практически.

В процедуре многокритериальной оценки выбора вариантов решения учтены следующие правила: 1) цели выражаются в критериальной форме, что является условием количественной оценки приближения вариантов к цели; 2) критерии являются взаимно независимыми, что обуславливает одноразовый учет существенных для достижения цели факторов и снижение числа критериев; 3) критерии сводятся к виду, при котором их улучшение происходит в одинаковом направлении (в сторону увеличения или уменьшения) [13].

Практическая реализация метода осуществляется в виде графической модели по следующим правилам: 1) шкалы критериев изображаются в виде лучей, выходящих из одного центра; 2) значения критериев сравниваемых вариантов откладываются на радиально размещенных шкалах таким образом, чтобы улучшение критерия происходило к центру; 3) при соединении точек на шкалах для  $j$ -го варианта образуется замкнутая фигура в виде многоугольника; 4) по идеальным значениям критериев строится многоугольник идеализированного варианта; 5) лучшим считается вариант, для которого площадь построенного многоугольника наиболее близка к площади идеализированного варианта.

Для придания количественной оценки выполнена ранговая оценка показателей при условии, что минимальный ранг присваивается наиболее благоприятному значению соответствующего параметра, а максимальный – неблагоприятному значению. Окончательная оценка выполнена по обобщенному критерию расстояния до цели ( $\mu_j$ ), определяемого в виде отношения площади каждого рассматриваемого

<sup>2</sup> Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. и др. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования: Учебное пособие для учебных заведений, реализующих программу среднего профессионального образования по специальности 35.02.07 «Механизация сельского хозяйства». М.: Инфра-М, 2020. 346 с. EDN: RIFSAT

мого варианта ( $S_{Pi}$ ) к площади идеализированного варианта ( $S_{Po}$ ):

$$S_{Pi} = \sin\left(\frac{360^\circ}{n}\right) \cdot \frac{1}{2} (A_1A_2 + A_2A_3 + \dots + A_nA_1), \mu_i = \frac{S_{Pi}}{S_{Po}}$$

где  $n$  – число осей радара (оценочные показатели);  $A_1 \dots A_n$  – координаты показателей на соответствующих осях (ранги).

Меньшее значение обобщенного критерия расстояния до цели определяет лучшее, оптимальное решение, ближе всего подходящее к идеальному решению [13].

### Результаты и их обсуждение

Обоснование выбора технических средств для реализации способа восстановления дисков сошников путем приварки фрагментов колец на основе многокритериальной оценки и выбора решения по минимальному расстоянию до цели рассмотрим с учетом выделения в исследуемом технологическом процессе 4 этапов: 1 – выбор сварочного аппарата (вида сварки); 2 – выбор марки электрода; 3 – выбор диаметра электрода (режима сварки); 4 – выбор материала ремонтной детали.

При выборе сварочного аппарата рассмотрим наиболее распространенные варианты: 1 – ручная электродуговая сварка, Кедр ВД-500.01<sup>3</sup>; 2 – полуавтоматическая сварка, ПТК Rilon ARC250 С<sup>4</sup>; 3 – аргодуговая сварка «Аврора», система 200 АС/DC Пульс<sup>5</sup>;

4 – контактная точечная сварка, NordBerg Automotive WS6<sup>6</sup>. На основе паспортных данных сварочных аппаратов (табл. 1) проведено сравнение их показателей: 1) габаритные размеры и масса сварочного аппарата для определенного вида сварки при критериальном условии стремления к минимуму; 2) мощность сварочного аппарата, определяющая способность сваривать различные металлы и сложные соединения, при критериальном условии стремления к максимуму; 3) напряжение электрического тока, влияющее на легкость зажигания сварочной дуги, при критериальном условии стремления к максимуму; 4) диапазон регулировки сварочного тока, обуславливающий возможность процесса сварки, при критериальном условии стремления к максимуму; 5) коэффициент полезного действия (КПД), характеризующий эффективность сварочной системы в отношении преобразования и передачи энергии, при критериальном условии стремления к максимуму; 6) стоимость сварочного аппарата, определяющая исходные капиталовложения, при критериальном условии стремления к минимуму.

На основании данных таблицы 1 выполнена графическая иллюстрация рангов для рассматриваемых сварочных аппаратов в виде оценочного радара (рис. 1). По сумме рангов наиболее предпочтительным является вариант 1 – ручная электродуговая сварка, Кедр ВД-500.01 (табл. 1, рис. 1).

Технико-экономические характеристики сварочных аппаратов

Таблица 1

Technical and economic characteristics of welding machines

Table 1

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Показатель 6		Сумма рангов
	Размеры / масса, мм/кг	Ранг	Мощность, кВА	Ранг	Напряжение, В	Ранг	Регулирование по току, А	Ранг	КПД, %	Ранг	Стоимость, тыс. руб.	Ранг	
1	550×260×430 / 28,6	3	22,5	1	90	1	20...500	1	85	1	81,4	4	11
2	560×300×435 / 14,5	2	10,7	4	65	2	30...250	3	80	2	35,5	1	14
3	470×210×380 / 13,3	1	20,0	2	68	3	30...200	4	80	2	54,3	2	14
4	700×960×460 / 70,0	4	19,0	3	13	4	50...5000	2	–	3	54,7	3	19

<sup>3</sup> Аппарат инверторный КЕДР ВД-500.01. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.ligasvarki.ru/catalog/svarochnoe\\_oborudovanie/svarochnye\\_apparaty\\_1/ruchnay\\_dugovaya\\_svarka\\_invertornyy\\_ked\\_vd\\_500\\_01\\_pro/](https://www.ligasvarki.ru/catalog/svarochnoe_oborudovanie/svarochnye_apparaty_1/ruchnay_dugovaya_svarka_invertornyy_ked_vd_500_01_pro/) (дата обращения: 30.01.2026).

<sup>4</sup> ПТК RILON ARC250 С. [Электронный ресурс]. URL: <https://ptk-svarka.ru/product/ptk-rilon-arc-250-c> (дата обращения: 07.11.2025).

<sup>5</sup> Аппарат аргодуговой сварки аврора система 200 АС/DC ПУЛЬС (2 ПОКОЛЕНИЕ). [Электронный ресурс]. URL: <https://evrotek.spb.ru/catalog/product/68941/> (дата обращения: 07.11.2025).

<sup>6</sup> Аппарат точечной сварки NORDBERG WS6 (380 В). [Электронный ресурс]. URL: <https://centr-to.ru/good-170-apparat-tochechnoy-svarki-nordberg-ws6-220-v-380-v> (дата обращения: 07.11.2025).

Для выбора марки электрода рассмотрели применяемые на производстве варианты: 1 – УОНИ-13/45; 2 – АНО-4 (Э46); 3 – МР-3 (Э46); 4 – ОЗС-4 (Э46); 5 – МК-46.00 (Э50А); 6 – ЦУ-5 (Э50А); 7 – ОК-46.00. Сравнение провели по технологическому критерию (табл. 2), анализируя следующие показатели<sup>7-8</sup>: 1) покрытие электродов, определяющее качество сварного шва, – основное, рутиловое, рутилово-карбонатное, рутилово-целлюлозное и др. покрытия (для сварки углеродистых сталей предпочтительным является основное покрытие); 2) коэффициент наплавки, характеризующий количество расплавленного металла, переходящего в сварной шов (критериальное условие – стремление к максимуму); 3) количество электродов на 1 кг наплавленного металла, характеризующее расход электродов в процессе (критериальное условие – стремление к минимуму); 4) производительность сварки, обусловленная различными параметрами сварочных аппаратов (критериальное условие – стремление к максимуму); 5) предел прочности при разрыве, характеризующий максимальное напряжение, которое может выдержать

наплавляемый материал (критериальное условие – стремление к максимуму).

Графическая иллюстрация рангов для рассматриваемых марок электродов (табл. 2) в виде оценочного радаров представлена на рисунке 2. Анализ данных (табл. 2, рис. 2) показывает, что наиболее предпочтительным в технологическом процессе приварки ремонтной детали является электрод марки УОНИ-13/45 (вариант 1).

При выборе диаметра электрода и соответствующих режимов приварки рассмотрели 4 варианта, в которых диаметры электродов наиболее близки к толщине свариваемых деталей 3 мм: 1 – 2,5 мм; 2 – 3,0 мм; 3 – 3,2 мм; 4 – 4,0 мм.

Сравнение осуществляли по критерию характеристик сварных швов на основании анализа технических данных<sup>9,10</sup> (табл. 3): 1) толщины металла фрагментов кольца, обусловленной толщиной диска 3 мм (принимается в диапазоне 2...6 мм, критериальное условие – приближение к толщине диска); 2) силы тока согласно рекомендуемой для толщины металла 3 мм – 65...100 А (критериальное

Таблица 2

Технологические характеристики сварочных электродов

Table 2

Process characteristics of welding electrodes

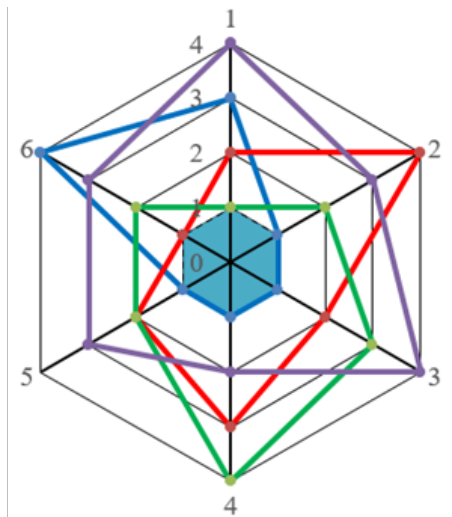
Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Сумма рангов
	Покрытие	Ранг	Коэффициент наплавки, г/Ач	Ранг	Расход электродов, ед.	Ранг	Производительность, кг/ч	Ранг	Предел прочности, МПа	Ранг	
1	Основное	1	9,5	1	1,6	1	1,3	3	460	4	10
2	Рутилово-карбонатное	2	8,3	3	1,7	2	1,4	2	450	5	14
3	Рутиловое	4	8,5	2	1,7	2	1,7	1	500	2	11
4	Рутиловое	4	8,5	2	1,6	1	1,4	2	490	3	12
5	Рутиловое	4	8,0	4	1,6	1	0,9	4	460	4	17
6	Основное	1	9,5	1	1,7	2	0,9	4	490	3	11
7	Рутилово-целлюлозное	3	8,5	2	1,7	2	0,9	4	510	1	12

<sup>7</sup>ГОСТ 10052-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами. Типы: Введ. 1977-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004. 10 с.

<sup>8</sup> СпецЭлектрод – лучший в 2023 году. Каталог сварочных электродов. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spetselectrode.ru/catalog.html?ysclid=mm48t6089528802234>. Загл. с экрана (дата обращения: 05.11.2025).

<sup>9</sup>ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: Введ. 1977-01-01. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2007. 39 с.

<sup>10</sup>ГОСТ Р ИСО 2553-2017. Сварка и родственные процессы. Условные обозначения на чертежах. Сварные соединения: Введ. 2017-10-01. М.: Госстандарт России: «Стандартинформ», 2017. 49 с.



**Рис. 1. Оценочный радар по выбору сварочного аппарата:**

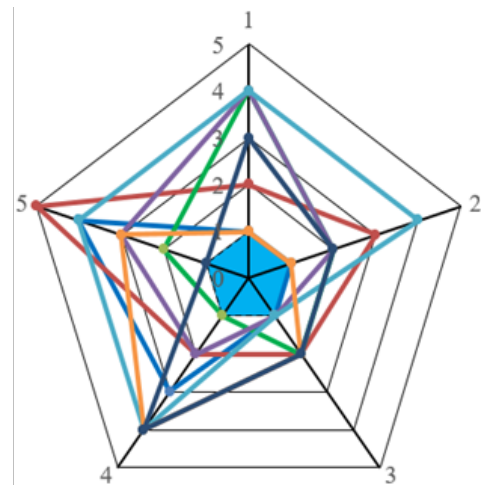
Оси 1, 2, 3, 4, 5, 6 – показатели из таблицы 1;  
 Идеал; вариант 1; вариант 2; вариант 3; вариант 4

**Fig. 1. Evaluation radar of welding machine selection:**

Axes 1, 2, 3, 4, 5, 6 – indicator from Table 1;  
 Ideal, option 1, option 2, option 3, option 4

условие – минимальная разность со средним значением 82,5 А); 3) расположения сварного шва при сварке деталей толщиной 3 мм, которое может быть двусторонним, односторонним и односторонним на съемной подкладке (критериальное условие – минимальная сложность процесса сварки в приспособлении); 4) протяженности сварного шва – сплошного или прерывистого (точечного, в шахматном порядке, цепного), определяемой условиями работы диска в абразивной среде и обеспечением запаса прочности (критериальное условие – стремление к максимальной прочности шва); 5) количества электродов, ед., отнесенных к массе, кг, наплавленного металла (критериальное условие – стремление к минимуму); 6) массы, кг, наплавленного металла, отнесенной к массе, кг, расходуемых электродов (критериальное условие – стремление к максимуму); 7) длины электрода, связанной с изменением времени сварки и его затратами на смену электрода (критериальное условие – стремление к максимуму).

На основании данных таблицы 3 выполнили графическую иллюстрацию рангов для показателей характеристик сварных швов в виде оценочного радара (рис. 3). Анализ данных таблицы 3 и рисунка 3 свидетельствует о том, что для приварки ремонтной детали к диску по сумме рангов в равной степени оптимальными являются варианты 3 и 4 (электроды диаметром 3,2 и 4,0 мм). При этом следует



**Рис. 2. Оценочный радар по выбору марки электрода:**

Оси 1, 2, 3, 4, 5 – показатели из таблицы 2;  
 Идеал; вариант 1; вариант 2; вариант 3; вариант 4; вариант 5; вариант 6; вариант 7

**Fig. 2. Evaluation radar of electrode grade selection:**

Axes 1, 2, 3, 4, 5 – indicator from Table 2;  
 Ideal, option 1, option 2, option 3, option 4, option 5, option 6, option 7

учитывать технологические особенности формирования сварных швов.

Для выбора марки материала ремонтной детали рассмотрели варианты марок сталей, применяемых для изготовления дисков сошников: 1 – 65Г ГОСТ 14959-2016; 2 – 30MnB5 EN-10083-3; 3 – 45 ГОСТ 1050-2013; 4 – 60C2A ГОСТ 14959-2016. Сравнение осуществляли по критерию прочности на основании анализа физико-механических характеристик сталей (табл. 4) [14]: 1) назначения, определяющего выбор марки стали с указанием в технических требованиях конструкторской документации (критериальное условие – стремление к максимуму механических свойств) [15, 16]; 2) твердости, определяющей износостойкость материала с учетом режима работы дисков в абразивном материале (критериальное условие – стремление к максимуму) [17, 18]; 3) предела прочности при разрыве, обеспечивающей общую прочность диска (критериальное условие – стремление к максимуму) [16, 19]; 4) относительного удлинения, по которому дается оценка способности материала испытывать остаточную деформацию при механической нагрузке – вплоть до разрушения (критериальное условие – стремление к минимуму) [16, 19]; 5) стоимости, определяющей доступность и распространенность материала, расходы на производство (критериальное условие – стремление к минимуму) [14, 18, 20]. На основании данных таблицы 4 представлена графическая иллюстрация рангов для

выбора марки материала ремонтной детали в виде оценочного радара (рис. 4).

Анализ данных (табл. 4, рис. 4) показывает, что по сумме рангов в качестве ремонтной детали в равной степени применимы 3 варианта: 1, 2 и 4 (сталь 65Г, 30MnB5 и 60C2A). Следует учесть,

что в отечественном производстве дисков сошников наиболее применима сталь 65Г, в зарубежном – сталь 30MnB5, а сталь 60C2A выступает в качестве аналога для замены. Поэтому при выборе материала на производстве следует учитывать наличие материала на складе или имеющихся остатков деловых отходов.

Таблица 3

Характеристики сварных швов

Table 3

Characteristics of welds

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Показатель 6		Показатель 7		Сумма рангов
	Толщина металла, мм	Ранг	Сила тока, А	Ранг	Расположение шва	Ранг	Протяженность шва	Ранг	Количество, ед/кг	Ранг	Наплавленный металл, кг/кг	Ранг	Длина электрода, мм	Ранг	
1	2,0...3,0 / 2,5	3	60...100 / 80	1	Двухсторонний	3	Точечный	4	88	4	0,90	4	350	2	21
2	3,0...4,0 / 3,5	1	80...160 / 120	2	Двухсторонний	3	Шахматный порядок	3	62	3	1,15	3	350	2	17
3	3,0...3,2 / 3,1	2	90...170 / 130	3	Односторонний	1	Цепной	2	57	2	1,20	2	350	2	14
4	4,0...6,0 / 5,0	4	120...200 / 160	4	Односторонний на съемной накладке	2	Сплошной	1	31	1	2,00	1	450	1	14

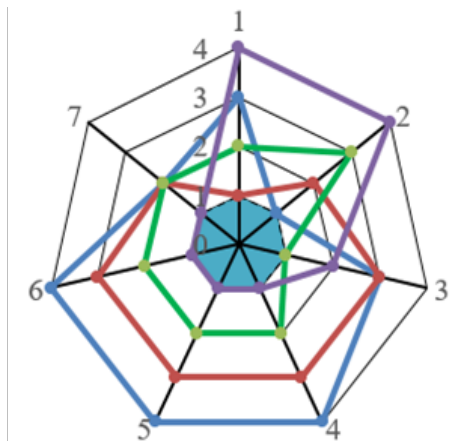
Таблица 4

Характеристики материала ремонтной детали

Table 4

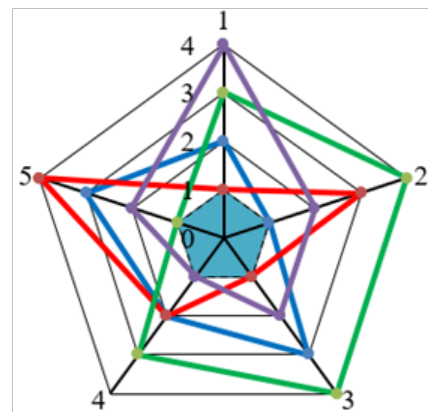
Characteristics of repair part material

Вариант	Показатель 1		Показатель 2		Показатель 3		Показатель 4		Показатель 5		Сумма рангов
	Назначение	Ранг	Твердость, НВ	Ранг	Предел прочности, МПа	Ранг	Остаточное удлинение, %	Ранг	Стоимость, тыс. руб/т	Ранг	
1	Детали с требованием повышенной износостойкости, работающие без ударных нагрузок	2	285	1	740	3	12	2	94,1	3	11
2	Детали, обладающие хорошей износостойкостью и устойчивостью к динамическим воздействиям	1	240	3	1050	1	12	2	95,2	4	11
3	Детали, работающие на трение, от которых требуется повышенная прочность	3	229	4	675	4	15	3	68,2	1	15
4	Ответственные детали, подверженные высоким нагрузкам	4	269	2	980	2	8	1	77,5	2	11



**Рис. 3. Оценочный радар по выбору диаметра электрода:**  
Оси 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – показатели из таблицы 3;  
— Идеал; — вариант 1; — вариант 2;  
— вариант 3; — вариант 4

**Fig. 3. Graphical interpretation by electrode diameter selection:**  
Axes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – indicator from Table 3;  
— Ideal, — option 1, — option 2,  
— option 3, — option 4



**Рис. 4. Оценочный радар по выбору материала ремонтной детали:**  
Оси 1, 2, 3, 4, 5 – показатели из таблицы 4;  
— Идеал; — вариант 1; — вариант 2;  
— вариант 3; — вариант 4

**Fig. 4. Evaluation radar of repair part material selection:**  
Axes 1, 2, 3, 4, 5 – indicator from Table 4;  
— Ideal, — option 1, — option 2,  
— option 3, — option 4

Обобщенная многокритериальная оценка технических средств для приварки

Таблица 5

Summary multi-criteria evaluation of welding tools

Table 5

Сварочный аппарат			Марка электрода			Диаметр электрода			Материал детали		
Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_1$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_2$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_3$	Вариант	Площадь, кв. ед.	$\mu_4$
1	9,52	3,66	1	9,98	4,19	1	25,0	9,12	1	10,9	4,58
			2	17,1	7,18						
2	13,9	5,35	3	11,4	4,79	2	16,8	6,13	2	9,51	4,00
			4	14,3	6,01						
3	14,7	5,65	5	26,6	11,2	3	10,6	3,87	3	21,9	9,24
			6	12,4	5,21						
4	25,5	9,81	7	11,9	5,00	4	12,9	4,7	4	11,4	4,79
Идеал	2,60	–	Идеал	2,38	–	Идеал	2,74	–	Идеал	2,38	–

С целью окончательного решения при выборе сварочного аппарата, марки электрода, диаметра электрода и материала ремонтной детали проведем многокритериальную оценку на основе обобщенного интегрального критерия расстояния до цели  $\mu$ . Для этого сведем результаты определения площадей фигур и обобщенного интегрального критерия  $\mu$ , характеризующих рассматриваемые и идеальный варианты (рис. 1-4). Результаты представлены в таблице 5.

На основании анализа данных обобщенной многокритериальной оценки (табл. 5) по выбору

технических средств для приварки ремонтной детали к диску сошника по обобщенному интегральному критерию минимального расстояния до цели отмечаем следующие результаты: 1) среди рассматриваемых сварочных аппаратов наиболее предпочтительным является аппарат ручной электродуговой сварки Кедр ВД-500.01 ( $\mu_{1min} = 3,66$ ); 2) из применяемых при приварке деталей марок электродов выбираем УОНИ-45/13 ( $\mu_{2min} = 4,19$ ); 3) среди диаметров электродов 2,5...4,0 мм предпочтительным является диаметр 3,2 мм ( $\mu_{3min} = 3,87$ ); 4) среди рассматриваемых

материалов для ремонтной детали выбираем сталь 30MnB5 ( $\mu_{4\min} = 4,00$ ).

Таким образом, при обработке технологического процесса приварки ремонтной детали к дискам сошников следует использовать выбранные технические средства.

### Выводы

1. При значительном износе дисков сошников рекомендуется их восстанавливать приваркой ремонтной детали в виде фрагментов колец, что обеспечивает возврат качественного металла из утилизации и повторное использование дисков.

2. Выбор технических средств для технологического процесса восстановления детали обоснован многокритериальной оценкой по обобщенному интегральному критерию. По технико-экономическому критерию принят сварочный

аппарат марки Кедр ВД-500.01. По технологическому критерию принят электрод марки УОНИ-13/45. По критерию характеристик сварных швов принят электрод диаметром 3,2 мм. По прочностному критерию принят материал ремонтной детали сталь 30MnB5.

3. Принятие решения о выборе технических средств основано на анализе оценочных графов и значения обобщенного критерия минимального расстояния до цели: для сварочного аппарата  $\mu_{1\min} = 3,66$ ; для марки электрода  $\mu_{2\min} = 4,19$ ; для диаметра электрода  $\mu_{3\min} = 3,87$ ; для материала ремонтной детали  $\mu_{4\min} = 4,00$ .

4. Выбранные технические средства рекомендуется вносить в маршрутно-операционные карты технологического процесса восстановления дисков сошников путем приварки ремонтной детали в виде фрагментов колец.

### Список источников

1. Черноиванов В.И. История развития ремонтной базы сельскохозяйственной техники в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 1. С. 4-12. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-4-12>
2. Лялякин В.П. Развитие индустрии по восстановлению деталей для сельскохозяйственных машин в России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18, № 2. С. 4-10. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10>
3. Пастухов А.Г., Кравченко И.Н., Волков М.И. Исследование износа дисковых сошников сеялки СЗТ-3,6А // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2019. № 3 (23). С. 55-68. EDN: PTHQTC
4. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17, № 1. С. 41-50. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Пастухов А.Г., Бережная И.Ш. Методика и результаты критериальной оценки инструмента электроискрового наращивания // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2019. № 2 (22). С. 67-78. EDN: WFELLN
6. Пастухов А.Г., Бережная И.Ш., Слободюк А.П. Выбор коррозионно-стойкой стали для изготовления литого патрубка выхлопной системы // *Инновации в АПК: проблемы и перспективы*. 2022. № 2 (34). С. 66-73. EDN: JODVJM
7. Фасхиев Х.А. Метод оценки грузового автомобиля по критериям экономической эффективности, качества и конкурентоспособности с целью выбора // *Автотранспорт: эксплуатация, обслуживание и ремонт*. 2025. № 7. С. 7. EDN: SDXYU
8. Баязитов Р.Б., Фасхиев Х.А. Многокритериальная оценка подвижного состава автомобильного транспорта с целью выбора // *Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, г. Ижевск, 29-30 апреля 2021 г. Ижевск: Издательство УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2021. С. 42-47. EDN: AUCYVB*
9. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Комплексная система оценки эффективности производства и потребления продукции машиностроения // *Вестник Пермского национального*

### References

1. Chernoiivanov V.I. The history of agricultural machinery repair system in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(1):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-4-12>
2. Lyalyakin V.P. Evolution of agricultural machinery parts restoration industry in Russia. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(2):4-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-4-10>
3. Pastukhov A.G., Kravchenko I.N., Volkov M.I. Study of wear of disc coulters SZT-3.6A. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2019;3(23):55-68. (In Russ.)
4. 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.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50>
5. Pastukhov A.G., Berezhnaya I.Sh. Technique and results of criteria estimation of the electro-spiritual development tool. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2019;2(22):67-78. (In Russ.)
6. Pastukhov A.G., Berezhnaya I.Sh., Slobodyuk A.P. The choice of corrosion-resistant steel for the manufacture of cast exhaust pipe. *Innovations in the Agricultural Complex: Problems and Perspectives*. 2022;2(34):66-73. (In Russ.)
7. Faskhiev Kh.A. Method of evaluating a truck according to criteria of economic efficiency, quality and competitiveness in order to choose it. *Avtotransport: ekspluatatsiya, obsluzhivanie i remont*. 2025;7. (In Russ.)
8. Bayazitov R.B., Faskhiev Kh.A. Multi-criteria assessment of the rolling stock of road transport for the purpose of its selection. *Avtomobilestroyeniye: proyektirovaniye, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, Izhevsk, April 29-30, 2021. Izhevsk: Publishing house UIR IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. 2021;42-47. (In Russ.)*
9. Vaytsekhovich S.M., Vlasov Yu.V. Comprehensive assessment of production efficiency and product consumption in machine building industry. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*.

исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2020. № 2. С. 146-167. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.12>

10. Вайцехович С.М., Власов Ю.В. Построение модели экономической эффективности производства и потребления конструкционных материалов в машиностроении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2020. № 2. С. 168-194. <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.13>. EDN: RACEPO

11. Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е. Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21, № 3. С. 170-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>

12. Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Макаров В.С. и др. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1 (136). С. 125-136. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_1\\_125](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_125). EDN: WYVBCW

13. Вольбак С.Ф., Шаповалов В.И., Пастухов А.Г. и др. Теория и практика многокритериальной оценки и выбора решений по методу расстояния до цели: Монография / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ. Белгород: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2025. 184 с. EDN: VNABBP

14. Щербаков А.П., Пушкарев А.Е., Максимов С.Е. Замена материала рабочего органа как путь повышения надежности дорожно-строительных машин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2021. Т. 18, № 6 (82). С. 646-661. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

15. Михальченков А.М., Ульянова Н.Д., Феськов С.А., Гущан А.А. Механические свойства термоупрочненной стали 65Г, поверхностно-армированной наплавкой твердым сплавом // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 63-68. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-63-68>

16. Соболевский И.В., Турин Е.Н., Калафатов И.И. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом почвенных условий Республики Крым // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14, № 3 (70). С. 42-50. EDN: TXSLEX

17. Колосовский А.М., Рожков А.С., Ожегов Н.М., Черкасов В.Е. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 43-51. EDN: JSFDIG

18. Агеева Е.В., Серебровский В.В., Семькин В.А., Кончин В.А. Оценка износостойкости плазменных покрытий лап культиваторов // Технический сервис машин. 2023. Т. 61, № 4 (153). С. 83-89. EDN: VADWMJ

19. Михальченков А.М., Феськов С.А., Козарез И.В., Слезко Е.И. Изменение микроструктуры и микротвердости стали 65Г после термоупрочнения и наплавки малоуглеродистым электродом // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 107-114. EDN: TTZBVJ

20. Кретинин В.И., Теппоев А.В., Соколова В.А. Особенности моделирования технологического процесса упрочнения деталей лесохозяйственных машин методом газотермического напыления // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 1 (53). С. 142-148. EDN: NAAWMC

*Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*. 2020;2:146-167. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.12>

10. Vaytsekhovich S.M., Vlasov Yu.V. A model of economic efficiency of structural materials production and consumption in machine building industry. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Sotsialno-ekonomicheskiye nauki*. 2020;2:168-194. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9354/2020.2.13>

11. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Overview of approaches to assessing the quality and mobility of automotive vehicles and tractors based on multi-criteria quality assessment methods. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2023;21;3:170-179. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>

12. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S. et al. Comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive equipment, taking into account the weight significance of characteristics. *Trudy NGTU imeni R.E. Alekseeva*. 2022;1(136):125-136. (In Russ.) [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2022\\_1\\_125](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2022_1_125)

13. Volvak S.F., Shapovalov V.I., Pastukhov A.G. et al. Theory and practice of multi-criteria evaluation and decision selection using the distance-to-target method: Monograph. Ministry of Agriculture of the Russian Federation; Belgorod State Agricultural University. Belgorod: Belgorod State Agricultural University, 2025. 184 p.

14. Scherbakov A.P., Pushkarev A.E., Maksimov S.E. Replacement working body material as a way to increase reliability of road construction machines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(6):646-661. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-6-646-661>

15. Mikhailchenkov A.M., Ulyanova N.D., Feskov S.A., Gutsan A.A. Mechanical properties of heat-strengthened steel 65G, surface-reinforced hard alloy surfacing. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;3:63-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-3-63-68>

16. Sobolevskiy I.V., Turin E.N., Kalafatov I.I. Resource increasing of the working bodies of tillage machinery with consideration to the soil conditions of the Republic of Crimea. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14;(3):42-50. (In Russ.)

17. Kolosovskii A.M., Rozhkov A.S., Ozhegov N.M., Cherkasov V.E. The hardening of agricultural machines working bodies. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2023;6:43-51. (In Russ.)

18. Ageeva E.V., Serebrovsky V.V., Semykin V.A., Konchin V.A. Evaluation of wear resistance of plasma coatings of cultivators' paws. *Machinery Technical Service*. 2023;61(4):83-89. (In Russ.)

19. Mikhal'chenkov A.M., Fes'kov S.A., Kozarez I.V., Slezko E.I. Changes in the microstructure and microhardness of 65g steel after thermal hardening and surfacing with a low-carbon electrode. *Machinery Technical Service*. 2021;1:107-114. (In Russ.)

20. Kretinin V.I., Teppoev A.V., Sokolova V.A. Peculiarities of modeling the technological process of hardening the details of forestry machines by gas-thermal spraying method. *Systems. Methods. Technologies*. 2022;1:142-148. (In Russ.)

**Информация об авторах**

- <sup>1</sup> **Ерохин Михаил Никитьевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; er.mihn@mail.ru; SPIN-код: 3499-4405, <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>
- <sup>2</sup> **Пастухов Александр Геннадиевич**, д-р техн. наук, профессор; pastukhov\_ag@mail.ru<sup>✉</sup>; SPIN-код: 3891-3927; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>
- <sup>3</sup> **Тимашов Евгений Петрович**, д-р техн. наук, доцент; timachov@mail.ru; SPIN-код: 8763-5343; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>
- <sup>4</sup> **Казанцев Сергей Павлович**, д-р техн. наук, профессор; kazansev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4175-7998; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>
- <sup>5</sup> **Вольвак Сергей Федорович**, канд. техн. наук, профессор; volvak.s@yandex.ru; SPIN-код: 7701-7068; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>
- <sup>6</sup> **Волков Михаил Иванович**, инженер-конструктор; volkov.mikhail2017@yandex.ru; SPIN-код: 6573-0950; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>
- <sup>1,4</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Россия, 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49
- <sup>2,3,5</sup> Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина; 308503, Россия, Белгородская обл., Белгородский р-н, п. Майский, ул. Вавилова, 1
- <sup>6</sup> ЗАО «Сокол-АТС»; 308023, Россия, г. Белгород, Богдана Хмельницкого просп., 137

**Вклад авторов**

М.Н. Ерохин – общее руководство исследованиями;  
 А.Г. Пастухов – концептуализация и методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;  
 Е.П. Тимашов – обзор технических средств, создание и редактирование рабочей рукописи;  
 С.П. Казанцев – обзор источников литературы и администрирование данных;  
 С.Ф. Вольвак – методология и проведение исследований, формирование рабочей рукописи;  
 М.И. Волков – проведение исследований.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 04.02.2026, после рецензирования и доработки 05.03.2026, принята к публикации 26.03.2026

**Author Information**

- Mikhail N. Erokhin**<sup>1</sup>, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; er.mihn@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6573-0950>
- Alexander G. Pastukhov**<sup>2✉</sup>, DSc (Eng), Professor; pastukhov\_ag@mail.ru<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0001-8249-8970>
- Evgeny P. Timashov**<sup>3</sup>, DSc (Eng), Associate Professor; timachov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0740-8714>
- Sergey P. Kazantsev**<sup>4</sup>, DSc (Eng), Professor; kazansev@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7158-1709>
- Sergey F. Volvak**<sup>5</sup>, CSc (Eng), Professor; volvak.s@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6955-7144>
- Mikhail I. Volkov**<sup>6</sup>, design engineer; volkov.mikhail2017@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-0267-5224>
- <sup>1,4</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow 127434, Russian Federation
- <sup>2,3,5</sup> Belgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin; 1 Vavilova Str., Maysky, Belgorod Region, 308503, Russian Federation
- <sup>6</sup> Sokol-ATS ZAO; 137 B. Khmel'nitskogo Str., Belgorod, 308023, Russian Federation

**Author Contributions**

M.N. Erokhin – research supervision;  
 A.G. Pastukhov – conceptualization; methodology; writing – review and editing of the manuscript;  
 E.P. Timashov – resources; writing – original draft, review and editing of the manuscript;  
 S.P. Kazantsev – literature review; data curation;  
 S.F. Volvak – methodology; investigation; writing – original draft;  
 M.I. Volkov – investigation.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 04.02.2026; Revised 05.03.2026; Accepted 26.03.2026