

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В АПК.....	5
Маринченко Т.Е., Валеева А.И. Основы устойчивого развития АПК Российской Федерации.....	5
Войтюк В.А. Концепция единой цифровой платформы органического производства для малых форм хозяйствования	20
Даус Ю.В., Рудь Е.Е., Харченко С.Н. Определение экономически выгодной мощности фотоэлектрической энергоустановки для электроснабжения объекта АПК.....	34
Соловьев В.В., Евтюков С.А. Подсистема связи как техническая основа автоматизированной системы управления наземным транспортно-технологическим средством	46
Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Повышение устойчивости системы электрооборудования мобильного агротехнического робота методом компенсации параметрических возмущений.....	58
Сайфуллин Р.Н., Миннихметов И. С. Разработка композитной порошковой проволоки для электроконтактного восстановления изношенных валов сельскохозяйственной техники.....	70
РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ.....	87
Федоренко В.Ф. Ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенного рециклинга в растениеводстве побочных продуктов животноводства	87
Искандаров И. А., Сафаров Т. М. Повышение эффективности посева семян лука малогабаритным агрегатом.....	110
Терёхин М.А. Анализ конструктивных особенностей прикатывающих катков дисковых борон.....	129
РАЗДЕЛ 3. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ	145
Брюханов А.Ю., Романов А.С., Белов П.В. Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов.....	145

CONTENTS

SECTION 1. ECOLOGY, ENERGY EFFICIENCY, AND AUTOMATION IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX.....	5
---	---

Marinchenko T.E., Valeeva A.I. Basis for sustainable development of agriculture sector in Russia.....	5
Voityuk V.A. Concept of a unified digital organic production platform for small farms	20
Daus Yu.V., Rud E.E., Kharchenko S.N. Determining the least economically viable capacity of a photovoltaic power plant for supplying an agro-industrial complex facility.	34
Solov'ev V.V., Evtyukov S.A. Communication subsystem as a technical basis of an automated control system for land transport and technological vehicles.....	46
Uglovskiy A. S., Semerenko N. Yu. Increasing the stability of the electrical equipment system of a mobile agricultural robot by compensation of parametric disturbances.	58
Saifullin R. N., Minniakhmetov I. S. Development of composite flux-cored wire for electric contact restoration of worn shafts of agricultural machinery.	70

SECTION 2. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN CROP GROWING.....	87
--	----

Fedorenko V.F. Resource-energy-efficient technology and a nature-like technical system for subsoil recycling of animal by-products in crop production.....	87
Iskandarov I. A., Safarov T. M. Increasing the seeding efficiency of onion seeds with a small-sized unit.	110
Terekhin M.A. Analysis of the design features of disc harrow rollers.	129

SECTION 3. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN LIVESTOCK FARMING.....	145
---	-----

Briukhanov A. Yu., Romanov A.S., Belov P.V. Theoretical substantiation of the design and technological parameters of an organic waste mixer.....	145
---	-----

ОСНОВЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АПК РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Татьяна Евгеньевна Маринченко^{1✉}, Алия Ильдаровна Валеева²

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ Росинформагротех), р. п. Правдинский, Московская область, Россия

¹9419428@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3721-112X>

²valeeva.aliia@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8915-1325>

Аннотация. Исследование направлено на комплексный анализ правовых основ устойчивого развития агропромышленного комплекса (АПК) России в условиях наложения трёх взаимосвязанных кризисов – климатического, экономического и социального. Актуальность работы обусловлена необходимостью преодоления системных дисбалансов в правовом регулировании, которые препятствуют интеграции принципов устойчивого развития в аграрную политику России. Методологическую основу исследования составили системный анализ, сравнительно-правовой метод, формально-юридический анализ и метод правового моделирования, что позволило обеспечить комплексный характер изучения проблемы. Материалами исследования послужили нормативные правовые акты федерального уровня, стратегические и программные документы. В ходе исследования доказано, что исчерпание экстенсивной экономической модели, основанной на наращивании ресурсных затрат, усугубляется сохранением в ключевых нормативных актах фокуса на валовых показателях в ущерб критериям ресурсоэффективности. Основным научным результатом работы является идентификация и классификация системных дисбалансов, структурно препятствующих интеграции компонентов устойчивости. К ним относятся: дисбаланс целей – противоречие между ориентацией Доктрины продовольственной безопасности на валовое производство и экологическими приоритетами «зелёных» стратегий; правовой пробел – отсутствие в законодательстве механизмов, увязывающих предоставление государственной поддержки с достижением конкретных экологических и социальных результатов; институциональный пробел – ведомственная разобщённость и отсутствие сквозных финансово-экономических механизмов. Подтверждена гипотеза исследования о том, что ключевым барьером является не отсутствие стратегического целеполагания, а системные дисбалансы в отраслевом законодательстве. На основе проведённого анализа сформулированы предложения, направленные на преодоление выявленных дисбалансов через внедрение системы «зелёных» стимулов, основанных на принципе «поддержка за результат». Предложены конкретные законодательные инициативы, включающие введение повышающих коэффициентов к субсидиям для хозяйств, внедряющих агроэкологические практики, и развитие законодательства о парниковых газах через введение понятия «углеродная единица сельскохозяйственного происхождения». Практическая значимость исследования заключается в том, что его результаты и выводы могут быть использованы при совершенствовании аграрного и экологического законодательства, а также при разработке ведомственных

нормативных актов. Переход АПК к устойчивой модели развития требует целенаправленной модернизации действующего законодательства для формирования интегрированных экономических стимулов, обеспечивающих синергию экономической, экологической и социальной составляющих.

Ключевые слова: устойчивое развитие, АПК, правовое регулирование, правовые пробелы.

Для цитирования: Маринченко Т.Е., Валеева А.И. Основы устойчивого развития АПК Российской Федерации // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126) С. 5-20 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-5-20>

Благодарности: Исследование выполнено в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Совершенствование государственной политики для обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства» по Государственному заданию Министерства сельского хозяйства России. Отдельная благодарность рецензентам за ценные замечания и рекомендации.

Research article

Universal Decimal Code 342.33

BASIS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE SECTOR IN RUSSIA

Tatiana E. Marinchenko^{1✉}, Aliya I. Valeeva²

Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex – Rosinformagrotech, Industrial Township Pravdinsky, Moscow Region, Russia

¹9419428@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3721-112X>

²valeeva.aliia@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8915-1325>

Abstract. This study was a comprehensive analysis of legal fundamentals for sustainable development of the Russian agro-industrial complex in the context of three interconnected crises: climatic, economic, and social. This work was important, as there exists a need to overcome the systemic imbalances in legal regulation that prevent to integrate the sustainable development principles into the Russian agricultural policy. The methodological research basis included the systems analysis, comparative legal method, formal legal analysis, and legal modeling. These ensured a comprehensive approach to studying the problem. The research materials comprised federal-level regulatory legal acts, strategic and program documents. The current extensive economic model is based on increasing resource inputs. The study demonstrated that it had exhausted itself. The continued focus of key regulatory acts on gross output indicators at the expense of resource efficiency criteria makes the situation even worse. The primary scientific study outcome was that it identified and classified the systemic imbalances that interfered with the structural integration of sustainability components. The imbalance of goals showed that the Food Security Doctrine's focus on gross output was at odds with “green” strategies' focus on the environment. The lack of legal mechanisms in legislation that connected state assistance to the attainment of particular environmental and social goals was a legal gap. An

institutional gap was a consequence of poor interagency coordination and the lack of crosscutting financial and economic mechanisms. The study proved the research hypothesis that the key barrier was not the lack of strategic goal-setting, but rather systemic imbalances in sectoral legislation. The study proposed to overcome the identified imbalances through establishing a “green” incentives system based on the “payment for results” principle. Specific legislative initiatives include adoption of increasing coefficients to subsidies for farms implementing agro-ecological practices, and the development of greenhouse gas legislation through the introduction of “agricultural carbon unit” concept. The practical significance of the study is that its results and conclusions can be used in improving the agricultural and environmental legislation, as well as in developing departmental regulatory acts. The transition of the agro-industrial complex to a sustainable development model requires targeted upgrade of current legislation to create integrated economic incentives that ensure the synergy between economic, environmental, and social components.

Keywords: sustainable development, agro-industrial complex, legal regulation, legal gaps

For citation: Marinchenko T.E., Valeeva A.I. Basis for sustainable development of agriculture sector in Russia. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126): 5-20. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-5-20>

Acknowledgements: This study was conducted within the framework of the research project “Improving State Policy for Sustainable Agricultural Development” under the State Assignment of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation. The authors would like to express their special gratitude to the reviewers for their valuable comments and suggestions.

Введение. Российский агропромышленный комплекс (АПК), являясь критически важным элементом экономической и продовольственной безопасности страны, функционирует в настоящее время в условиях «тройного кризиса», где климатические, экономические и социальные вызовы не просто сосуществуют, а усиливают друг друга, создавая кумулятивный эффект системной уязвимости [1].

Климатические риски стали новой реальностью, поскольку из традиционные для сельского хозяйства рисков сместились в область повышенной частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений [2]. Согласно данным Росгидромета, частота опасных агрометеорологических явлений (засухи, суховеи, пыльные бури) на территории России увеличилась более чем в два раза за последние 25 лет [3]. Однако правовые механизмы, в частности, Федеральный закон от 25.07.2011 № 260-ФЗ «О государственной поддержке в сфере сельскохозяйственного страхования», принятый Государственной Думой 05.07 2011 г., остаются ориентированы на локальные и относительно редкие события. Они не адаптированы к рискам катастрофической засухи, охватывающей несколько регионов, и не покрывают долгосрочные последствия в виде деградации почв и необратимого снижения природного плодородия земель, что свидетельствует о наличии существенного правового пробела.

Исчерпание экстенсивной экономической модели представляет второй кризис. Рост себестоимости продукции в российском АПК в период 2021-2024 годов устойчиво опережал рост производительности труда, что указывает на исчерпание модели развития, основанной на наращивании ресурсных затрат [2]. Необходимость повышения конкурентоспособности на мировых рынках и ограничение доступа к мировым факторам производства, таким как генетические ресурсы, современная техника и технологии, требуют перехода к ресурсоэффективной и менее зависимой от импорта модели агропроизводства [4]. Ключевой инструмент государственной поддержки – Федеральный закон от 29.12.2006 № 264-ФЗ «О развитии сельского хозяйства», принятый Государственной Думой 22.12 2006 г. – сохраняет

фокус на валовых показателях (объем производства, посевные площади), практически игнорируя интеграцию критериев ресурсоэффективности (водо- и энергоемкость единицы продукции). Это создает системный дисбаланс в регулировании, при котором экономические стимулы де-факто противоречат императивам долгосрочной устойчивости и конкурентоспособности.

Третьим кризисом является человеческий капитал, как системное ограничение. Социальный ландшафт сельских территорий характеризуется углубляющимся демографическим кризисом. Согласно данным Росстата, доля сельского населения в возрасте старше трудоспособного к 2024 г. превысила 27%, в то время как доля молодежи продолжает сокращаться [5]. Такая ситуация угрожает самовоспроизводству не только АПК, но и сельских сообществ в целом. Государственная программа «Комплексное развитие сельских территорий», утвержденная Постановлением Правительства РФ 31.05.2019, № 696, будучи основным инструментом развития села, направлена преимущественно на строительство инфраструктуры. При этом в ней отсутствуют комплексные меры по созданию современных, высокопроизводительных рабочих мест вне традиционного АПК и целевые программы привлечения в село «цифровых кочевников» и высококвалифицированных кадров. Данный структурный пробел в правовом регулировании блокирует диверсификацию сельской экономики и закрепление молодежи.

Имеется в наличии системное несоответствие между характером современных вызовов и возможностями действующей правовой базы АПК. Нормативные акты устраняют симптомы «тройного кризиса» по отдельности, но не предлагают интегрированных правовых решений, обеспечивающих синергию между экономической, экологической и социальной составляющими устойчивого развития [6]. Действующая система правового регулирования АПК фокусируется на коррекции или противодействии существующим рискам и тенденциям и обуславливает необходимость в комплексном анализе существующих правовых дисбалансов и разработке научно обоснованных предложений по изменению законодательства, что и определяет актуальность и научную новизну настоящего исследования.

Цель исследования – провести комплексный анализ правового обеспечения устойчивого развития АПК Российской Федерации, выявить системные дисбалансы и разработать научно обоснованные предложения по их устранению.

Материалы и методы. Объектом исследования выступает комплекс общественных отношений, обусловленных правовым регулированием АПК и направленных на достижение целей его устойчивого развития.

Предметом исследования является совокупность нормативных правовых актов (НПА), формирующих правовой режим функционирования АПК, и системные правовые дисбалансы, препятствующие интеграции экономической, социальной и экологической составляющих устойчивости в указанном регулировании.

Материалами исследования послужили нормативные правовые акты федерального уровня – Федеральный закон от 29.12.2006 № 264-ФЗ «О развитии сельского хозяйства», принятый Государственной Думой 22.12.2006 (далее – Закон № 264-ФЗ); Федеральный закон от 14 ноября 2023 года № 456-ФЗ «О федеральном бюджете на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов»; стратегические и программные документы – Доктрина продовольственной безопасности, утверждённая указом Президента РФ от 21.01.2020 № 20; Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 года №3052-р (далее – Стратегия № 3052-р); Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного

комплексов Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 08.09.2022 № 2567-р; Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, утвержденная Постановлением Правительства от 14 июля 2012 года №717 (далее – Госпрограмма) и национальный проект «Экологическое благополучие», утверждённый Указом Президента Российской Федерации от 07.05.2024 №309 (далее – Нацпроект).

Методологическую основу исследования составила совокупность методов, применение которых позволило обеспечить комплексность анализа:

- системный метод применялся для рассмотрения правового регулирования АПК как целостной системы, где взаимодействуют нормы различной отраслевой принадлежности (аграрное, экологическое, финансовое право), что позволило выявить не только внутренние противоречия, но и системные эффекты, возникающие от взаимодействия ее элементов, такие как кумулятивная уязвимость от наложения климатических, экономических и социальных рисков;
- сравнительно-правовой анализ использовался для сопоставления целевых установок, заложенных в различных стратегических и нормативных документах, и позволил выявить правовые противоречия и пробелы, обусловленные разнонаправленностью целей;
- формально-юридический метод стал основным инструментом для анализа структуры и содержания конкретных правовых норм, содержащихся в федеральном законодательстве и подзаконных актах; он позволил интерпретировать понятия (например, «устойчивость сельхозпроизводства» в ст. 7 Закона № 264-ФЗ) и выявить отсутствие в них экологической и социальной составляющих;
- метод правового моделирования применен на заключительном этапе исследования для разработки концептуальной модели преодоления выявленных дисбалансов; на его основе были сформулированы конкретные предложения по совершенствованию законодательства.

Гипотеза исследования заключалась в предположении, что ключевым барьером для перехода АПК к устойчивой модели развития является не отсутствие стратегического целеполагания, а системные дисбалансы в отраслевом законодательстве и институциональные пробелы, которые делают провозглашенные цели декларативными и блокируют их реализацию на практике. Комплексное применение указанных методов позволило последовательно проверить и подтвердить данную гипотезу.

Результаты. В ходе проведенного исследования были получены следующие результаты, структурированные в соответствии с поставленными задачами.

Анализ показал, что устойчивое развитие АПК в правовом аспекте представляет собой требующую синхронизации трехуровневую систему координации: экологический приоритет (снижение нагрузки на агроэкосистемы, адаптация к климатическим изменениям), экономический определяющий фактор (повышение конкурентоспособности и ресурсоэффективности) и социальный вектор (закрепление человеческого капитала на сельских территориях).

Экологический приоритет является основой экологической оптимизации производства сельскохозяйственной продукции – система агротехнологических и эколого-экономических регламентаций с учётом степени воздействия антропогенных факторов [7].

Экономический определяющий фактор обусловлен особенностями территориального устройства региона, спецификой отраслевой структуры экономики, параметрами внутреннего рынка, объёмом, структурой и географией экспорта и импорта сельскохозяйственного сырья и

готовой продукции [8]. Важное значение имеет уровень развития предпринимательской среды, рыночной, технической и информационной инфраструктуры, создающих условия для реализации инвестиционных проектов и развития современных форм организации сельскохозяйственного производства [9].

Социальный вектор оказывает существенное влияние на развитие АПК, в том числе через социальные вызовы, среди которых, например, сокращение занятости в сельской местности, структурная безработица на селе, ухудшение социального положения сельских жителей. Инвестирование государства в социальную сферу позволяет повысить инвестиционную привлекательность как экономики государства, так и аграрного сектора. Это, в частности, выражается в улучшении уровня социально-экономических условий жизни людей, строительстве новых объектов социальной сферы и коммуникаций, что обеспечивает дополнительные рабочие места, повышает занятость в сельском хозяйстве и увеличивает приток капитала в село [10].

Проведенный системный анализ нормативных правовых актов, регулирующих устойчивое развитие, в том числе АПК, показал наличие правовых пробелов и противоречий, не способствующих устойчивому развитию АПК.

Так, Стратегией № 2567-р увеличение доли продукции с высокой добавленной стоимостью рассматривается как одно из направлений развития, в том числе путём развития мощностей хранения и переработки сельскохозяйственного сырья. Анализ Закона № 456-ФЗ показал, что среди целевых статей расходной части федерального бюджета отсутствуют прямые финансовые ассигнования, специально предусмотренные для реализации мероприятий, предусмотренных Стратегией № 2567-р, касающихся углубленной переработки сельскохозяйственной продукции, создания высокотехнологичных производств по переработке агропродукции, развития рынка органической агропродукции и применения биологизированных технологий [11, 12]. Не имеют они отражения и в структуре субсидий, предусмотренных Законом № 264-ФЗ, который остается основным каналом бюджетного финансирования отрасли, поддержка таких проектов осуществляется существующими видами субсидий [13].

Стратегия № 3052-р провозглашает стимулирование внедрения наилучших доступных технологий (НДТ), снижение углеродоемкости продукции и поддержку практик декарбонизации (углеродного земледелия). Однако не созданы финансовые стимулы для перехода на НДТ и мероприятия по декарбонизации в рамках Закона № 264-ФЗ. Стратегия № 3052-р фиксирует целевые показатели по секвестрации парниковых газов, однако не устанавливает порядка их мониторинга для агросектора и не вводит ответственности за их невыполнение [5, с. 48].

Закон № 264-ФЗ (ст. 6 и 7) имеет устойчивую ориентацию на экстенсивные показатели (валовые объемы производства, посевные площади, поголовье скота). Конкретными проявлениями этого дисбаланса являются:

- отсутствие «правовых мостов» к экологическим критериям – в законе и подзаконных актах к нему не предусмотрено повышающих коэффициентов или иных преференций для хозяйств, демонстрирующих снижение углеродного следа, эффективное водопользование или применение почвозащитных технологий. Меры господдержки остаются «слепыми» к экологическим результатам деятельности [5, с. 49];
- игнорирование социальных критериев эффективности – система субсидирования не дифференцирована в зависимости от создания «зеленых» рабочих мест, уровня заработной

платы или вклада в развитие социальной инфраструктуры сельских территорий [9], что консервирует ресурсно-сырьевую модель аграрной экономики, не стимулируя ее переход к модели, основанной на человеческом капитале и инновациях.

Проведенный анализ позволил выявить и классифицировать системные дисбалансы, которые структурно препятствуют интеграции компонентов устойчивости в АПК.

1. Дисбаланс целей – противоречие между целевыми установками Доктрины, ориентированной на валовые показатели производства, и экологическими приоритетами Стратегии № 3052-р и Нацпроекта (табл. 1).

Таблица 1. Дисбаланс целей в стратегическом планировании развития АПК

Table 1. Imbalance of goals in the strategic planning of agro-industrial complex development

Элемент анализа	Доктрина	Стратегия № 3052-р и Нацпроект	Сущность дисбаланса
Направление	Экстенсивное развитие, накопление и доступность	«Зеленая» трансформация; качество и устойчивость	Парадигма наращивания и парадигма ограничений и «озеленения»
Основные целевые установки	Достижение валовых объемов производства; физическая и ценовая доступность; снижение импортозависимости	Снижение выбросов парниковых газов; повышение поглощающей способности экосистем; внедрение НДТ	Количество и качество – ориентация на объемы продукции противоречит ориентации на экологичность процессов
Влияние на агро производителя	Создает стимулы для максимизации производства и освоения новых площадей для получения господдержки	Формирует риски будущих экологических ограничений и издержек, но не дает текущих финансовых стимулов для «зеленого» перехода	Правовая и инвестиционная неопределенность – удобнее действовать по старой модели, но рискованно не готовиться к новой
Влияние на органы власти	Минсельхоз России и региональные аграрные ведомства ориентированы на выполнение валовых показателей Доктрины	Минэкономразвития России и Минприроды России ориентированы на выполнение «зеленых» показателей эффективности	Межведомственный конфликт показателей эффективности – отсутствие иерархии документов приводит к несогласованности в действиях органов власти
Системный вывод	Стратегия – обеспечение продовольственной безопасности через наращивание мощностей	Стратегия – обеспечение долгосрочной устойчивости через экологизацию экономики	Разнонаправленность целевых ориентиров блокирует формирование единой национальной аграрной политики и создает системные риски

Разнонаправленность целевых ориентиров на уровне стратегического планирования создает правовую неопределенность для сельхозтоваропроизводителей и органов власти [6]. Доктрина направлена на увеличение физического объема производства и доступность продуктов питания.

Стратегия № 3052-р и Нацпроект предполагают «зеленую» трансформацию и экологизацию производства. Эти два направления вступают в противоречие друг с другом.

Одновременно цель увеличения валовых объемов производства сталкивается с необходимостью сокращения вредных воздействий на окружающую среду. Увеличение количества продукции не согласуется с повышением экологичности производственных процессов.

Это приводит к тому, что производители получают стимулы увеличивать производство и осваивать новые площади, однако не имеют финансовой мотивации переходить на экологически чистые практики. Отсутствие четкого понимания роли государства и стабильности законов повышает правовые и инвестиционные риски.

Одновременно разные ведомства ориентируют на разные показатели эффективности: Минсельхоз ставит цель увеличить объемы производства, тогда как Минэкономразвития и Минприроды фокусируются на экологических показателях. Такая ситуация ведет к отсутствию единого курса действий. Разнонаправленные целевые ориентиры создают препятствия для формирования целостной аграрной политики и несут серьезные системные риски.

2. Противоречия в законодательстве в отношении целей и их последствий – Доктрина имеет фокус на количественные результаты, устанавливает пороговые значения для валового производства и самообеспеченности по базовым продуктам (зерно, мясо, молоко и т.д.). Например, самообеспечение зерном – не менее 95%, сахаром – не менее 90%. Система господдержки (субсидии на гектар, на литр молока) исторически выстраивалась под эти цели, поощряя наращивание объемов, в том числе за счет экстенсивного освоения земель и ресурсоемких технологий.

Одновременно Стратегия №3052-р и Нацпроект имеют фокус на экологическую устойчивость. Стратегия №3052-р ставит цели по снижению выбросов парниковых газов, а Нацпроект – по снижению загрязнения и сохранению природных ресурсов. Таким образом фокус на качественных параметрах развития и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Это требует перехода на ресурсосберегающие практики (no-till, точное земледелие), что зачастую в краткосрочной перспективе может привести к некоторому снижению валовых показателей или росту издержек. Это противоречие порождает следующие правовые и экономические проблемы:

- правовая неопределенность для агропроизводителей – хозяйство, увеличивающее пашню за счет распахки целинных земель (что способствует выполнению Доктрины), одновременно может нарушать принципы сохранения биоразнообразия и увеличивать углеродный след (что противоречит Стратегии и Нацпроекту);
- проблема выбора модели развития – производитель оказывается перед выбором – следовать привычной и субсидируемой модели (интенсивной, ресурсозатратной) или инвестировать в рискованный переход на «зеленые» технологии, не имея при этом четких долгосрочных гарантий государственной поддержки и стабильного спроса;
- несогласованность деятельности органов государственной власти – ведомственная разобщенность (разнонаправленность целей и нескоординированность), выражающаяся в том, что Минсельхоз оценивается по показателям валового производства и самообеспеченности, а Росприроднадзор – по соблюдению экологических нормативов и несбалансированность господдержки, в результате которой бюджетные средства в рамках Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, утвержденной

Постановлением Правительства РФ от 14.07.2012 №717 (далее – Госпрограмма) продолжают в значительной степени работать на достижение целей Доктрины (валовое производство и самообеспеченность), в то время как финансирование «зеленого» перехода (меры стратегий) остается недостаточным и фрагментарным;

- создание системных рисков для экономики, в том числе репутационных и экспортных, обусловленных игнорированием экологической повестки (что закрывает доступ к рынкам с «зелеными» стандартами и ведет к потере конкурентных преимуществ) и рисков, связанных с долгосрочными угрозами, когда краткосрочные выгоды (ориентация на валовый объем с применением традиционных технологий) ведет к деградации основного производственного актива – земель (что в среднесрочной перспективе подрывает саму основу продовольственной безопасности).

Следующим правовым пробелом является стимулирование производства без целевой ориентации на устойчивость, обусловленное отсутствием в Законе № 264-ФЗ (ст. 6, ст. 7) и подзаконных актах механизмов, увязывающих предоставление субсидий с достижением конкретных экологических (снижение углеродного следа, водосбережение) и социальных (создание рабочих мест с высокой производительностью труда) результатов. Существуют меры господдержки, но они лишены конкретных показателей или критериев, связывающих с целями устойчивого развития [3]. Ст. 7 Закона №264-ФЗ гласит, что господдержка направлена, в том числе, на «повышение устойчивости сельскохозяйственного производства». Однако это понятие трактуется исключительно в экономическом ключе, при котором под «устойчивостью» понимаются рентабельность и финансовая стабильность.

Конкретные механизмы (виды, условия, порядок предоставления субсидий) устанавливаются подзаконными актами, в первую очередь Госпрограммой. В настоящее время критерии предоставления несвязанной поддержки (субсидий на 1 га посевов, на 1 литр молока или на возмещение части затрат на удобрения) не дифференцированы и не содержат «зеленых» условий. Субсидия на гектар посевов выплачивается вне зависимости от того, ведет ли хозяйство минерально-интенсивное земледелие с высокой эрозией почв или применяет no-till с сохранением растительных остатков, что способствует секвестрации углерода. То есть, хозяйство, применяющее ресурсоемкие и деградирующие технологии, и хозяйство, внедряющее почвозащитные и водосберегающие практики, находятся в равных условиях при получении государственных средств.

Правовой пробел заключается в том, что в законе и подзаконных актах отсутствует норма-«переходник», которая бы раскрывала экологическую и социальную составляющую этой «устойчивости» и увязывала бы ее с конкретными механизмами финансирования. В результате возникает правовая неопределенность, сдерживание частных – ESG-инвестиций (ESG – Environmental (экология), Social (социальная сфера) и Governance (корпоративное управление) в АПК, при которых инвесторы учитывают не только финансовые показатели компаний, но и их воздействие на окружающую среду, общество и корпоративное управление (табл. 2).

Таблица 2. Следствия правового пробела «стимулирование без целевой ориентации на устойчивость»

Table 2. Consequences of the legal lacuna “Incentives without Target Orientation towards Sustainability”

№ п/п	Следствие	Проявление
1.	Экономическое	Государство через субсидии де-факто финансирует

	искажение	деградацию собственного природного капитала (почв, водных ресурсов), так как не делает различий между устойчивыми и неустойчивыми производителями
2.	Правовая неопределенность	Добросовестный производитель, несущий более высокие издержки при переходе на «зеленые» технологии, не имеет четких, прописанных в законе гарантий, что его усилия будут дополнительно поддержаны
3.	Сдерживание частных инвестиций	Отсутствие «зеленых» критериев в господдержке не создает сигналов для частных инвесторов и банков о приоритетах развития, сдерживая поток ESG-инвестиций в АПК

Система государственных субсидий фактически поддерживает деградацию природных ресурсов, поскольку не предусматривает различия между устойчивыми и неустойчивыми производителями, формируя экономическое искажение, например, негативное влияние на окружающую среду. Так, субсидии на минеральные удобрения влияют на качество почвы: при интенсивном использовании химикатов с целью повышения урожайности нарушается естественный баланс микроорганизмов, обеспечивающих плодородность почвы.

Правовая неопределенность формируется у производителей, осуществляющих переход на «зеленые» технологии, несущих повышенные затраты, но не получающих достаточных юридических гарантий дополнительной поддержки со стороны государства.

Отсутствуют и ясные критерии отбора для инвестиционных проектов, соответствующих концепции устойчивого развития, что снижает заинтересованность частных инвесторов и ограничивает приток инвестиций в сектор.

Описанные проблемы указывают на необходимость внесения существенных изменений в существующую стратегию развития АПК. Требуется чёткая координация между различными ведомствами, введение механизмов поощрения устойчивого производства и обеспечение правовой определенности для производителей и инвесторов.

Решение выявленных правовых пробелов и противоречий требует комплексного реформирования системы правовых норм на всех уровнях – от стратегического целеполагания до финансовых инструментов и процедур межведомственного взаимодействия.

Предположим, что ключевым барьером является ведомственная разобщенность и отсутствие «сквозных» финансово-экономических механизмов. В ее пользу свидетельствуют следующие доводы:

- анализ показал, что меры господдержки по Закону №264-ФЗ (зона ответственности Минсельхоза) не синхронизированы с критериями «зеленого» финансирования, разрабатываемыми в рамках Стратегии № 3052-р (зона ответственности Минэкономразвития);
- выявленный инструментально-финансовый дисбаланс демонстрирует, что даже при наличии координации на стратегическом уровне, на операционном уровне отсутствуют «сквозные» финансовые инструменты (бюджетные, налоговые, кредитные), которые позволяли бы хозяйству одновременно получать поддержку за объем производства и за снижение экологического следа.

В этом случае ведомственная разобщенность является институциональной причиной, а отсутствие сквозных финансовых механизмов – инструментальным следствием, блокирующим реализацию стратегий на практике, что подтверждается приведенными доводами.

На основе выявленных дисбалансов предложена концептуальная модель, предполагающая создание системы «зеленых» стимулов в ядре отраслевого законодательства, основанная на принципе «поддержка за результат», при котором базовый объем господдержки дополняется «устойчивой надбавкой» за достижение верифицированных показателей в сфере экологии и социального развития.

Для устранения пробела, связанного с господдержкой экологических и социальных результатов, предлагается внести в Федеральный закон № 264-ФЗ «О развитии сельского хозяйства» новую статью 7.1 следующего содержания:

«Субсидии на оказание несвязанной поддержки сельскохозяйственным товаропроизводителям могут предоставляться с применением повышающих коэффициентов к базовой ставке при условии внедрения и подтверждения достижения целевых показателей в области снижения удельного водопотребления, сокращения выбросов парниковых газов и применения агроэкологических практик, перечень которых утверждается федеральным органом исполнительной власти в области сельского хозяйства совместно с федеральным органом исполнительной власти в области охраны окружающей среды».

В качестве правового эксперимента инициировать внесение изменений в Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», предусмотрев введение понятия «углеродная единица сельскохозяйственного происхождения» и утвердив упрощенную методику количественной оценки секвестрации углерода для агросектора, что создаст правовую основу для нового источника доходов аграриев.

Обозначенные предложения позволяют создать правовые мосты между экономическими и экологическими императивами, направленные на устранение выявленных коллизий.

Обсуждение. Правовое регулирование устойчивого развития АПК сформировано в условиях трехуровневой системы координации. Проведенный системный анализ нормативных правовых актов позволил выявить их рамочный и декларативный характер применительно к целям устойчивого развития, что проявляется в рассогласованности между стратегическим целеполаганием и инструментами его реализации [6]. Стратегия № 2567-р и Стратегия № 3052-р носят декларативный характер, что проявляется в отсутствии действенных механизмов их имплементации и бюджетной привязки – некоторые положения стратегий не подкреплены детализированными финансовыми планами или целевыми статьями расходов в рамках государственных программ.

Стратегия № 3052-р провозглашает стимулирование внедрения НДТ, снижение углеродоемкости продукции и поддержку практик декарбонизации (углеродного земледелия), однако не созданы финансовые стимулы для перехода на НДТ и мероприятия по декарбонизации в рамках Закона № 264-ФЗ. Стратегия № 3052-р фиксирует целевые показатели по секвестрации парниковых газов, однако не устанавливает порядка их мониторинга для агросектора и не вводит ответственности за их невыполнение [5]. В ней не содержатся конкретные административные регламенты, формы отчетности или процедуры, обязывающие органы власти и хозяйствующие субъекты достигать заявленных целей.

Отраслевое законодательство характеризуется доминированием экстенсивной парадигмы – Закон № 264-ФЗ (ст. 6 и 7) ориентируются на экстенсивные показатели, что системно препятствует интеграции принципов устойчивости [6].

Разнонаправленность фокусов Доктрины (количественные показатели) и Стратегии №3052-р, Нацпроекта (экологическая устойчивость и сохранение природных ресурсов)

квалифицируется как противоречие (коллизия) целей, связанная с разнонаправленностью стратегических ориентиров, что порождает следующие правовые и экономические проблемы.

Стимулирование производства без целевой ориентации на устойчивость делает провозглашенные цели устойчивого развития декларативными на уровне основного отраслевого закона – Закона № 264-ФЗ.

Выводы о доминировании экстенсивной парадигмы в Законе № 264-ФЗ согласуются с позицией ряда экономистов, указывающих на исчерпание ресурсной модели роста в АПК [6]. Однако настоящее исследование вносит вклад, конкретизируя этот тезис на уровне правовых норм, демонстрируя, что сама система господдержки законодательно закрепляет данную модель.

Научное сообщество дискутирует о необходимости отдельного закона об экосистемных услугах [7], однако приведенные результаты показывают, что первоочередной задачей является интеграция принципа оплаты за эти услуги в действующий финансово-правовой механизм (Закон № 264-ФЗ). Это позволяет предложить более быстрый и прагматичный путь трансформации, минуя риски, связанные с созданием новых «рамочных» законов.

Подтвержденная гипотеза позволяет говорить о том, в основе недостаточного межведомственного взаимодействия лежит отсутствие сквозных инструментов. Проблема не только в том, что ведомства не координируют действия, но и в том, что у них отсутствуют законодательно прописанные общие ориентиры и единые показатели эффективности, привязанные к устойчивости конкретной территории. Выявленные противоречия между целями Доктрины продовольственной безопасности и «зелеными» стратегиями, а также инструментально-финансовый пробел в Законе № 264-ФЗ, приводящий к стимулированию производства без целевой ориентации на устойчивость, делают провозглашенные на высшем уровне цели декларативными. Более того, ведомственная разобщенность и отсутствие сквозных финансовых механизмов, выявленные в ходе исследования, блокируют практическую реализацию даже тех немногочисленных точечных инициатив, которые присутствуют в стратегических документах. Таким образом, гипотеза о том, что проблема носит системный и институциональный характер, а не является следствием недостатка стратегического планирования, нашла свое комплексное подтверждение.

Перспективным направлением для будущих исследований является сравнительный анализ правоприменительной практики в пилотных регионах, внедряющих «зеленые» критерии в свою региональную политику поддержки АПК, а также экономическое моделирование бюджетной эффективности предлагаемых «устойчивых надбавок».

Выводы. Установлено, что правовое обеспечение устойчивого развития АПК характеризуется системными дисбалансами, среди которых:

- нормативная коллизия целей между Доктриной продовольственной безопасности (ориентация на валовые показатели) и «зелеными» стратегиями (ориентация на качественные параметры), создающая правовую неопределенность;
- инструментально-финансовый пробел, выражающийся в отсутствии в Законе № 264-ФЗ «О развитии сельского хозяйства» механизмов, увязывающих господдержку с достижением экологических и социальных результатов;
- институциональный пробел, проявляющийся в ведомственной разобщенности и отсутствии сквозных финансово-управленческих механизмов для координации действий Минсельхоза, Минэкономразвития и Минприроды.

Найдены доводы в пользу гипотезы, согласно которой ключевым барьером является ведомственная разобщенность, усугубляемая отсутствием сквозных финансово-экономических механизмов, что приводит к декларативности стратегических документов и блокирует интеграцию принципов устойчивости в реальную хозяйственную практику.

В качестве основного пути преодоления выявленных дисбалансов предложена концепция «поддержки за результат», реализуемая через точечную модернизацию действующего законодательства. Сформулированы некоторые предложения, включающие:

- введение в Закон № 264-ФЗ нормы о «зеленых» повышающих коэффициентах к субсидиям;
- закрепление в Федеральном законе №172-ФЗ обязанности по созданию межведомственных проектных офисов на муниципальном уровне;
- развитие Федерального закона №296-ФЗ через введение понятия «агроуглеродная единица».

Переход АПК к устойчивой модели развития требует не столько создания новых стратегий, сколько целенаправленной доработки отраслевого законодательства с целью внедрения в него интегрированных экономических стимулов, основанных на принципах триединства экономики, экологии и социальной сферы. Для перехода к устойчивой модели АПК необходим перенос акцента с создания новых рамочных стратегий на целенаправленную интеграцию сквозных экономических стимулов в ядро отраслевого законодательства, что обеспечит синергию экономической, экологической и социальной составляющих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Маринченко Т. Е., Кузьмин В. Н., Королькова А. П., Горячева А.В., Валеева А.И., Катасонов И.А. Основные направления государственной политики для устойчивого развития сельского хозяйства: аналит. обзор. М.: Росинформагротех. 2024. 120 с.

2. Маринченко Т. Е., Валеева А. И. Экологические аспекты государственной политики в сельском хозяйстве: пути к устойчивому развитию // Экология и природопользование: тенденции, модели, прогнозы, прикладные аспекты: матер. II Всеросс. науч.-практ. конф. (Рязань, 28 марта 2025 г.). Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева. 2025. С. 102-107. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82438617>

3. Макаров И.А., Стародубцева М.Ф., Орлов И.А., Пшенникова Ю.А., Шишигин С.В. Климатическая повестка и зеленая экономика. Тренды. События. Цифры. Информационный бюллетень. М.: НИУ ВШЭ. 2024. № 1. 12 с. URL: <https://stratpro.hse.ru/mirror/pubs/share/944830772.pdf>

4. Marinchenko T. E. Factor of sustainable development of the agricultural sector // International Conference on Finance, Economics, Management and IT Business, (Ekaterinburg, November 2-3, 2024). Ekaterinburg: Institute of Digital Economics and Law. 2025. P. 325-330. <https://doi.org/10.63550/ICEIP.2025.69.71.001>

5. Денисенко М.Б., Кваша Е.А., Мкртчян Н.В., Харьковская Т.Л. Демография и миграция. Тренды. События. Цифры. Информационный бюллетень. М.: НИУ ВШЭ. 2024. № 1. 14 с. URL: <https://stratpro.hse.ru/mirror/pubs/share/1015016468.pdf>

6. Управление проектами развития сельских территорий: коллективная монография. Краснодар: Российское энергетическое агентство. 2024. 212 с.

7. Комарова О.П., Земляницына С.В. Снижение пестицидной нагрузки как основа экологической безопасности сельских территорий // *Фундаментальные исследования*. 2020. № 3. С. 54-59. <https://doi.org/10.17513/fr.42699>
8. Арбузова Т.А. Факторы и условия, обеспечивающие конкурентные преимущества агропромышленного комплекса региона // *Экономика и управление (Симферополь)*. 2014. № 1. С. 76-82. EDN: YPYJST
9. Трифонова Е.Н. Оценка межрегиональных различий в развитии экспорта продовольствия РФ // *Экономика сельского хозяйства России*. 2022. № 4. С. 30-35. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48400943>
10. Кусакина О. Н., Соколов С. В. Организационно-экономический механизм управления развитием человеческого капитала в аграрном секторе // *Естественно-гуманитарные исследования*. 2022. № 44(6). С. 151-155. EDN: JAGLTV
11. Федоренко В.Ф., Брюханов А.Ю., Захаров А.М., Мурзаев Е.А. Концептуальные основы развития органического производства сельскохозяйственной продукции // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 1 (319). С. 2-7. EDN: GOPCAQ
12. Захаров А.М., Устроев А.А., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Методы проектирования технологий органического производства продукции растениеводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. № 1. С. 13-21. EDN: EOWTQK
13. Новикова И.И., Захаров А.М., Минин В.Б., Максимов Д.А., Титова Ю.А., Устроев А.А., Хютти А.В., Мурзаев Е.А. Биологизация производства картофеля в условиях Северо-Западного региона РФ. СПб.: ФНАЦ ВИМ. 2024. 156 с. EDN: MYWYLD

REFERENCES

1. Marinchenko T. E., Kuzmin V. N., Korolkova A. P., Goryacheva A.V., Valeeva A.I., Katasonov I.A. The main directions of state policy for the sustainable development of agriculture: analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2024. 120 p. (In Russ.)
2. Marinchenko T. E., Valeeva A. I. Ecological aspects of state policy in agriculture: ways to sustainable development. In: *Ecology and Nature Management: Trends, Models, Forecasts, and Applied Aspects: Proc. II All-Russian Sci. Prac. Conf. (Ryazan, March 28, 2025)*. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2025: 102-107. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=82438617>
3. Makarov I.A., Starodubtseva M.F., Orlov I.A., Pshennikova Yu.A., Shishigin S.V. The climate agenda and the green economy. Trends. Events. Numbers. Information bulletin. Moscow: High School of Economy. 2024. No. 1. 12 p. (In Russ.) URL: <https://stratpro.hse.ru/mirror/pubs/share/944830772.pdf>
4. Marinchenko T. E. Factor of Sustainable Development of the Agricultural Sector. In: *International Conference on Finance, Economics, Management and IT Business (Ekaterinburg, 2-3 November 2024)*. Ekaterinburg: Institute of Digital Economics and Law 2025:325-330. (In Eng.) <https://doi.org/10.63550/ICEIP.2025.69.71.001>
5. Denisenko M.B., Kvasha E.A., Mkrtchyan N.V., Harkov T.L. Demography and migration. Trends. Events. Numbers. Information bulletin. Moscow: Higher School of Economics. 2024. No. 1. 14 p. (In Russ.) URL: <https://stratpro.hse.ru/mirror/pubs/share/1015016468.pdf>
6. Management of Rural Development Projects: A Collective Monograph. Krasnodar: Russian Energy Agency. 2024. 212 p. (In Russ.)

7. Komarova O.P., Zemlyanitsina S.V. Reducing the pesticide load as a basis for environmental safety in rural areas. *Fundamentalnye issledovaniya* = Fundamental Research. 2020;3:54-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/fr.42699>

8. Arbuzova T.A. Factors and conditions ensuring the competitive advantages of the region's agro-industrial complex. *Ekonomika i upravlenie (Simferopol')* = Economics and Management (Simferopol). 2014;1:76-82. (In Russ.) EDN: YPYJST

9. Trifonova E.N. Assessment of interregional differences in the development of food exports of the Russian Federation. *Ekonomika sel'skogo khozyaistva Rossii* = Economics of Agriculture of Russia. 2022;4: 30-35. (In Russ.) <https://elibrary.ru/item.asp?id=48400943>

10. Kusakina O. N., Sokolov S. V. Organizational and economic mechanism of management of human capital development in the agricultural sector. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya* = Natural-Humanitarian Studies. 2022; 44(6):151-155. (In Russ.) EDN: JAGLTV

11. Fedorenko V.F., Bryukhanov A.Yu., Zakharov A.M., Murzaev E.A. Conceptual basis for the development of organic agricultural production. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2024;1 (319):2-7. (In Russ.) EDN: GOPCAQ

12. Zakharov A.M., Ustroev A.A., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Methods for designing technologies of organic crop production *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2025;19 (1): 13-21. (In Russ.) EDN: EOWTQK

13. Novikova I.I., Zakharov A.M., Minin V.B., Maksimov D.A., Titova Yu.A., Ustroev A.A., Hyutti A.V., Murzaev E.A. Biologization of potato production in the North-Western region of the Russian Federation. Saint Petersburg: FSAC VIM. 2024. 156 p. (In Russ.) EDN: MYWYLD

Об авторах	About the authors
Маринченко Татьяна Евгеньевна, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»), 141261, Московская область, Пушкинский р-н, р.п. Правдинский, ул. Лесная д. 60, E-mail 9419428@mail.ru, +7 (903) 626-74-89, ORCID 0000-0003-3721-112X	Tatiana E. Marinchenko, research officer, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex – Rosinformagrotech, 141261, Moscow Region, Urban District Pushkinsky, Industrial Township Pravdinsky, Lesnaya Str., 60 E-mail 9419428@mail.ru, Phone: +7-903-626-74-89, ORCID 0000-0003-3721-112X
Валеева Алия Ильдаровна, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению	Aliya I. Valeeva, research officer, Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex – Rosinformagrotech, 141261, Moscow Region, Urban District Pushkinsky, Industrial Township Pravdinsky, Lesnaya Str., 60

агропромышленного комплекса» (ФГБНУ «Росинформагротех»), 141261, Московская область, Пушкинский р-н, р.п. Правдинский, ул. Лесная д. 60, valeeva.aliia@gmail.com, ORCID 0009-00 02-891 5- 1 325	E-mail valeeva.aliia@gmail.com, Phone: +7(911)946-26-98, ORCID 0009-00 02-891 5- 1 325
Заявленный вклад авторов Маринченко Т.Е. – проведение исследования, создание черновика рукописи. Валеева А.И. – проведение исследования, создание окончательной версии рукописи.	Authors' contribution T.E. Marinchenko – investigation, drafting the manuscript. A.I. Valeeva – investigation, manuscript review and editing
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	Conflict of interests The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 23.10.2025	Received: 23.10.2025
Одобрена после рецензирования: 10.12.2025	Approved after reviewing: 10.12.2025
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

Аналитическая статья

УДК 631.173.3:004.8

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-20-34

КОНЦЕПЦИЯ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ОРГАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАЛЫХ ФОРМ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ

Войтюк Вячеслав Александрович✉

Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса (ФГБНУ Росинформагротех), р. п. Правдинский, Московская область, Россия

bovver71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9136-3795>

Аннотация. В статье представлен комплексный междисциплинарный анализ барьеров, ограничивающих экспортную активность малых форм хозяйствования (личных подсобных хозяйств, крестьянско-фермерских хозяйств) в секторе органического сельского хозяйства

Российской Федерации, несмотря на устойчивый рост внутреннего рынка и значительный экспортный потенциал продукции. На основе систематизации эмпирических данных, нормативно-правовой базы и экспертных интервью установлено, что ключевые препятствия носят многоуровневый характер: сертификационный (отсутствие взаимного признания международных стандартов и высокая стоимость процедуры подтверждения соответствия), инфраструктурный (дефицит специализированных логистических цепочек и перерабатывающих мощностей), компетентностный (низкий уровень экспортной, цифровой и правовой грамотности) и финансовый (ограниченный доступ к долгосрочному кредитованию, экспортному страхованию и гарантийным фондам). Эти факторы структурно дискриминируют мелких производителей по сравнению с крупными агрохолдингами, обладающими собственными ресурсами и цифровыми экосистемами. В качестве меры для преодоления этих барьеров предлагается модель единой национальной цифровой платформы с элементами искусственного интеллекта, обеспечивающей сквозное, персонализированное сопровождение фермера, от формирования цифрового профиля и оценки экспортной зрелости до выхода на международные рынки. Платформа интегрирует государственные информационные системы, внешние сервисы и механизмы кооперации, автоматизируя соответствие международным стандартам, минимизируя транзакционные издержки и обеспечивая доступ к мерам господдержки по принципу «без заявления». Предложенная архитектура рассматривается как инструмент цифровой инклюзии, способный включить малые хозяйства в глобальные устойчивые цепочки создания стоимости и содействовать достижению целей «зелёной» трансформации агропромышленного комплекса. Научная новизна исследования заключается в выявлении системного характера барьеров и предложении интегрированного цифрового решения, сочетающего функции навигации, автоматизации и кооперации.

Ключевые слова: сельское хозяйство, цифровая трансформация, органическая продукция, экспорт, искусственный интеллект, малые формы хозяйствования

Для цитирования: Войтюк В.А. Концепция единой цифровой платформы органического производства для малых форм хозяйствования // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1(126). С. 20-34 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-20-34>

Analytical article

Universal Decimal Code 631.173.3:004.8

CONCEPT OF A UNIFIED DIGITAL ORGANIC PRODUCTION PLATFORM FOR SMALL FARMS

Vyacheslav A. Voityuk ✉

Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex – Rosinformagrotech, Industrial Township Pravdinsky, Moscow Region, Russia

bovver71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9136-3795>

Annotation. The domestic organic market in the Russian Federation demonstrates the steady growth. The products from small organic farms (personal subsidiary farms, peasant farms) have a high export potential. This article presents a comprehensive interdisciplinary analysis of the barriers

that limit the export activity of these farms. The study organized, structured, classified and analyzed the empirical data, regulatory documents and expert interviews. The study established that the main obstacles were as follows. Certification barriers were the lack of mutual recognition of international standards and the high cost of a compliance verification procedure. In the infrastructure, they were the lack of specialized logistics chains and processing facilities. The competence barriers were the low level of export-related, digital and legal literacy. Financial barriers included the limited access to long-term loans, export insurance, and guarantee funds. These factors produce a structural bias against small producers compared to large agricultural holdings that have their own resources and digital ecosystems. A proposed measure to overcome these barriers is to create a unified national digital platform with AI elements. It would provide end-to-end, personalized support for farmers – from digital profile setting and assessing the export maturity to entering the international markets. The platform will integrate government information systems, external services, and cooperation mechanisms. It will help to automate compliance with international standards and diminish transaction costs. It will also give the farmers access to logistics, financing, and government support without a formal application. The proposed model is viewed as an institutional tool for digital inclusion. It is capable to integrate the small farms into global sustainable organic supply chains and contribute to achieve the goals of «green» transformation of the agro-industrial complex. The scientific novelty of the study is that it identifies the systemic nature of barriers and offers an integrated digital solution combining the functions of navigation, automation, and cooperation.

Key words: agriculture, digital transformation, organic products, export, artificial intelligence, small farming businesses

For citation: Voityuk V.A. Concept of a unified digital organic production platform for small farms // *AgroEcoEngineering*. 2026; 1(126): 20-34 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-20-34>

Введение. Глобальный рынок органической продукции продолжает демонстрировать устойчивый рост, обусловленный растущим спросом потребителей на экологически безопасные, социально ответственные и прозрачно произведённые продовольственные товары. По данным исследований FiBL (Швейцарского научно-исследовательского института проблем биологического сельского хозяйства) объём мировой торговли органикой превысил 150 млрд евро, при этом ключевыми импортёрами выступают страны Европейского союза, Северной Америки и Азиатско-Тихоокеанского региона [1]. В этих условиях органическое сельское хозяйство всё чаще рассматривается не только как экологическая, но и как стратегическая экспортная ниша, способная обеспечить премиальные цены, диверсифицировать аграрный экспорт и укрепить национальный продовольственный имидж.

Российская Федерация, обладая значительным потенциалом для производства органики, включая обширные территории с минимальным антропогенным воздействием, богатый агробиоразнообразием и растущий интерес со стороны аграриев, пока остаётся маргинальным участником мирового рынка. Доля российской органической продукции в международной торговле не превышает 0,2 %, несмотря на высокий экспортный потенциал таких культур, как лён, ягоды, зерновые и дикоросы [2]. Одной из ключевых причин столь низкой экспортной активности является структурная особенность отрасли: подавляющее большинство производителей органики в России представлены малыми формами хозяйствования, которые объективно ограничены в ресурсах, компетенциях и доступе к инфраструктуре международной торговли [3, 4]. Для выхода на зарубежные рынки таким

хозяйствам необходимо одновременно соответствовать строгим требованиям к сертификации, обеспечивать сквозную прослеживаемость, формировать экспортную документацию в соответствии с регламентами стран-импортёров и интегрироваться в глобальные логистические и маркетинговые цепочки. Однако выполнение этих задач сопряжено с высокими транзакционными издержками, фрагментацией цифровых инструментов и отсутствием единой поддержки «под ключ». В результате даже мотивированные производители сталкиваются с «цифровым разрывом», глобальные цифровые практики доступны крупным агрохолдингам, но недоступны или неадаптированы для малых хозяйств.

В этом контексте искусственный интеллект (ИИ) приобретает особую значимость как технология, способная не только автоматизировать, но и персонализировать экспортное сопровождение, снижая барьеры входа для мелких производителей [5]. ИИ-решения позволяют в реальном времени сопоставлять национальные и международные стандарты, генерировать сертификационную и экспортную документацию, прогнозировать спрос и подбирать целевые рынки на основе профиля конкретного хозяйства. Более того, при интеграции с государственными реестрами (ФГИС «Меркурий», ЕГАИС, кадастр земель) и поддержке «агронавигаторов», такие системы могут реализовать принцип «нулевого барьера входа» и «беззаявочного» предоставления экспортных услуг.

Цель исследования. Выявить барьеры, ограничивающие экспортную активность малых форм хозяйствования в сфере органического сельского хозяйства, и обосновать потенциал искусственного интеллекта как инструмента цифровой трансформации, способного обеспечить персонализированное, доступное и сквозное экспортное сопровождение для повышения конкурентоспособности российской органической продукции на мировых рынках.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе междисциплинарного подхода, сочетающего методы системного анализа, сравнительного правового и институционального анализа. В работе использованы данные официальной статистики (Росстат, Минсельхоз России, FiBL, IFOAM), нормативно-правовые акты Российской Федерации и регламенты ЕС/США в области органического производства и экспорта, а также материалы международных исследований по применению ИИ в агробизнесе.

Результаты исследования. Рынок органической продукции в Российской Федерации находится на ранней стадии институционального и структурного формирования. Несмотря на это, наблюдается устойчивая тенденция к количественному росту субъектов, осуществляющих производство сертифицированной органики. По состоянию на 2025 год сегмент органического сельского хозяйства охватывает 52 субъекта Российской Федерации, в которых зарегистрировано более 1 000 наименований продукции, реализуемой через 26 розничных торговых сетей и цифровые торговые платформы [6]. Динамика численности производителей сертифицированной органической продукции представлена на рисунке 1.

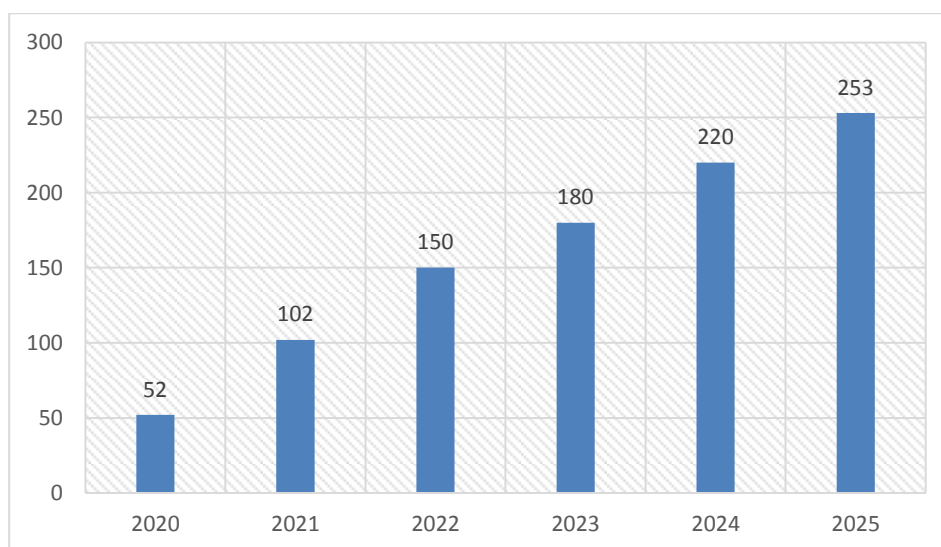


Рис. 1. Производители сертифицированной органической продукции в Российской Федерации

Fig. 1. Producers of certified organic products in the Russian Federation

Эту положительную динамику также подтверждает и устойчивый рост внутреннего спроса. Согласно данным федерального проекта «Органическое сельское хозяйство» Министерства сельского хозяйства РФ, а также исследованиям национальной системы «Роскачество» и международного агентства FiBL, совокупный объём розничных продаж сертифицированной органики в России демонстрирует среднегодовые темпы прироста на уровне 25-30 % в период 2021-2025 гг. Наибольший потребительский интерес наблюдается в категории свежих овощей и фруктов, молочной и молочносодержащей продукции, круп и детского питания, сегментов, где восприятие «чистоты» и «натуральности» играет ключевую роль в принятии решения о покупке [7]. Формирование спроса обусловлено не только ростом доходов в отдельных социально-экономических группах, но и системными изменениями в потребительском поведении: повышением уровня экологической сознательности, продовольственной грамотности, а также ростом доверия к официальной сертификации органической продукции, особенно после вступления в силу Федерального закона № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [8, 9]. Параллельно расширяется география потребления: если ранее спрос был сконцентрирован преимущественно в Москве и Санкт-Петербурге, то сегодня устойчивые рыночные ниши формируются в крупных региональных центрах, таких как Екатеринбург, Новосибирск, Казань, а также в туристически привлекательных сельских территориях, где активно развивается агротуризм и локальные фермерские рынки. Кроме того, значительную роль в стимулировании спроса играет цифровизация каналов дистрибуции: развитие специализированных онлайн-платформ (например, «Органикмаркет», «Фермер на связи»), интеграция органических брендов в крупные маркетплейсы, а также использование социальных сетей и «блогерского» маркетинга для продвижения «истории продукта» [10]. В совокупности эти факторы способствуют не только стабилизации внутреннего рынка, но и созданию предпосылок для его трансформации в экспортно-ориентированную систему, где малые формы хозяйствования могут выступать как самостоятельные субъекты международной торговли при наличии соответствующей цифровой и институциональной поддержки.

Экспорт органической продукции представляет собой стратегически значимое направление развития российского агропромышленного комплекса, обусловленное растущим глобальным спросом на экологически устойчивые и прослеживаемые продовольственные товары. На фоне усиления продовольственной безопасности и перестройки международных торговых цепочек, страны Европейского союза, Азии и Ближнего Востока проявляют повышенный интерес к импорту органики из новых регионов, включая Россию, обладающую уникальными природно-климатическими условиями и минимальным уровнем химической нагрузки на сельхозугодья [11]. При этом следует отметить, что подавляющая часть сертифицированной органической продукции в России производится именно малыми формами хозяйствования.

Несмотря на высокое качество и соответствие принципам устойчивого производства, такие предприятия сталкиваются с рядом структурных и операционных барьеров, препятствующих выходу на внешние рынки. К ним относятся:

1. **Сертификационные и нормативные барьеры.** Прохождение сертификации по стандартам ЕС (Regulation (EU) 2018/848), США (NOP USDA), Японии (JAS) или других стран требует не только соответствия строгим агротехнологическим и экологическим требованиям, но и оформления обширного пакета документации, включая карты полей, журналы использования удобрений и средств защиты растений, отчёты о прослеживаемости и аудиторские проверки. Для малых хозяйств такие процедуры сопряжены с высокими прямыми издержками (до 150-300 тыс. руб. на одну сертификацию), а также транзакционными издержками, связанными с необходимостью найма специалистов или консультантов [12].

2. **Инфраструктурные ограничения.** Международная логистика, включая холодовую цепь, фитосанитарный контроль, таможенное оформление и страхование, часто недоступна для мелких производителей в силу неэкономичности малых партий и отсутствия интеграции в кооперативные или коллективные экспортные схемы. Кроме того, участие в международных B2B-платформах (таких как BioFach, SIAL, Alibaba), использование профессиональных маркетинговых исследований и задействование глобальных каналов продвижения предполагают наличие финансовых, временных и кадровых ресурсов, которые, как правило, недоступны фермерским хозяйствам.

3. **Дефицит компетенций.** Большинство фермеров, особенно в удалённых регионах, испытывают нехватку знаний в области международного торгового права, экспортного документооборота, валютного регулирования, а также цифровых навыков, необходимых для работы с электронными торговыми площадками, системами прослеживаемости (например, blockchain-решения) и ИИ-инструментами поддержки экспорта. Отсутствие «цифровых навигаторов» на местах усугубляет изоляцию мелких производителей от глобальных рынков.

4. **Финансовые и административные издержки.** Небольшой масштаб производства затрудняет получение экспортных кредитов, страхования рисков и участия в государственных программах поддержки, которые зачастую адаптированы под крупных экспортеров и требуют сложной отчётности [13].

В этих условиях создание комплексной, технологически оснащённой экспортной экосистемы, ориентированной на поддержку именно мелких производителей, выходит за рамки рыночной целесообразности и приобретает характер институционального императива, направленного на интеграцию российской органики в глобальные устойчивые цепочки

поставок. Для наглядного сравнения возможностей и ограничений разных типов субъектов в экспортной деятельности представлена таблица 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ экспортного потенциала крупных агрохолдингов и малых форм хозяйствования в секторе органического сельского хозяйства
Table 1. Comparative analysis of the export potential of large agricultural holdings and small farms in the organic agriculture sector

Критерий	Крупные агрохолдинги	Малые формы хозяйствования (КФХ, ЛПХ, кооперативы)
Доступ к сертификации	Имеют внутренние отделы по качеству и соответствию; могут проходить несколько сертификаций одновременно	Зависят от внешних консультантов; часто ограничены одной национальной сертификацией
Финансовые ресурсы	Способны нести высокие издержки на экспортную инфраструктуру и маркетинг	Ограничены в капитале; не могут формировать экономически целесообразные экспортные партии
Цифровая зрелость	Интегрированы в ERP-, CRM- и логистические системы; используют ИИ и аналитику	Используют базовые цифровые инструменты (соцсети, мессенджеры); низкий уровень цифровой грамотности
Доступ к логистике и дистрибуции	Имеют собственные или партнёрские каналы экспорта, включая морские/ж/д контракты	Зависят от посредников; высокая стоимость логистики на единицу продукции
Экспортная компетентность	Штатные специалисты по международной торговле, юристы, лингвисты	Отсутствие профильных кадров; слабая информированность о требованиях стран-импортёров
Гибкость и аутентичность продукта	Стандартизированная продукция; сложнее позиционировать как «локальную» или «традиционную»	Высокая ценность аутентичности и устойчивого производства

Таким образом, несмотря на конкурентные преимущества в качестве и экологичности, малые производители органики оказываются в структурно неравных условиях по сравнению с крупными игроками, что подчёркивает необходимость целенаправленной институциональной и технологической поддержки именно этого сегмента.

Для преодоления системных барьеров, ограничивающих экспортную активность малых форм хозяйствования в органическом секторе, предлагается создание единой национальной цифровой платформы с элементами искусственного интеллекта, ориентированной на сквозное сопровождение фермеров на всех этапах экспортного цикла, от подготовки к сертификации до выхода на целевые международные рынки. Такая платформа призвана не просто автоматизировать отдельные операции, но сформировать интегрированную экспортную экосистему, в которой ИИ выступает в роли персонализированного ассистента,

адаптирующего глобальные требования к возможностям и контексту конкретного малого производителя. За счёт интеграции с государственными информационными системами (ФГИС «Меркурий», ЕГАИС, Росреестр, Госуслуги), открытыми базами международных стандартов и внешними сервисами (логистические операторы, торговые площадки, банки), платформа сможет минимизировать транзакционные издержки, устранить информационную асимметрию и обеспечить «безбарьерный» доступ к инструментам международной торговли даже для фермеров с низким уровнем цифровой и экспортной грамотности.

Предлагаемая платформа разрабатывается как государственно-частная цифровая инфраструктура общего пользования с открытым API и модульной архитектурой. Её ядро формируется на базе Министерства сельского хозяйства РФ при участии Минцифры, Минэкономразвития и Россельхознадзора, с возможностью подключения региональных органов власти, сертификационных органов, логистических компаний, банков и ИТ-разработчиков. Основная цель платформы – обеспечить персонализированное и сквозное сопровождение малого производителя органики от «поля до прилавка» на международном рынке.

Платформа включает следующие ключевые функциональные модули:

Модуль «ИИ-ассистент по экспортной сертификации и соответствию стандартам». На основе данных о хозяйстве (локация, тип культуры, история агротехнологий, используемые удобрения и средства защиты растений), загруженных вручную или полученных через интеграцию с ГИС «Органика» и ФГИС «Меркурий», ИИ-модель сопоставляет текущие практики с требованиями целевых экспортных рынков (ЕС, США, ОАЭ, Китай и др.). Система автоматически формирует «дорожную карту соответствия», генерирует необходимые сертификационные документы (журналы полевых работ, декларации происхождения, отчёты по севообороту) и предупреждает о рисках несоответствия в режиме реального времени [14].

Модуль персонализированного экспортного маркетинга. ИИ анализирует профиль продукции (объём, сезонность, география производства, наличие специальных характеристик) и сопоставляет его с данными о спросе на международных B2B-платформах, тенденциями потребления и импортными регулированиями. В результате фермер получает рекомендации по целевым рынкам, потенциальным покупателям, ценовым диапазонам и форматам поставок (оптовые партии, розничные партии, продукция для участия в специализированных выставках). Возможна автоматическая генерация экспортного описания продукта на нужных языках с учётом культурных и нормативных особенностей.

Модуль «Цифровой кооперативный матчмейкинг» Для преодоления проблемы неэкономичности мелких партий платформа включает функцию кооперации: мелкие производители могут объединяться во временные или постоянные экспортные кооперативы по географическому, товарному или логистическому принципу. ИИ предлагает подходящих партнёров для совместной сертификации, логистики, упаковки и брендинга, а также автоматически рассчитывает долю каждого участника в совокупных издержках и доходах. Такие объединения могут получать приоритет в получении государственной поддержки (например, субсидий на логистику или участие в международных выставках).

«Логистико-финансовый модуль» Платформа агрегирует предложения доверенных логистических операторов, экспортных страховых компаний и банков, предлагающих специализированные продукты (экспортные гарантии, валютные хеджи). ИИ на основе маршрута, объёма и типа груза подбирает оптимальный логистический сценарий с расчётом

стоимости, сроков и рисков. Одновременно система оценивает кредитоспособность хозяйства и предлагает доступные финансовые инструменты, включая механизмы «без-заявочного» предоставления господдержки на экспорт.

Модуль «Цифровой экспортный агронавигатор» Встроенный адаптивный обучающий модуль предоставляет короткие интерактивные курсы, чек-листы и симуляторы («Как пройти органическую сертификацию по стандарту ЕС?», «Как оформить фитосанитарный сертификат?», «Как вести переговоры с иностранным покупателем?»), автоматически адаптируясь под уровень знаний пользователя. Для фермеров с низкой цифровой зрелостью предусмотрена поддержка «агронавигаторов», обученных специалистов, оказывающих офлайн-сопровождение через муниципальные центры развития сельских территорий [15].

Реализация такой концепции единой ИИ-платформы поддержки экспорта органической продукции требует не только технической реализуемости, но и четкой проработки пользовательского сценария, ориентированного на реальные потребности и ограничения малых форм хозяйствования. В отличие от традиционных цифровых решений, предполагающих высокий уровень цифровой зрелости пользователя, предложенная платформа строится на принципах персонализации и «безбарьерного» входа, обеспечивая сквозное сопровождение от первичной диагностики до завершения экспортной сделки. Ниже представлен типовой сценарий взаимодействия фермера с системой от момента первого обращения до выхода на международный рынок.

Этап 1. Формирование цифрового профиля хозяйства

Работа платформы начинается с момента первого обращения фермера/малого хозяйства. Процесс организован по принципу «нулевого входного барьера»: пользователь может зарегистрироваться через портал Госуслуг, либо с помощью «агронавигатора» в муниципальном центре поддержки. После авторизации система автоматически агрегирует данные из открытых и разрешённых государственных источников о предприятии:

- из ЕГРЮЛ/ЕГРИП – статус, ОКВЭД, дата регистрации;
- из Росреестра – информация о земельных участках (площадь, категория, вид использования);
- из ФГИС «Меркурий» – данные о производимой продукции, направлениях животноводства/растениеводства;
- из налоговой отчётности (ФНС) – объёмы выручки, применяемые режимы налогообложения.

Фермер дополняет профиль вручную: указывает культуру или продукцию, которую планирует экспортировать (например, название или преимущественные характеристики, возможно даже фото или видео своей продукции), сезонность сбора, примерные объёмы, наличие органической сертификации по российскому стандарту, а также предпочтения по целевым рынкам (если они есть).

Этап 2. Диагностика экспортной готовности.

На основе сформированного профиля ИИ-модуль запускает автоматическую диагностику экспортного потенциала. Система сопоставляет параметры хозяйства с требованиями выбранных (или наиболее релевантных) стран-импортёров. Результат – персонализированный отчёт, включающий:

- перечень необходимых сертификатов и стандартов;

- список несоответствий (например, «в журнале полевых работ отсутствуют записи о севообороте за последние 3 года – требуется дополнение для соответствия сертификации страны импортера)
- оценку финансовых и временных затрат на подготовку к экспорту.

Этап 3. Персонализированное сопровождение

Платформа формирует индивидуальный экспортный маршрут. Фермер получает:

- пошаговую инструкцию с гиперссылками на нужные сервисы (например, «подать заявку на сертификацию в аккредитованный орган»);
- предварительно заполненные шаблоны документов (декларация происхождения, журнал органического производства);
- доступ к модулю обучения: короткий курс «Как подготовиться к аудиту по стандарту ЕС» с интерактивными тестами;
- уведомление о возможности получить субсидию на сертификацию – с автоматической подачей заявки по принципу «без заявления» на основе имеющихся данных.

Этап 4. Кооперация и масштабирование

Если объём продукции фермера недостаточен для экономически целесообразной поставки, платформа предлагает создать или присоединиться к экспортному кооперативу. ИИ подбирает других производителей из того же региона с совпадающими культурами и сроками уборки, рассчитывает оптимальный объём партии, логистический маршрут и распределение издержек. Группа может совместно заказать аудит, оформить общий бренд и подать коллективную заявку на участие в международной выставке.

Этап 5. Выход на рынок и постэкспортное сопровождение

После завершения подготовки фермер получает доступ к экспортному маркетплейсу, интегрированному с платформой, где может:

- разместить продукцию с сертификатами, фото, геопривязкой и историей производства;
- получить рекомендации по потенциальным покупателям (ритейлеры/дистрибьюторы);
- оформить логистику через партнёрские компании с автоматическим расчётом стоимости и субсидированием «последней мили»;
- подключить экспортное страхование и финансирование.

После первой поставки система продолжает мониторинг: анализирует отзывы покупателей, отслеживает изменения в законодательстве стран-импортёров и предлагает корректировки, например, обновление упаковки в соответствии с новыми маркировочными требованиями ЕС.

Таким образом, платформа трансформирует сложный, фрагментированный и ресурсоёмкий процесс экспорта в линейный, автоматизированный и поддерживаемый путь, в котором фермер выступает не как изолированный субъект, а как участник технологически и институционально обеспеченной экспортной экосистемы. Представленная архитектура является «рабочим прототипом», который может и будет гибко адаптироваться под выявленные в ходе пилотного внедрения потребности производителей, изменения в международном регулировании или возникающие рыночные вызовы. При необходимости могут быть интегрированы дополнительные модули или скорректированы существующие алгоритмы, в рамках принципа «живой платформы», ориентированной на постоянное совершенствование через обратную связь от пользователей и внешнюю среду.

Реализация предложенной платформы генерирует синергетический эффект, охватывающий не только непосредственных производителей органической продукции, но и широкий круг заинтересованных сторон, от государственных органов до международных импортёров (таблица 2.).

Таблица 2. Эффекты и преимущества при внедрении цифровой ИИ-платформы в экспорт органической продукции

Table 2. Effects and benefits of implementing a digital AI platform for organic exports

Участник экосистемы	Ключевые выгоды от внедрения ИИ-платформы
Малые фермерские хозяйства	Снижение барьеров выхода на экспорт; персонализированное сопровождение; доступ к кооперации, логистике и финансированию; повышение экспортной выручки
Сертификационные органы	Стандартизация входных данных; сокращение времени на аудит; повышение качества проверок; рост доверия к результатам
Банки и страховые компании	Доступ к предварительно верифицированным экспортным проектам; снижение кредитных и страховых рисков; стимул к созданию специализированных финансовых продуктов
Логистические операторы	Формирование объединённых партий через кооперативный матчмейкинг; предсказуемость объёмов; снижение издержек на «последнюю милю»
Государственные органы	Автоматизация предоставления мер поддержки; прозрачность мониторинга экспортной активности; повышение эффективности государственной политики в АПК
Международные покупатели	Достоверная информация о происхождении и качестве продукции; соответствие международным стандартам; упрощённый доступ к новым поставщикам
Потребители (конечные)	Уверенность в подлинности органической маркировки; поддержка устойчивого и этичного сельского хозяйства за пределами своей страны

Таким образом, платформа выступает не просто цифровым сервисом, а катализатором создания совместной ценности в экосистеме органического экспорта, где интересы всех участников выравниваются за счёт технологической прозрачности, институциональной поддержки и интеллектуальной координации.

Выводы. Рынок органической продукции в России демонстрирует устойчивый рост, однако подавляющее большинство производителей (в основном малые формы хозяйствования) не могут выйти на экспорт из-за системных барьеров: высокой стоимости сертификации, недостатка экспортной и цифровой компетентности, отсутствия доступа к логистике, финансированию и маркетингу. Анализ показал, что крупные агрохолдинги обладают значительными преимуществами в этих областях, в то время как мелкие производители остаются изолированными от глобальных рынков, несмотря на высокое качество и экологичность продукции.

Для преодоления этого разрыва предложена единая цифровая платформа с искусственным интеллектом, обеспечивающая сквозное и персонализированное сопровождение фермера от формирования цифрового профиля до выхода на международный рынок. Платформа минимизирует транзакционные издержки, автоматизирует соответствие международным стандартам, стимулирует кооперацию и интегрирует государственную поддержку по принципу «без заявления». Тем самым она выступает не просто как технический инструмент, а как институциональный механизм выравнивания условий конкуренции, делая экспорт органической продукции доступным для любого соответствующего стандартам мелкого производителя. Ключевая инновационная ценность решения заключается в синтезе цифровых технологий (ИИ, интеграция с государственными органами, адаптивное обучение) и институциональных механизмов (агронавигаторы, кооперативный матчмейкинг, автоматизированная господдержка), что обеспечивает не только техническую, но и социальную включённость мелких производителей в глобальные устойчивые цепочки поставок. При этом архитектура платформы задумана как «живая» и масштабируемая и ориентированная на постоянную адаптацию под меняющиеся рыночные и регуляторные условия.

Таким образом, реализация подобной платформы способна стать катализатором не только экспортного роста российской органики, но и более широкой трансформации аграрной политики в направлении цифровой инклюзии, устойчивого развития сельских территорий и повышения международной конкурентоспособности отечественного агропромышленного комплекса на основе принципов экологической ответственности и цифровой справедливости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кузнецова А. В. Концепция развития рынка органической продукции // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. 2024. № 1. С. 96-99. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67234276>
2. Токова Л. Р. Оценка состояния экспорта продукции сельского хозяйства Российской Федерации // Студенческий. 2024. № 1-8(255). С. 65-67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59551331>
3. Федоренко В.Ф., Брюханов А.Ю., Захаров А.М., Мурзаев Е.А. Концептуальные основы развития органического производства сельскохозяйственной продукции // Техника и оборудование для села. 2024. № 1 (319). С. 2-7. EDN: GOPCAQ
4. Захаров А.М., Устроев А.А., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д. Методы проектирования технологий органического производства продукции растениеводства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19. № 1. С. 13-21. EDN: EOWTQK
5. Минин В.Б., Захаров А.М. Задачи и структура информационно-коммуникационной системы «умного» органического хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15. № 4. С. 56-64. EDN: WXRMBN
6. Кондратьева О. В., Слинко О. В., Полухин А. А. и др. Анализ производственной инфраструктуры и передовых практик продвижения органической продукции на внутреннем рынке: Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2025. 96 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82856912>
7. Воронин Б. А., Воронина Я. В., Малыш А. А., Макаров А. М. Экономико-правовые проблемы производства органической продукции в АПК современной России //

Международный правовой курьер. 2024. № 3. С. 79-82. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68732309>

8. Евдокимова Н.А., Захаров А.М., Максимов Д.А., Минин В.Б., Мурзаев Е.А., Перекопский А.Н., Соловьев Я.С., Устроев А.А. Технологии органического производства сельскохозяйственной продукции растениеводства в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: ИАЭП – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. 2021. 140 с. EDN: PAEYSH

9. Новикова И.И., Захаров А.М., Минин В.Б., Максимов Д.А., Титова Ю.А., Устроев А.А., Хютти А.В., Мурзаев Е.А. Биологизация производства картофеля в условиях Северо-Западного региона РФ. СПб.: ФНАЦ ВИМ. 2024. 156 с. EDN: MYWYLD

10. Ползиков Д. А., Алещенко В. В. О стратегии развития производства органической продукции в Российской Федерации до 2030 года // Проблемы прогнозирования. 2024. № 4(205). С. 149-165. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-205-149-165>

11. Войтюк В. А., Слинько О. В., Кондратьева О. В. и др. Исследование перспективных направлений экспортных поставок отечественной органической продукции: Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2025. 116 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=86436158>

12. Полухин А. А., Кондратьева О. В., Слинько О. В. и др. Анализ нормативно-правового регулирования и мер государственной поддержки развития органического сельского хозяйства: Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2025. 80 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=86436156>

13. Адеев В. Д. Меры повышения конкурентоспособности органической продукции в сфере российского аграрно-промышленного комплекса (АПК) // Инновации и инвестиции. 2025. № 3. С. 338-342. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=81477748>

14. Коренюгина Л. М., Ступина А. А. Использование искусственного интеллекта в информационной поддержке реализации продукции АПК регионов // Приоритетные направления развития регионального экспорта продукции АПК: Матер. межд. науч.-практ. конф. Красноярск, 16-17 ноября 2023 г.) Красноярск: Красноярский ГАУ. 2024. С. 60-62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59888380>

15. Петрова Т. Н., Улыбина Л. В. Теоретические основы информационных технологий и искусственного интеллекта и их роль в функционировании АПК // Молодежь и инновации: Матер. XX Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (Чебоксары, 18 марта 2024 г.). Чебоксары: Чувашский ГАУ. 2024. С. 415-417. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65598888>

REFERENCES

1. Kuznetsova A.V. Concept of organic product market development. Vestnik molodezhnoi nauki altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Youth Science of the Altai State Agrarian University. 2024;1:96-99. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67234276>

2. Tokova L. R. Assessment of the export status of agricultural products of the Russian Federation. Studencheskiy = Scientific Journal of Students. 2024;1-8(255):65-67. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59551331>

3. Fedorenko V.F., Bryukhanov A.Yu., Zakharov A.M., Murzaev E.A. Conceptual basis for the development of organic agricultural production. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2024;1 (319): 2-7. (In Russ.) EDN: GOPCAQ

4. Zakharov A.M., Ustroev A.A., Murzaev E.A., Komoedov A.D. Methods for designing technologies of organic crop production. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(1): 13-21. (In Russ.) EDN: EOWTQK
5. Minin V.B., Zakharov A.M. Objectives and structure of the information and communication system for “smart” organic farming. *Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2021;15 (4): 56-64. (In Russ.) EDN: WXRMBN
6. Kondratieva O. V., Slinko O. V., Polukhin A. A. et al. Analysis of production infrastructure and best practices for promoting organic products on the domestic market: An analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 96 p. (In Russ.) URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=82856912>
7. Voronin B. A., Voronina Ya. V., Malyshev A. A., Makarov A.M. Economic and legal problems of organic production in the agro-industrial complex of modern Russia. *Mezhdunarodnyi pravovoi kur'er = International Legal Courier*. 2024;3:79-82. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68732309>
8. Evdokimova N.A., Zakharov A.M., Maksimov D.A., Minin V.B., Murzaev E.A., Perekopsky A.N., Soloviev Ya. S., Ustroev A.A. Technologies of organic production of farm crops under conditions of the North-West Region of the Russian Federation. Saint Petersburg: IEEP – branch of FSAC VIM. 2021. 140 p. (In Russ.) EDN: PAEYSH
9. Novikova I.I., Zakharov A.M., Minin V.B., Maksimov D.A., Titova Yu.A., Ustroev A.A., Hyutti A.V., Murzaev E.A. Biologization of potato production in the North-Western region of the Russian Federation. Saint Petersburg: FSAC VIM. 2024. 156 p. (In Russ.) EDN: MYWYLD
10. Polzikov D. A., Aleshchenko V. V. On the development strategy for the production of organic products in the Russian Federation until 2030. *Studies on Russian Economic Development*. 2024;35 (4): 575-588. (In Eng.) <https://doi.org/10.1134/S1075700724700035>
11. Voityuk V. A., Slinko O. V., Kondratieva O. V. et al. Research of promising areas of export supplies of domestic organic products: Analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 116 p. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=86436158>
12. Polukhin A. A., Kondratieva O. V., Slinko O. V. et al. Analysis of regulatory and legal regulation and measures of state support for the development of organic agriculture: Analytical review. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 80 p. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=86436156>
13. Adeev V. D. Measures to increase the competitiveness of organic products in the sphere of the Russian agrarian-industrial complex (AIC). *Innovacii i investicii = Innovation & Investment*. 2025;3:338-342. (In Russ.) URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=81477748>
14. Korenyugina L. M., Stupina A. A. Use of artificial intelligence in information support for the sales of regional agricultural industrial products. In: *Priority Areas for the Development of Regional Exports of Agricultural Products*. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Krasnoyarsk 16-17 November 2023). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. 2024: 60-62. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59888380>
15. Petrova T. N., Ulybina L. V. Theoretical foundations of information technology and artificial intelligence and their role in the functioning of the agrarian industry. In: *Youth and Innovation: Proc. XX All-Russian (National) Sci. Prac. Conf. of young scientists, postgraduates and students* (Cheboksary, 18 March 2024). Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. 2024: 415-417. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65598888>

Об авторе:	About the author:
Войтюк Вячеслав Александрович	Vyacheslav A. Voityuk

канд. экон. наук, ведущий научный сотрудник отдела прогнозно-аналитической информации и консультационного обеспечения, председатель Совета молодых ученых ФГБНУ «Росинформагротех». 141261, Московская область, г. о. Пушкинский, р. п. Правдинский, ул. Лесная д. 60 Bovver71@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9136-3795 +7-985-164-86-94	Candidate of Economic Sciences, leading researcher, Department of Predictive and Analytical Information and Consulting Support, Chairman of Young Scientists and Specialists Council at Rosinformagrotech. 141261, Moscow Region, Urban District Pushkinsky, Industrial Township Pravdinsky, Lesnaya Str., 60 Bovver71@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9136-3795 +7-985-164-86-94
Заявленный вклад автора Автор выполнил весь проект	Author's contribution Single author article - the author completed all the project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The author declare that there is no conflict of interest
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации.	The author has read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 15.01.2026	Received: 15.01.2026
Одобрена после рецензирования: 30.01.2026	Approved after reviewing: 30.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

Научная статья
УДК 631.032

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-34-46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА АПК

Юлия Владимировна Даус^{1✉}, Евгений Евгеньевич Рудь², Сергей Николаевич Харченко³

Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар,
Россия

¹ zirochka2505@gmail.com, 0000-0001-9120-7637

² eugene.rud@yandex.ru, 0009-0000-9779-5564

³ ser.harchenko1995@yandex.ru, 0009-0004-8861-4011

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме определения экономически целесообразной мощности фотоэлектрических энергоустановок для объектов агропромышленного комплекса. Актуальность темы обусловлена необходимостью снижения растущих затрат на электроэнергию, повышения энергетической независимости сельскохозяйственных предприятий и выполнения экологических требований при выращивании и переработке сельскохозяйственной продукции. Целью исследования является определение минимальной установленной мощности фотоэлектрической энергоустановки, при которой её интеграция в систему электроснабжения объекта АПК становится экономически выгодной. Методы исследования включают технико-экономический анализ на основе системы взаимосвязанных показателей: капитальных и эксплуатационных затрат, себестоимости электроэнергии и срока окупаемости. Критерием эффективности является одновременное выполнение двух условий: себестоимость выработанной электрической энергии энергоустановкой должна быть ниже или равна сетевому тарифу, а срок окупаемости – не превышать нормативный срок (8 лет). Объектом исследования выступил один из потребителей перерабатывающего завода. Анализировались различные конфигурации гибридной фотоэлектрической энергоустановки, работающей параллельно с сетью с использованием аккумуляторов. Результаты показали нелинейную зависимость экономических показателей от мощности энергоустановки. Установлено, что минимальная экономически выгодная мощность составляет 0,6 кВт (себестоимость 6,4 руб/кВт·ч, срок окупаемости 7,6 лет). Оптимальной с точки зрения эффективности является мощность 1,4 кВт, обеспечивающая наименьшую себестоимость (4,9 руб/кВт·ч) и срок окупаемости (5,9 лет). Дальнейшее увеличение мощности до 1,6 кВт ведет к ухудшению экономических показателей из-за скачкообразного роста капитальных затрат. Разработанный методический подход имеет практическую значимость для обоснованного принятия решений по внедрению солнечной генерации на объектах АПК.

Ключевые слова: фотоэлектрическая энергоустановка, объект АПК, себестоимость вырабатываемой электрической энергии

Для цитирования: Даус Ю.В., Рудь Е.Е., Харченко С.Н. Определение экономически выгодной мощности фотоэлектрической энергоустановки для электроснабжения объекта АПК // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1(126). С. 34-46 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-34-46>

Research article

Universal Decimal Code 631.032

DETERMINING THE LEAST ECONOMICALLY VIABLE CAPACITY OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT FOR SUPPLYING AN AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX FACILITY

Yuliya V. Daus^{1✉}, Evgeny E. Rud², Sergey N. Kharchenko³

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

¹zirochka2505@gmail.com, 0000-0001-9120-7637

²eugene.rud@yandex.ru, 0009-0000-9779-5564

³ser.harchenko1995@yandex.ru, 0009-0004-8861-4011

Abstract. The article addresses an important problem of determining the economically feasible capacity of photovoltaic power plants for agro-industrial complex facilities. The topic's relevance is driven by the need to reduce the growing electricity costs, enhance the energy independence of agricultural enterprises, and meet environmental requirements in the cultivation and processing of agricultural products. The research aimed to determine the minimum installed capacity of a photovoltaic power plant at which its integration into the power supply system of an agro-industrial complex facility became economically viable. Research methods included technical and economic analysis based on a system of interrelated indicators. These were capital and operating costs, the self-cost of electricity, and the payback period. The efficiency criterion was the simultaneous fulfillment of two conditions. First, the cost of electricity generated by the power plant must be lower than or equal to the grid tariff. Second, and the payback period must not exceed the standard period of 8 years. The study object was one of the consumers at a processing plant. The study analyzed various configurations of a hybrid photovoltaic power plant operating in parallel with the grid using batteries. The results showed a non-linear dependence of economic indicators on the power plant's capacity. The study found that the minimum economically viable capacity was 0.6 kW (under the self-cost of 6.4 RUB/kWh, and the payback period of 7.6 years). The optimal capacity in terms of efficiency was 1.4 kW, providing the lowest self-cost of 4.9 RUB/kWh and the payback period of 5.9 years. A further increase in capacity to 1.6 kW leads to a deterioration in economic performance due to a jump in capital costs. The developed methodological approach has practical significance for making informed decisions on the implementation of solar power generation at the facilities of the agro-industrial complex.

Keywords: photovoltaic power plant, agro-industrial complex facility, cost of generated electricity

For citation: Daus Yu.V., Rud E.E., Kharchenko S.N. Determining the least economically viable capacity of a photovoltaic power plant for supplying an agro-industrial complex facility. *AgroEcoEngineering*. 2026; 1(126): 34-46 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-34-46>

Введение. Актуальность внедрения возобновляемых источников энергии, в частности солнечных фотоэлектрических установок, в систему энергоснабжения агропромышленного комплекса обусловлена постоянным ростом тарифов на электрическую энергию, необходимостью повышения энергетической независимости сельскохозяйственных предприятий и выполнением требований в области экологической безопасности. Экономическая эффективность таких проектов является ключевым фактором, определяющим целесообразность их реализации. В прошлом стоимость производства электроэнергии на фотоэлектрических станциях была относительно высокой, однако благодаря непрерывному технологическому прогрессу, направленному на снижение стоимости фотоэлектрических модулей и других компонентов систем, а также за счет государственной поддержки, конкурентоспособность солнечной энергетики значительно возросла. Исследования в данной области охватывают широкий спектр вопросов: от анализа технологий и затрат до моделей субсидирования, и методик технико-экономических расчетов.

Частью экономического обоснования локальной генерации электрической энергии фотоэлектрической установкой является определение организационных особенностей подключения системы к энергосистеме [1, 2]. Задача организации подключения фотоэлектрической установки к электрической сети затрагивает интересы ряда субъектов: электросетевой компании, органов власти, субъектов оперативно-диспетчерского управления, собственников генерирующего объекта [3, 4]. С экономической точки зрения существует два основных варианта организации подключения фотоэлектрической установки к сети: регулируемая модель и самоокупаемая модель [5, 6]. Целью эксплуатации первого варианта модели является преобразование максимального ресурса солнечной энергии с учетом

территориальных особенностей ограничений сети в месте размещения фотоэлектрической станции [7-9]. Для реализации второй модели привлекается частный инвестиционный капитал для строительства локальных объектов генерации с целью снижения затрат на оплату за потребленную электрическую энергию [10-11]. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации от 23 января 2015 г. № 47 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам стимулирования использования возобновляемых источников энергии на розничных рынках электрической энергии» при возможности обеспечения высокого уровня реализации ресурса солнечной энергии на территории предприятия, где устанавливается фотоэлектрическая установка, в результате чего выработка электрической энергии превышает потребление согласно механизму поддержки строительства генерирующих объектов на базе возобновляемых источников энергии и их функционирования на розничном рынке электрической энергии возможно организовать приоритетную закупку излишков электрической энергии электросетевыми компаниями для компенсации потерь мощности по фиксированной цене при установленной мощности таких систем до 15 МВт. Кроме того, такой подход потребует решения вопроса технологического подключения источника генерации к единой электроэнергетической сети, что потребует его соответствия её требованиям и дополнительных затрат средств на присоединение [12].

Несмотря на значительный объем существующих исследований, практическое определение минимальной мощности солнечной установки, при которой ее интеграция в конкретную систему электроснабжения объекта АПК становится экономически выгодной, требует разработки четкого методического подхода, учитывающего специфику нагрузки потребителя, локальные тарифы на электрическую энергию и ресурс солнечной энергии места размещения потребителя.

Целью настоящего исследования является определение минимальной экономически выгодной установленной мощности фотоэлектрических энергоустановок установок при их интеграции в систему электроснабжения объекта АПК.

Материалы и методы исследования. В качестве исходной информации для проведения расчетов использовались параметры, типичные для сельскохозяйственного энергопотребления: характерный профиль нагрузки объекта, показатели солнечной инсоляции в регионе размещения, актуальные тарифы на сетевую электроэнергию и нормативный период возврата инвестиций, установленный для энергетических проектов на уровне 8 лет. Анализ эффективности внедрения генерирующих мощностей проводился на основе системы взаимосвязанных экономических индикаторов, включающей объем первоначальных инвестиций (K , тыс. руб.), ежегодные эксплуатационные расходы (I , тыс. руб.), себестоимость производимой электроэнергии (β , руб/кВт·ч) и расчетный период окупаемости проекта ($T_{ок}$, лет).

Себестоимость электроэнергии представляет собой показатель, отражающий все аспекты производственно-хозяйственной деятельности – от амортизации основных фондов до затрат на оплату труда и страховых отчислений. Этот показатель служит ключевым инструментом для анализа рентабельности и оптимизации работы генерирующего объекта на всех стадиях его жизненного цикла.

Ключевой задачей технико-экономического обоснования является определение порогового значения мощности фотоэлектрической энергоустановки, при котором достигается экономическая целесообразность её включения в существующую систему энергоснабжения.

Критерий экономической эффективности формулируется как система взаимосвязанных условий:

$$\begin{cases} b \leq b_T \\ T_{\text{ок}} \leq T_{\text{норм}} \end{cases},$$

где соблюдение первого условия гарантирует экономическую целесообразность выработки энергии по сравнению с сетевыми тарифами, а выполнение второго условия обеспечивает возврат инвестиций в установленные нормативные сроки.

Стоимость технологического оборудования с учетом сопутствующих расходов выражается следующей зависимостью [13]:

$$K = \sum_{i=1}^m (k_{\text{тр}} \cdot k_{\text{мппр}} \cdot C_{\text{об}})_i,$$

где $C_{\text{об}}$ представляет отпускную цену единицы оборудования, $k_{\text{тр}}$ – коэффициент транспортно-логистических издержек, а $k_{\text{мппр}}$ учитывает затраты на монтажные и пусконаладочные работы.

Эксплуатационная составляющая затрат формируется под влиянием нескольких факторов:

$$И = ЗП + З_{\text{ОБ}} + \sum_i^m \left(\frac{a_i + p_i}{100} \cdot K_i \right),$$

где ЗП отражает расходы на персонал, $Z_{\text{ОБ}}$ – общепроизводственные накладные расходы, а коэффициенты a_i, p_i определяют соответственно нормы амортизационных отчислений и затрат на техническое обслуживание и ремонтные работы.

Период возврата капиталовложений:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{W \cdot \beta_3}.$$

Таким образом, методика основывается на комплексном учете характеристик энергопотребления объекта, климатических особенностей локации, тарифных условий на оптовом рынке электроэнергии и нормативных требований к эффективности капиталовложений.

Объект исследования. Один из потребителей действующего объекта АПК – перерабатывающий завод «Сорго» в Ростовской области. График нагрузки по сезонам потребителя и его план с размерами и ориентацией представлены на рисунке 1.

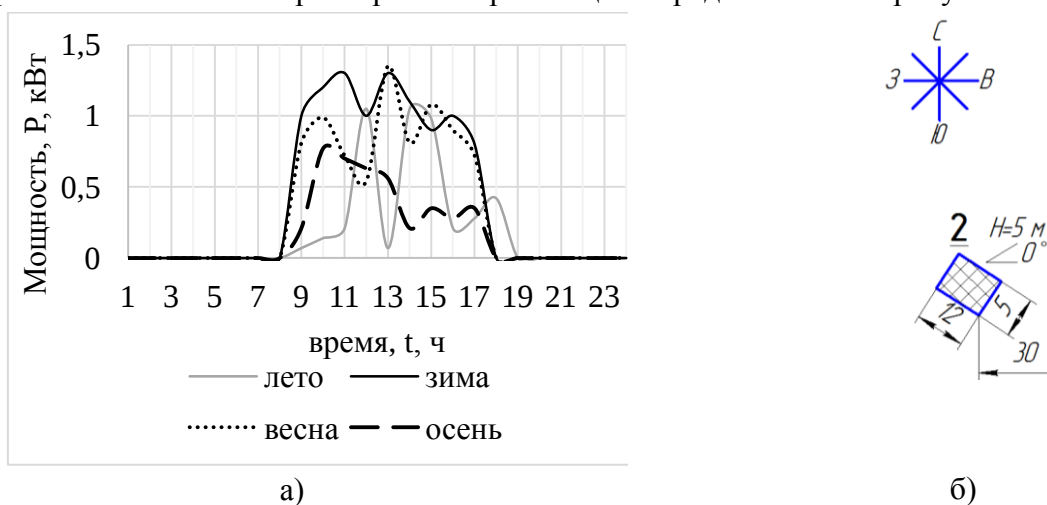


Рис. 1. График нагрузки (а) и план, ориентация здания (б) потребителя на территории объекта АПК

Fig. 1. Load schedule (a) and plan, orientation of the building (b) of the consumer on the territory of the agro-industrial complex facility

Результаты и их обсуждение. Результаты выполненных расчетов для гибридной фотоэлектрической энергоустановки, функционирующей в режиме параллельной работы с сетью и с использованием системы аккумулирования энергии для электроснабжения рассматриваемого объекта, выявили зависимость между установленной мощностью генерирующего оборудования и его экономическими характеристиками. Анализ демонстрирует, что экономические показатели проекта существенным образом определяются номинальной мощностью фотоэлектрической энергоустановки. При этом установлена нелинейная зависимости экономической эффективности от масштаба генерирующей системы, проявляющаяся в различной динамике изменения капитальных и эксплуатационных затрат при наращивании мощности. Полученные данные свидетельствуют о наличии оптимального диапазона мощностей, что подтверждается сопоставительным анализом себестоимости вырабатываемой электроэнергии и сроков окупаемости капиталовложений для различных конфигураций системы.

Для примера при моделировании состава фотоэлектрической энергоустановки использовано следующее оборудование: фотоэлектрические модули типа ФСМ-200, аккумуляторные батареи НМ-12-150, инверторы SILA V^{1 2 3}.

Максимальное количество модулей ФСМ-200, которые можно установить ограждающих конструкциях здания – 8 шт. ($P_{ФЭС} = 1,6$ кВт). В таблице приведены следующие технико-экономические показатели по различным вариантам мощности фотоэлектрической энергоустановки мощностью от 0,2 кВт до 1,6 кВт с шагом 0,2 кВт (мощность одного модуля): установленная мощность фотоэлектрической энергоустановки $P_{ФЭС}$, кВт; годовая выработка электрической энергии W , кВт·ч; капитальные вложения K , тыс. руб.; годовые издержки I , тыс.руб., себестоимость выработанной электрической энергии β , руб./кВт·ч; срок окупаемости $T_{ок}$, лет.

Таблица. Техничко-экономические показатели фотоэлектрической энергоустановки при различной её мощности с учетом графика нагрузки потребителя

Table. Technical and economic indicators of a photovoltaic power plant with different capacities, taking into account the consumer load schedule

$P_{ФЭС}$, кВт	W , кВт·ч	K , тыс. руб.	I , тыс.руб.	$T_{ок}$, лет	β , руб./кВт·ч
0,2	538,44	76,43	9,1	16,6	16,8
0,4	1076,88	90,45	9,7	9,8	9,0
0,6	1615,31	104,48	10,3	7,6	6,4
0,8	2153,75	144,78	15,8	7,9	7,3
1	2692,19	158,81	16,5	6,9	6,1

¹ Научно-производственное предприятие «Квант» [Электронный ресурс] URL: <http://npp-kvant.ru/> (дата обращения 01.10.2025)

² Компания «Greenenergo» [Электронный ресурс] URL: https://reenergo.ru/product-category/inverter/?filter_brend=sila (дата обращения 01.10.2025)

³ Компания «Парус электро» [Электронный ресурс] URL: https://parus-electro.ru/catalog/battery/hm_12_150/ (дата обращения 01.10.2025)

1,2	3230,63	177,21	17,8	6,4	5,5
1,4	3769,06	191,23	18,4	5,9	4,9
1,6	4307,50	231,54	23,9	6,3	5,5

Капитальные затраты растут с увеличением мощности скачкообразно. Наиболее существенный скачок наблюдается при переходе с 0,6 кВт на 0,8 кВт, где затраты увеличились с 104,48 до 144,78 тыс. руб., и с 1,4 кВт на 1,6 кВт, где они выросли с 191,23 до 231,54 тыс. руб. Эти скачки, вероятно, связаны с необходимостью замены или добавления основного оборудования, такого как инвертор или блок аккумуляторных батарей, на более мощные и соответственно дорогостоящие модели.

Действующий тариф (по 1-й ценовой категории (менее 670 кВт) НН) составляет 8,3 руб/кВт·ч. При минимальной рассматриваемой мощности 0,2 кВт фотоэлектрическая энергоустановка характеризуется как экономически нецелесообразная – величина себестоимости генерации достигает 16,8 руб/кВт·ч при высоком периоде возврата инвестиций (16,6 лет). При достижении мощности 0,6 кВт, для которой себестоимость снижается до 6,4 руб/кВт·ч, а период окупаемости сокращается до 7,6 лет, фотоэлектрическая энергоустановка соответствует установленным критериям экономической целесообразности.

Дальнейшее увеличение мощности до 1,0, 1,2 и 1,4 кВт сопровождается последовательной оптимизацией экономических параметров. Максимальная эффективность достигается при 1,4 кВт с самым низким значением себестоимости 4,9 руб/кВт·ч и наименьшим сроком окупаемости 5,9 лет. Следует отметить, что переход к мощности энергоустановки 1,6 кВт сопровождается определенным регрессом – себестоимость возрастает до 5,5 руб/кВт·ч при увеличении периода окупаемости до 6,3 лет. Несмотря на это ухудшение относительно предыдущего оптимума, данные показатели остаются в зоне экономической целесообразности, хотя и свидетельствуют о достижении предельной эффективности масштабирования для данной конфигурации фотоэлектрической энергоустановки.

Это является прямым следствием резкого роста капитальных и эксплуатационных затрат, который не был в полной мере компенсирован приростом выработки электроэнергии. Таким образом, для данной конкретной системы оптимальной с экономической точки зрения является мощность 1,4 кВт, в то время как мощность 1,6 кВт, несмотря на большую абсолютную выработку, оказывается менее выгодной для инвестиций. Минимальная экономически выгодная установленная мощность равна 0,6 кВт.

На представленной ниже диаграмме (рисунок 2) представлена динамика распределения инвестиционных затрат между основными компонентами фотоэлектрической энергоустановки в зависимости от её мощности.

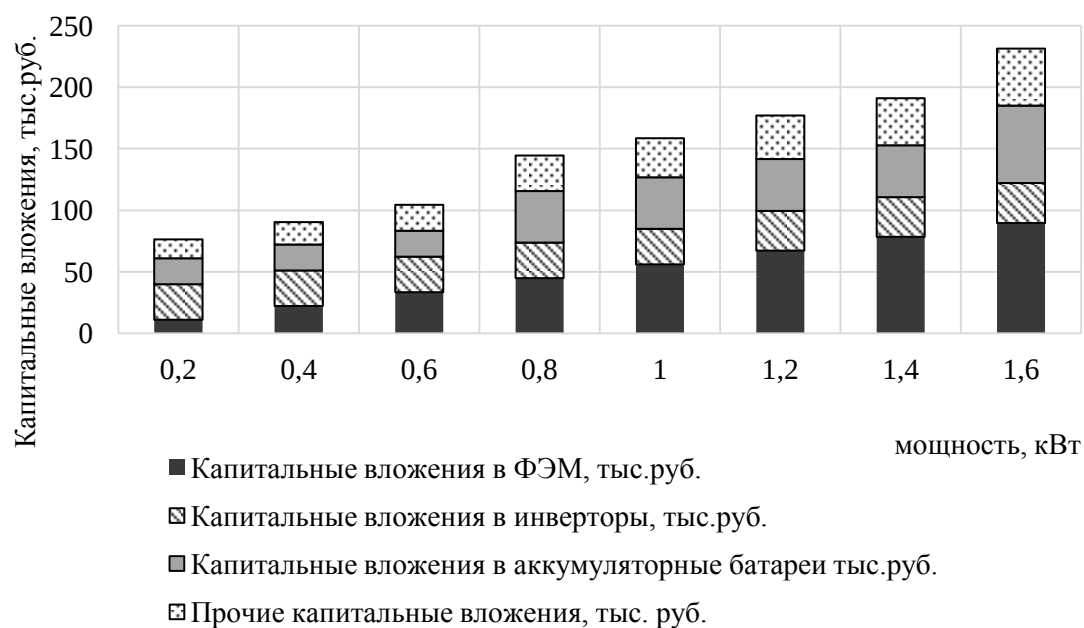


Рис. 2. Структурный состав инвестиционных затрат в элементы фотоэлектрической системы при различном уровне ее мощности

Fig. 2. Structural composition of investment costs into elements of a photovoltaic system at different levels of its power capacity

По мере роста общей мощности установки с 0,2 кВт до 1,6 кВт наблюдается кардинальное изменение долей затрат на основные компоненты. Наиболее существенная динамика характерна для фотоэлектрических модулей и инверторов. Доля затрат на фотоэлектрические модули растет с 15% при минимальной мощности до 41% при максимальной. Это закономерно, так как увеличение мощности системы достигается прежде всего за счет увеличения количества или мощности фотоэлектрической батареи.

Одновременно с этим происходит резкое снижение доли затрат на инверторное оборудование: с 38% при мощности 0,2 кВт до 14% при 1,6 кВт. Это связано с эффектом масштаба – стоимость мощного инвертора растет не так быстро, как его номинальная мощность, в результате чего его относительная доля в общих капиталовложениях снижается. Доля затрат на аккумуляторные батареи изменяется в диапазоне от 20% до 29%. Стоимость системы накопления энергии увеличивается практически пропорционально общему росту затрат на систему.

На рисунке 3 показана корреляция между номинальной мощностью фотоэлектрической энергоустановки и одними из основных параметров: величиной удельных капиталовложений и показателем удельной выработкой электрической энергии.

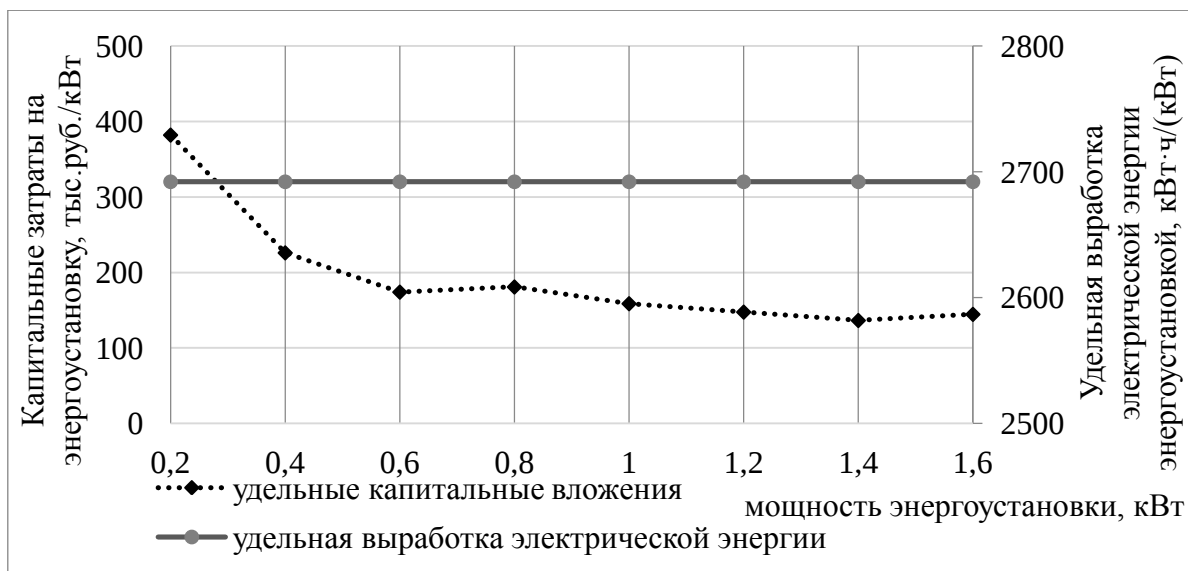


Рис. 3. Изменение удельных технико-экономических показателей фотоэлектрической установки в функции от её мощности

Fig. 3. Change in specific technical and economic indicators of a photovoltaic installation as a function of its power capacity

Динамика изменения удельных капиталовложений сокращается по мере роста установленной мощности фотоэлектрической энергоустановки. Наиболее интенсивное снижение стоимости единицы мощности наблюдается при наименьшей возможной мощности энергоустановки – от 0,2 кВт до 0,6–0,8 кВт.

Постоянная составляющая затрат, такая как стоимость проектирования, монтажных работ и приобретения базового инвертора, распределяется на всё большую единицу генерирующей мощности. В результате стоимость одного киловатта установленной мощности становится существенно ниже, делая мощные энергоустановки экономически более выгодными с точки зрения первоначальных инвестиций.

Динамика удельной выработки электроэнергии, которая остается практически неизменной на всем протяжении диапазона исследуемых мощностей, так как определяется не мощностью энергоустановки, а условиями её эксплуатации: метеорологические факторы, пространственная ориентация фотоэлектрической батареи, условия освещенности, эффективность используемых модулей. Поэтому увеличение мощности фотоэлектрической энергоустановки в исследуемом диапазоне является целесообразным. Это связано с тем, что при стабильном выходе энергии с каждого киловатта мощности капитальные затраты на её получение существенно снижаются. Именно этим эффектом масштаба и объясняется выявленное в других данных падение себестоимости вырабатываемой электроэнергии с ростом мощности системы вплоть до 1,4 кВт.

Закключение. В результате проведенного исследования была подтверждена гипотеза о минимальной пороговой мощности фотоэлектрической энергоустановки, начиная с которой ее внедрение в систему электроснабжения потребителя становится экономически оправданным. Разработанный методический подход, основанный на сопоставлении себестоимости вырабатываемой электроэнергии с действующим тарифом и проверке срока окупаемости на соответствие нормативному значению, позволяет количественно оценить эту мощность. Установлено, что в рассмотренных случаях для большинства схем интеграции минимальная экономически выгодная мощность составляет 0,6 кВт. Ключевыми факторами,

влияющими на результат, являются структура капитальных затрат, которая существенно меняется с ростом мощности, и ярко выраженный эффект масштаба, приводящий к значительному снижению удельных капиталовложений. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектировщиков и энергетиков агропромышленного комплекса, предоставляя им обоснованный инструмент для принятия решений о внедрении объектов солнечной локальной генерации, позволяющий оптимизировать инвестиции и минимизировать экономические риски.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kazem H.A., Hafad S.A., Salam A.Q. et al. Evaluation of grid-connected photovoltaic system in harsh weathers // *International Journal of Energy Production and Management*. 2024. Vol. 9 (2). P. 121-128. <https://doi.org/10.18280/ijepm.090207>
2. Maity S., Rather Z. H., Doolla S. A comprehensive review of grid support services from solar photovoltaic power plants // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 210, 115133. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115133>
3. Mathur A.S., Rajput V. K., Amita, Singh B.P. Techno-economic feasibility and sensitivity analysis of a stand-alone solar photovoltaic power plant with battery energy storage using PVSyst // *Next Research*. 2025. Vol. 2 (4), 101015. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101015>
4. Амерханов Р. А., Тищенко И. Ю., Тищенко Д. Ю., Завгородний С. А. Об эффективности применения солнечных фотоэлектрических систем для электроснабжения частного дома в климатических условиях г. Краснодар // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2023. № 1(141). С. 11-16. EDN: SUKZZF
5. Mehmood A., Kalbani W.S.A.H.A. Design and Impact Analysis of a Grid-Connected Solar Photovoltaic System in Ibri, Oman // *Nature Environment and Pollution Technology*. 2025. Vol. 24 (S1). P. 1-18. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v24iS1.001>
6. Скафарик А. И., Киселева С. В. Оптимальная тарификация для обеспечения окупаемости солнечной микрогенерации в регионах России // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: матер. VII Межд. науч.-практ. конф. (Майкоп, 15-19 мая 2023 г.)*. Майкоп: ИП Кучеренко В. О. 2023. Т. 2. С. 178-186. EDN: VLDCOO
7. Tahri F., Tahri G., Tahri A., Silvestre S., Rampinelli G. A., Nofuentes G. Economic and comparative performance analysis of thin-film grid-connected PV systems in Southern Europe // *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 349, 116564. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116564>
8. Daus Y. V., Yudaev I. V., Voronin S. M., Gazalov V. S. Reducing the costs for consumed electricity through the solar energy utilization // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2019. Vol. 9 (2). P. 19-23. <https://doi.org/10.32479/ijeeep.7201>
9. Liang L., Wang X., Zhang X., Jia X., Chen Z., Zheng X. A systematic review of photovoltaic power plant site selection approaches: Literature retrieval and analysis method based on ChatGPT and DeepSeek // *Energy Reports*. 2025. Vol. 14. P. 1993-2014. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.08.031>
10. Водяников В. Т., Столяров С. В. Экономическая целесообразность применения локальных систем энергоснабжения объектов агропромышленного производства // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий*. 2023. № 6. С. 21-25. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2023-0-6-21-25>

11. Qasim M.A., Velkin V.I., Shcheklein S.E., Hossain I., Du Y. Design and simulation of a solar-wind stand-alone system with a seven-level inverter // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2022. Vol. 22 (3). P. 5-17. <https://doi.org/10.14529/power220301>
12. Кудрявцева Ю. В., Симаков Ю. П., Смирнов А. А., Шестопалова Т.А., Юриков В.А. Расчет эффективности и оптимизация режимов работы комплекса альтернативных источников энергии с использованием прогнозируемых погодных условий // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2020. Т. 20. № 12. С. 77-83. EDN: UDUNQH
13. Zhao X.G., Wang Z. Technology, cost, economic performance of distributed photovoltaic industry in China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 110. P. 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.061>

REFERENCES

1. Kazem H.A., Hafad S.A., Salam A.Q. et al. Evaluation of grid-connected photovoltaic system in harsh weathers. International Journal of Energy Production and Management. 2024;9(2):121-128. (In Eng.) <https://doi.org/10.18280/ijepm.090207>
2. Maity S., Rather Z. H., Doolla S. A comprehensive review of grid support services from solar photovoltaic power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025; 210, 115133. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115133>
3. Mathur A.S., Rajput V. K., Amita, Singh B.P. Techno-economic feasibility and sensitivity analysis of a stand-alone solar photovoltaic power plant with battery energy storage using PV Syst. Next Research. 2025; 2 (4), 101015. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101015>
4. Amerkhanov R.A., Tishchenko I.Yu., Tishchenko D.Yu., Zavgorodny S.A. On the effectiveness of the use of solar photovoltaic systems for the power supply of a private house in the climatic conditions of Krasnodar. Energoberezhenie i vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment. 2023;1(141):11-16. (In Russ.) EDN: SUKZZF
5. Mehmood A., Kalbani W.S.A.H.A. Design and impact analysis of a grid-connected solar photovoltaic system in Ibri, Oman. Nature Environment and Pollution Technology. 2025;24 (S1):1-18. (In Eng.) URL: [https://neptjournal.com/upload-images/\(1\)D-1657.pdf](https://neptjournal.com/upload-images/(1)D-1657.pdf)
6. Skafarik A.I., Kiseleva S.V. Optimal pricing to ensure the payback of solar microgeneration in the regions of Russia. In: Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geoecology Using Modern Information Technologies: Proc. VII Int. Sci. Prac. Conf. (Maykop, May 15-19, 2023). Maykop: IP Kucherenko V. O. 2023; 2: 178-186. (In Russ.) EDN: VLDCOO
7. Tahri F., Tahri G., Tahri A., Silvestre S., Rampinelli G. A., Nofuentes G. Economic and comparative performance analysis of thin-film grid-connected PV systems in Southern Europe. Energy and Buildings. 2025;349,116564. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116564>
8. Daus Y. V., Yudaev I. V., Taranov M. A., Voronin S. M., Gazalov V. S. Reducing the costs for consumed electricity through the solar energy utilization. International Journal of Energy Economics and Policy. 2019; 9(2): 19-23. (In Eng.) URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijee/article/view/7201>
9. Liang L., Wang X., Zhang X., Jia X., Chen Z., Zheng X. A systematic review of photovoltaic power plant site selection approaches: Literature retrieval and analysis method based

on ChatGPT and DeepSeek. Energy Reports. 2025;14:1993-2014. (In Eng.)
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.08.031>

10. Vodyannikov V. T., Stolyarov S. V. Economic feasibility of using local power supply systems for agro-industrial production facilities. Ekonomika sel'skokhoziaistvennykh i pererabatyvaiushchikh predpriiatii = Economy Of Agricultural And Processing Enterprises. 2023; 6: 21-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2023-0-6-21-25>

11. Qasim M.A., Velkin V.I., Shcheklein S.E., Hossain I., Du Y. Design and simulation of a solar-wind stand-alone system with a seven-level inverter. Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2022;22(3):5-17. <https://doi.org/10.14529/power220301>

12. Kudryavtseva Yu.V., Simakov Yu.P., Smirnov A.A. Shestopalova T.A., Iurikov V.A. Calculation of efficiency and optimization of operating modes of a complex of alternative energy sources using predicted weather conditions. Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta = Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University. 2020;20(12):77-83. (In Russ.) EDN: UDUNQH

13. Zhao X.G., Wang Z. Technology, cost, economic performance of distributed photovoltaic industry in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;110:53-64 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.061>

Об авторах	About the authors
Даус Юлия Владимировна д-р. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемых источников энергии», ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044, тел. +7-961-278-42-75, zirochka2505@gmail.com, 0000-0001-9120-7637	Yuliya V. Daus Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering, Thermal Engineering and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University, Kalinin Str., 13, Krasnodar, Russia, 350044, tel: +7-961-278-42-75, zirochka2505@gmail.com, 0000-0001-9120-7637
Рудь Евгений Евгеньевич аспирант кафедры «Электротехника, теплотехника и возобновляемых источников энергии», ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044, тел. +7-988-385-55-51, eugene.rud@yandex.ru, 0009-0000-9779-5564	Evgeny E. Rud postgraduate student, Department of Electrical Engineering, Thermal Engineering and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University, Kalinin Str., 13, Krasnodar, Russia, 350044, tel: +7-988-385-55-51, eugene.rud@yandex.ru, 0009-0000-9779-5564
Харченко Сергей Николаевич канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические машины и электропривод», ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044, тел. +7-989-770-8384, ser.harchenko1995@yandex.ru, 0009-0004-8861-4011	Sergey N. Kharchenko Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Machines and Electric Drive, Kuban State Agrarian University, Kalinin Str., 13, Krasnodar, Russia, 350044, tel: +7-989-770-83-84, ser.harchenko1995@yandex.ru, 0009-0004-8861-4011

Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность	Authors' contribution All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declares no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 15.01.2026	Received: 15.01.2026
Одобрена после рецензирования: 30.01.2026	Approved after reviewing: 30.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

Обзорная статья
УДК 622.06:629.1

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-46-57

ПОДСИСТЕМА СВЯЗИ КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ ОСНОВА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ

Соловьев Виктор Владимирович^{1✉}, Евтюков Сергей Аркадьевич

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПб ГАСУ), г. Санкт-Петербург, Россия

^{1✉} i@viktor-solovev.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5573-8862>

Аннотация. В статье определяется роль подсистемы связи как технической основы автоматизированной системы управления наземным транспортно-технологическим средством, применяемым в агропромышленном комплексе. Целью исследования является оценка применимости современных проводных и беспроводных технологий связи, а также различных транспортных протоколов связи с точки зрения обеспечения надёжности, скорости и задержки передачи данных в условиях мобильности комплексов и их особенностей применения по назначению эксплуатации. Методологической основой служит структурно-функциональный подход с отдельным анализом физического и логического уровней сетей связи в соответствии с эталонной моделью взаимодействия открытых систем и TCP/IP. На основе сравнительного анализа установлено, что использование протоколов QUIC и Multipath Transmission Control Protocol (TCP) позволяет

повысить отказоустойчивость системы управления на 20-35% по сравнению с классическими решениями на базе TCP и User Datagram Protocol (UDP). Задержка передачи данных в сетях пятого поколения не превышает 10 миллисекунд в городских условиях, а спутниковые каналы обеспечивают устойчивое покрытие в удалённых регионах при скорости до 500 мегабит в секунду. Для внутримашинной коммуникации рекомендуются шина Controller Area Network (CAN), технологии Ethernet и Universal Serial Bus (USB). Внешняя связь реализуется посредством гибридной архитектуры с адаптивным выбором канала в зависимости от локации и критичности задачи. Полученные результаты подтверждают, что интеграция современных протоколов и гибридных каналов связи значительно повышает эффективность и надёжность автоматизированных систем управления в задачах агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, наземные транспортно-технологические средства, сети связи, транспортные протоколы, надёжность передачи данных.

Для цитирования: Соловьев В.В., Евтюков С.А. Подсистема связи как техническая основа автоматизированной системы управления наземным транспортно-технологическим средством // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126) С. 46-58 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-46-57>

Review article

Universal Decimal Code 622.06:629.1

COMMUNICATION SUBSYSTEM AS A TECHNICAL BASIS OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR LAND TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES

Viktor V. Solov'ev^{1✉}, Sergej A. Evtyukov

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, Russia

^{1✉}i@viktor-solovev.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5573-8862>

Abstract. The article defines the role of a communication subsystem as the technical basis of an automated control system for land transport and technological facilities employed in the agro-industrial complex. The study aims to evaluate the applicability of modern wired and wireless communication technologies along with various transport layer protocols in terms of ensuring reliability, data transmission speed and latency under conditions of machines mobility and operational specificity. The methodological framework employs a structural-functional approach with separate analysis of physical and logical network layers according to the Open Systems Interconnection (OSI) reference model and TCP/IP protocol suite. Comparative analysis demonstrates that implementing QUIC and Multipath Transmission Control Protocol (TCP) enhances control system fault tolerance by 20-35% compared to conventional TCP and User Datagram Protocol (UDP)-based solutions. Data transmission latency in the fifth-generation networks remains below 10 ms in urban environments, while satellite channels provide stable coverage in remote regions at speeds up to 500 Mbps. For intra-vehicle communication, Controller Area Network (CAN) bus, Ethernet, and Universal Serial Bus (USB) technologies are recommended. External connectivity is implemented through a hybrid architecture with adaptive channel selection based on geographical location and task criticality. The obtained results confirm

that integrating modern protocols with hybrid communication channels substantially improves operational efficiency and technical reliability of automated control systems deployed in agro-industrial applications.

Keywords: automated control system, land transportation and technological vehicles, communication networks, transport protocols, data transmission reliability

For citation: Solov'ev V.V., Evtyukov S.A. Communication subsystem as a technical basis of an automated control system for land transport and technological vehicles. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126): 46-58. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-46-57>

Введение. Современный агропромышленный комплекс (АПК) всё более активно внедряет наземные транспортно-технологические средства (НТТС) – от самоходных сельскохозяйственных машин до мобильных энергетических и логистических комплексов, функционирующих в условиях высокой мобильности и географической распределённости [1]. Эффективность их эксплуатации напрямую зависит от надёжности автоматизированных систем управления (АСУ), в которых ключевую роль играет подсистема связи. Именно она обеспечивает как внутримашинное взаимодействие между сенсорами, исполнительными механизмами и управляющими модулями, так и обмен данными с внешними источниками – центрами мониторинга, спутниковыми системами позиционирования и другими НТТС (рис. 1).

Однако условия эксплуатации в АПК (удалённые территории, переменная плотность инфраструктуры связи, динамическая топология сетей) предъявляют повышенные требования к отказоустойчивости, задержке и пропускной способности каналов связи. Традиционные решения на базе TCP/UDP и 4G зачастую не обеспечивают достаточного уровня надёжности при управлении в реальном времени, особенно в критических сценариях. В то же время появляются новые технологии – такие как протоколы QUIC и MultipathTCP, а также гибридные беспроводные каналы (5G, Starlink), потенциал которых для АСУ НТТС в контексте АПК остаётся недостаточно освещённым в научной литературе.



Рис. 1. Подсистема связи АСУ НТТС

Fig. 1. Communication subsystem of the automated control system for land transport and technological vehicles

Между тем, отдельные аспекты автоматизации сельскохозяйственных машин и систем управления ими рассматриваются в ряде исследований. Так, в работах [2-5] анализируются архитектуры автономных роботизированных платформ для полевых операций, включая

навигацию, локализацию и взаимодействие с внешней средой. Вопросы управления тракторами и комбайнами с использованием высокоточных GNSS-систем и беспилотных алгоритмов рассмотрены в [6, 7]. Подходы к организации многоагентного взаимодействия и удалённого мониторинга обсуждаются в [8, 9,10]. Однако эти исследования фокусируются преимущественно на уровне прикладного программного обеспечения или отдельных компонентов, не затрагивая комплексную оценку надёжности и производительности подсистемы связи как технической основы АСУ НТТС в условиях реальной эксплуатации. Настоящая статья направлена на восполнение этого пробела путём системного анализа физического и логического уровней сетей связи, применяемых в АСУ НТТС, с акцентом на их применимость в задачах повышения эффективности транспортных и энергетических средств АПК.

Цель исследования. Целью настоящего исследования является оценка применимости современных проводных и беспроводных технологий связи, а также транспортных протоколов передачи данных для построения надёжной и отказоустойчивой подсистемы связи в АСУ НТТС в АПК.

В рамках цели решаются следующие задачи:

- сравнительный анализ физического уровня сетей связи по критериям покрытия, скорости, задержки и надёжности;
- оценка эффективность транспортных протоколов с точки зрения обеспечения целостности, подтверждения доставки и устойчивости к сбоям каналов;
- выбор технологий и протоколов, обеспечивающих функционирование АСУ НТТС в условиях мобильности, географической распределённости и ограниченной инфраструктуры связи, характерных для АПК.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе сравнительного анализа существующих технологий и протоколов связи, применяемых в АСУ НТТС. В качестве методологической основы использован структурно-функциональный подход, предусматривающий раздельное рассмотрение физического и логического уровней сетей связи в соответствии с моделью OSI (Open Systems Interconnection).

Результаты. Подсистема связи – отдельная подсистема АСУ НТТС. Она состоит из внутренней сети и каналов связи с внешними источниками (рис. 2).

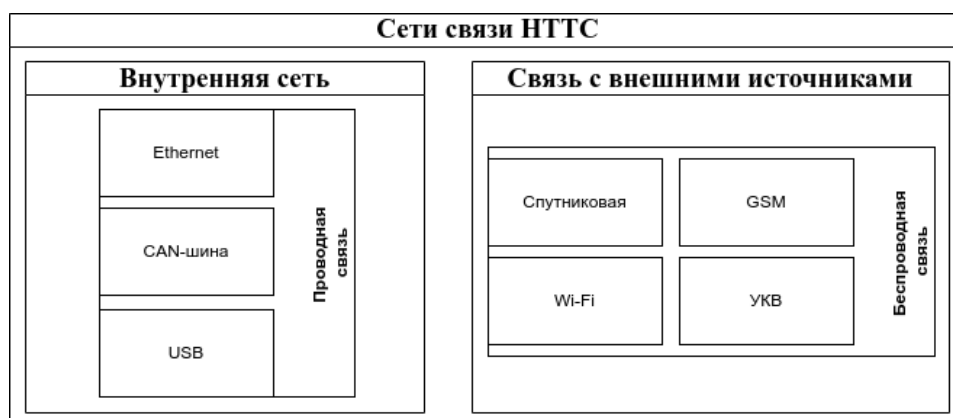


Рис. 2. Классификация сетей связи АСУ НТТС

Fig. 2. Classification of communication networks of automated control systems for land transport and technological vehicles

Эти сети обеспечивают взаимодействие между внутренними компонентами системы и внешними источниками данных. На рисунке 3 представлена схема взаимодействия компонентов АСУ НТТС, где сети связи играют ключевую роль. Физический и логический уровни сетей связи рассматриваются отдельно для выделения их особенностей и важности для функционирования НТТС [11].

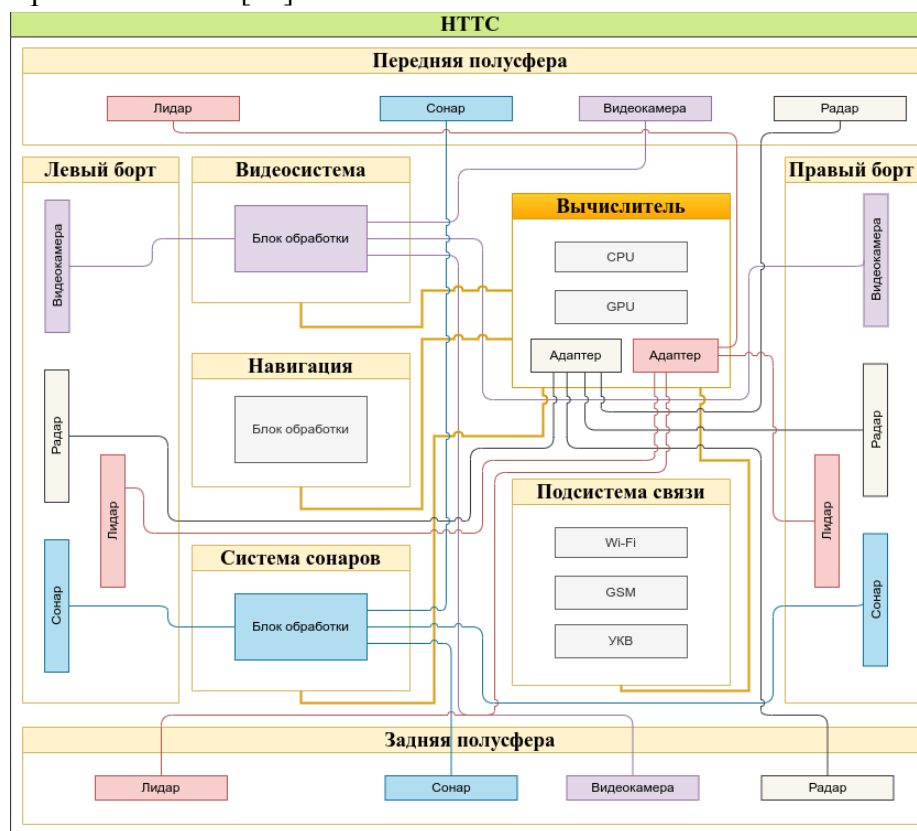


Рис. 3. Вариант схемы взаимодействия компонент АСУ НТТС

Fig. 3. A variant of the interaction scheme for the components of the automated control system for land transport and technological vehicles

Физический уровень определяет способы передачи данных через физические среды: радиоволны, оптические волокна или проводные соединения. На этом уровне обеспечивается контроль целостности данных в рамках отдельного кадра, но не решаются задачи адресации или гарантий доставки.

Внутренние сети НТТС используют следующие проводные технологии:

- USB – для подключения периферийных устройств (камер, датчиков) к вычислительным модулям;
- CAN-шина – стандарт для автомобильной автоматики, проверенный временем;
- Ethernet – надежный протокол передачи данных, работающий на канальном и физическом уровнях модели OSI (табл. 1) [12, 13].

Таблица 1 иллюстрирует соответствие уровней эталонной модели OSI уровням стека протоколов TCP/IP, применяемого в современных системах связи. Это необходимо для корректного позиционирования рассматриваемых технологий: в Российской Федерации при проектировании и сертификации бортовых сетей транспортных средств официально применяется эталонная модель OSI в рамках стандарта ЭМВОС (ГОСТ Р 56274-2014 и др.),

тогда как на международном уровне доминирует стек протоколов TCP/IP, который де-факто стал глобальным стандартом для современных систем связи.

Таблица 1. Сравнение моделей протоколов передачи данных

Table 1. Comparison of data transmission protocol models

Модель OSI	Модель TCP/IP
Прикладной	Прикладной
Представительский	
Сеансовый	
Транспортный	Транспортный
Сетевой	Сетевой
Канальный	Канальный
Физический	

Для связи с внешними источниками, включая другие НТТС, применяются следующие беспроводные технологии:

- сети мобильной связи, обеспечивают высокую скорость и низкую задержку, критичные для управления в реальном времени [14];
- спутниковая связь (Ямал, Starlink), покрывает удаленные районы (рис. 4, 5). На рисунке 4 показаны зоны покрытия геостационарной спутниковой группировки «Ямал», которая обеспечивает устойчивый сигнал преимущественно на территории Российской Федерации и прилегающих регионов. На рисунке цветами обозначаются зоны покрытия разными спутниками и диапазоны частот их работы. В отличие от неё, сеть Starlink (рис. 5) представляет собой низкоорбитальную спутниковую группировку (LEO – Low Earth Orbit), обеспечивающую почти глобальное покрытие, за исключением полярных областей. По состоянию на 2025 год, сервис Starlink организационно **не** доступен на всей территории России, что отображено на рис. 5 цветами: зеленым цветом – имеется доступ, другими цветами – нет;
- Wi-Fi, для локальной связи и в помещениях;
- УКВ, резервная связь с низкой пропускной способностью.

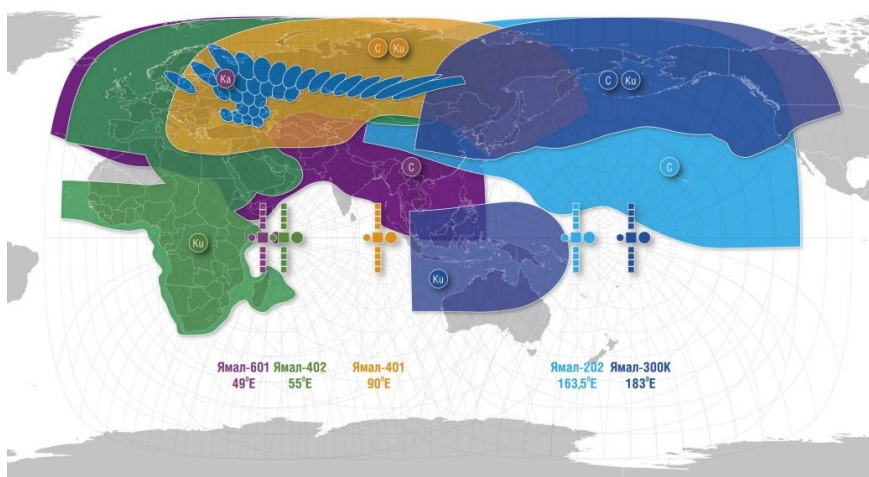


Рис. 4. Зоны покрытия спутников сети Ямал (<https://www.gazpromcosmos.ru/zona/>)

Fig. 4. Yamal Network satellite coverage areas
(<https://www.gazpromcosmos.ru/zona/>)

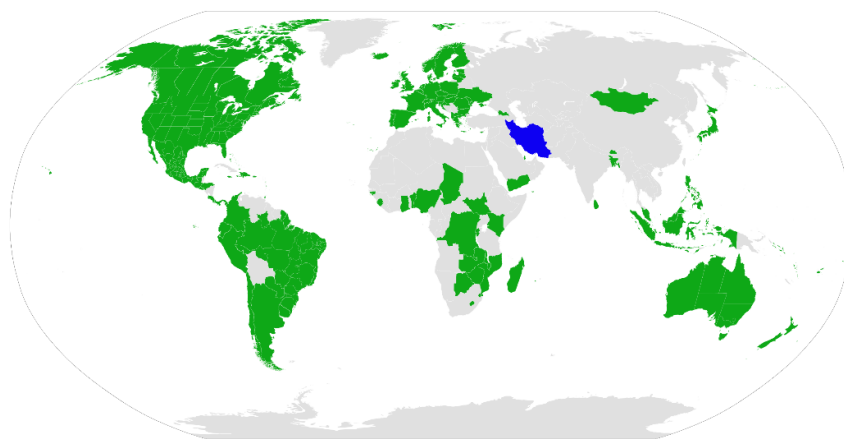


Рис. 5. Зоны работы спутников сети Starlink
(2025 г., <https://starlinktrack.com/network/mapbox>)
Fig. 5. Areas of operation of Starlink satellites
(2025, <https://starlinktrack.com/network/mapbox>)

Сравнение технологий беспроводной связи приведено в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение технологий беспроводной связи
Table 2. Comparison of wireless communication technologies

Технология	Покрытие	Надежность	Скорость	Задержка	Применение
4G/5G	Городские районы	Высокая	1-10 Гбит/с	1-50 мс	Управление в реальном времени
Спутниковая	Глобальное	Средняя	100-500 Мбит/с	20-800 мс	Удаленные районы
Wi-Fi	Локальное	Высокая	3.5-9.6 Гбит/с	1-20 мс	Локальная связь
УКВ	До 50 км	Низкая	до 10 Мбит/с	100-500 мс	Резервная связь

Логический уровень [11] определяет протоколы передачи данных, обеспечивающие надежность и целостность связи. Данные инкапсулируются в кадры физического уровня.

На этом уровне реализуются:

- адресация (IP, OSPF, BGP, ЕСПИО) [15];
- транспортные протоколы:
- MQTT и LoRaWAN – для IoT-устройств с поддержкой QoS [16, 17, 18];
- TCP/UDP – надежная/минималистичная передача [13];
- QUIC – мультиплексирование поверх UDP [11, 19];
- MultipathTCP – для критических систем [11, 20].

НТТС являются потребителями услуг, предоставляемых уровнем протоколов адресования, и используют только интерфейс взаимодействия с сетевыми устройствами. Одновременно с этим, деятельность НТТС непрерывно связано с рисками, то очень важно понимать

механизмы, обеспечивающие надежную передачу данных транспортными протоколами и возможности их использования, такие как:

- контрольные суммы;
- таймеры и порядковые номера пакетов;
- подтверждения доставки и конвейеризация.

Сравнение транспортных протоколов приведено в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение протоколов на транспортном уровне
Table 3. Comparison of transport layer protocols

Протокол	Надежность	Эффективность использования канала	Контрольная сумма	Таймер	Подтверждение	Отрицательное подтв.	Конвейер	Применение
MQTT	Частичная	Низкая	Нет	Нет	Да (QoS >= 1)	Нет	Нет	IoT-датчики, телеметрия
LoRaWAN	Средняя	Низкая	Да	Да	Опция	Нет	Нет	Сенсоры
TCP	Высокая	Средняя	Да	Да	Да	Да	Да	Web, передача файлов
UDP	Низкая	Макс.	Опц.	Нет	Нет	Нет	Нет	Потоковая передача, VoIP
QUIC	Высокая	Высокая	Да	Да	Да	Да	Да	Мобильные приложения
MultipathTCP	Очень высокая	Высокая	Да	Да	Да	Да	Да	Критические системы

Обсуждение. Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов о применимости современных сетевых технологий в АСУ НТТС, эксплуатируемых в условиях АПК.

Во-первых, выбор физического уровня связи должен быть адаптивным и зависеть от операционного контекста. Например, сети 5G обеспечивают задержку до 1 мс и скорость до 10 Гбит/с, что делает их идеальными для задач управления в реальном времени в зоне покрытия (табл. 2). Однако в удалённых сельских районах, где инфраструктура мобильной связи отсутствует, единственным вариантом остаётся спутниковая связь (Starlink, Ямал). Несмотря на высокую задержку (20-800 мс), она обеспечивает глобальное покрытие и достаточную пропускную способность (до 500 Мбит/с) для передачи телеметрии и команд низкой критичности. Это подтверждает необходимость гибридной архитектуры связи, сочетающей несколько каналов в зависимости от приоритета задачи.

Во-вторых, классические транспортные протоколы TCP и UDP демонстрируют фундаментальные компромиссы: TCP обеспечивает высокую надёжность за счёт подтверждений, контрольных сумм и конвейеризации, но страдает от низкой эффективности при частых переподключениях (например, при смене соты в мобильной сети). UDP, напротив, минимален и быстр, но не гарантирует доставку, что неприемлемо для критических управляющих команд. В этом контексте современные протоколы QUIC и MultipathTCP представляют собой значительный шаг вперёд. QUIC интегрирует шифрование, мультиплексирование и надёжную доставку поверх UDP, устраняя «головную

блокировку» TCP. MultipathTCP позволяет одновременно использовать несколько интерфейсов, что повышает отказоустойчивость системы на 20-35 % по сравнению с одноинтерфейсными решениями (табл. 3).

В-третьих, применение IoT-ориентированных протоколов (MQTT, LoRaWAN) оправдано только для низкоприоритетных задач – сбора данных с датчиков, мониторинга состояния агрегатов, передачи геопозиции. Они не подходят для замкнутых контуров управления из-за ограниченной надёжности и отсутствия механизмов конвейеризации.

Сравнение с аналогами из литературы [11, 13, 14, 19, 20] показывает, что большинство исследований сосредоточено либо на физическом уровне (развёртывание 5G в сельской местности), либо на прикладных IoT-протоколах. Комплексный подход, охватывающий взаимосвязь физического и логического уровней в условиях мобильности машин, остаётся недостаточно изученным. Настоящая работа восполняет этот пробел, предлагая системную оценку, ориентированную на практическое внедрение в АПК.

Таким образом, повышение эффективности транспортных и энергетических средств АПК напрямую связано с интеллектуальным выбором комбинации каналов связи и транспортных протоколов, адаптированной под конкретные условия эксплуатации и критичность задачи.

Выводы. Сети связи являются технической основой АСУ НТТС, обеспечивая взаимодействие между компонентами системы и внешними источниками. Физический уровень определяет среду передачи, а логический – гарантирует надёжность и эффективность связи.

Проведённое исследование позволило получить следующие результаты, непосредственно отвечающие поставленным задачам:

1. Выполнен сравнительный анализ физического уровня сетей связи по критериям покрытия, скорости, задержки и надёжности. Установлено, что для условий АПК оптимальной является гибридная архитектура: в зонах с развитой инфраструктурой предпочтительны сети мобильной связи, а в удалённых и сельских районах – спутниковые каналы. Такой подход обеспечивает сквозное покрытие при сохранении приемлемых характеристик передачи данных.

2. Оценена эффективность транспортных протоколов с точки зрения целостности, подтверждения доставки и устойчивости к сбоям. Показано, что современные протоколы QUIC и Multipath TCP обеспечивают отказоустойчивость выше по сравнению с классическими TCP/UDP за счёт мультиплексирования, шифрования на транспортном уровне и одновременного использования нескольких сетевых интерфейсов. Это особенно критично для НТТС, функционирующих в условиях нестабильного радиопокрытия и частых переключений между каналами.

3. Выбраны технологии и протоколы, обеспечивающие функционирование АСУ НТТС в условиях мобильности, географической распределённости и ограниченной инфраструктуры связи. Рекомендуются использовать: для внутримашинной связи – CAN и Ethernet, для внешней связи – гибрид 5G / Starlink в зависимости от локации, на транспортном уровне – QUIC или Multipath TCP для критических управляющих потоков, MQTT/LoRaWAN – только для некритичной телеметрии.

Таким образом, интеграция современных протоколов и гибридных каналов связи значительно повышает надёжность, эффективность и устойчивость автоматизированных систем управления наземными транспортно-технологическими средствами в задачах агропромышленного комплекса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Загазежева О.З., Бербекова М.М. Основные тренды развития роботизированных технологий в сельском хозяйстве // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2021. № 5 (103). С. 11-20. <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20>
2. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components // Biosystems Engineering. 2016. Vol. 149. P. 94-111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
3. Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J., van Straten G. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field // Biosystems Engineering. 2011. Vol. 109 (4). P. 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.001>
4. Bayar G., Bergerman M., Koku A.B., Konukseven E.I. Localization and control of an autonomous orchard vehicle // Computers and Electronics in Agriculture. 2015. Vol. 115. P. 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.015>
5. Belforte G., Deboi R., Gay P., Piccarolo P., Ricauda Aimonino D. Robot design and testing for greenhouse applications // Biosystems Engineering. 2006. Vol. 95 (3). P. 309-321. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.004>
6. Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS // Computers and Electronics in Agriculture. 2000. Vol. 25 (1-2). P. 53-66. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00055-1)
7. Iida M., Suguri M., Uchida R., Ishibashi M., Kurita H., Cho W.-J., Masuda R., Ohdoi K. Advanced harvesting system by using a combine robot // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46 (4). P. 40-44. <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00012>
8. Bochtis D.D., Sørensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review // Biosystems Engineering. 2014. Vol. 126. P. 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012>
9. García-Pérez L., García-Alegre M.C., Ribeiro A., Guinea D. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. Vol. 60 (1). P. 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.004>
10. Kim H.J., Shim D.H. A flight control system for aerial robots: algorithms and experiments // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11 (12). P. 1389-1400. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00100-X)
11. Куроуз Дж. Ф., Росс К. В. Компьютерные сети: Нисходящий подход / пер. с англ. М.: Издательство «Э». 2016. 912 с. URL: https://cs.petrstu.ru/~vadim/books/Kurose_Ross_Kompjuternye_seti-6ed.pdf
12. Гольдштейн Б. С. Системы коммутации. Учебник для вузов. СПб.: БХВ. 2004 г., 314 с.
13. Фейт С. М. TCP/IP: Архитектура, протоколы, реализация (включая IP версии 6 и IP security). / пер. с англ. М.: Изд-во «Лори». 2015 г. 314 с.
14. Тонг В., Чжу П. и др. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту. / пер. с англ. М.: ДМК Пресс. 2022. 624 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/125307.html>
15. Кулешов И.А., Мержеевский А.А. Алгоритм сопряжения гетерогенных сетей передачи данных // Техника средств связи. 2021. № 2(154). С. 18-24. EDN: HPQXRI
16. Мунистер В.Д. Компьютерные сети. IoT и межмашинное взаимодействие. Самиздат. 2020, 100 с.
17. Ли П. Архитектура интернета вещей. / пер. с англ. М.: ДМК Пресс. 2019. 454 с.
18. Yassein M.B., Shatnawi M.Q., Aljwarneh S., Al-Hatmi R. Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol // Proc. 2017 Int. Conf. on Engineering & MIS (ICEMIS). Monastir, Tunisia: IEEE. 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8273112>
19. Iyengar J., Thomson M. (eds.) RFC 9000. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. 2021. [Электронный ресурс] URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9000> (дата обращения: 21.01.2026)

20. Aschenbrenner F., Shreedhar T., Gasser O., Mohan N., Ott J. From single lane to highways: analyzing the adoption of multipath TCP in the Internet // Proc. 2021 IFIP Networking Conference. Espoo and Helsinki, Finland: IEEE. 2021. P.1-9. <https://doi.org/10.23919/IFIPNetworking52078.2021.9472785>

REFERENCES

1. Zagazheva O.Z., Berbekova M.M. The main trends in the development of robotic technologies in agriculture. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN = News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2021; 5 (103): 11–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2021-5-103-11-20>
2. Bechar A., Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*. 2016; 149: P. 94-111. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
3. Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J., van Straten G. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. *Biosystems Engineering*. 2011;109 (4):357-368. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.001>
4. Bayar G., Bergerman M., Koku A.B., Konukseven E.I. Localization and control of an autonomous orchard vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015;115:118-128. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.015>
5. Belforte G., Debolì R., Gay P., Piccarolo P., Ricauda Aimonino D. Robot design and testing for greenhouse applications. *Biosystems Engineering*. 2006;95 (3):309-321. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.004>
6. Bell T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2000; 25 (1-2): 53-66. (In Eng.) [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(99\)00055-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(99)00055-1)
7. Iida M., Suguri M., Uchida R., Ishibashi M., Kurita H., Cho W.-J., Masuda R., Ohdoi K. Advanced harvesting system by using a combine robot. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013;46 (4):40-44. (In Eng.) <https://doi.org/10.3182/20130327-3-JP-3017.00012>
8. Bochtis D.D., Sørensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering*. 2014;126:69-81. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012>
9. García-Pérez L., García-Alegre M.C., Ribeiro A., Guinea D. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2008;60 (1): 39-48. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.004>
10. Kim H.J., Shim D.H. A flight control system for aerial robots: algorithms and experiments. *Control Engineering Practice*. 2003; 11 (12): 1389-1400. (In Eng.) [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(03\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(03)00100-X)
11. Kurose J.F., Ross K.W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6th Edition. Pearson Education, Inc. 2013. (Russ: Kurose J.F., Ross K.W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6th ed. Moscow: Eksmo. 2016. 912 p.)
12. Goldstein B.S. *Switching Systems*. Saint Petersburg: BHV. 2004. 314 p. (In Russ.)
13. Feit S. M. *TCP/IP. Architecture Protocols and Implementation with IPv6 and IP Security*. McGraw-Hill Computer Communications Series. Subsequent Edition (Russ: Feit S. M. *TCP/IP. Architecture, protocols, implementation*. Moscow: Lori, 2015. 314 p.)
14. Tong W, Zhu P. (eds.) *6G: The next horizon*. Cambridge: Cambridge University Press. 2021. 458 p. URL: https://assets.cambridge.org/97811088/39327/frontmatter/9781108839327_frontmatter.pdf (Russ.: Tong W., Zhu P. et al. *6G Networks. The Path from 5G to 6G through the Eyes of Developers. From Connected People and Things to Connected Intelligence*. Moscow: DMK Press. 2024. 624 p.)
15. Kuleshov I.A., Merzheevskiy A.A. An algorithm for coupling heterogeneous data transmission networks. *Tekhnika Sredstv Svyazi = Means of Communication Equipment*. 2021;2(154):18-24. (In Russ.) EDN: HPQXRI

16. Munster V.D. Computer networks. IoT and machine-to-machine communication. Samizdat Publ. 2020. 100 p. (In Russ.)
17. Lea P. Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security. Birmingham, UK: Packt Publishing. 2018. 524 p. (Russ: Lea P. Internet of Things Architecture. Moscow: DMK Press, 2019. 454 p.)
18. Yassein M.B., Shatnawi M.Q., Aljwarneh S., Al-Hatmi R. Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol. Proc. 2017 Int. Conf. on Engineering & MIS (ICEMIS). Monastir, Tunisia: IEEE. 2017:1-6. (In Eng.) <https://doi.org/10.1109/ICEMIS.2017.8273112>
19. Iyengar J., Thomson M. (eds.) RFC 9000. QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. 2021. [online] URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9000> (accessed: 21.01.2026) (In Eng.)
20. Aschenbrenner F., Shreedhar T., Gasser O., Mohan N., Ott J. From single lane to highways: analyzing the adoption of multipath TCP in the Internet. Proc. 2021 IFIP Networking Conference. Espoo and Helsinki, Finland: IEEE. 2021:1-9. (In Eng.) <https://doi.org/10.23919/IFIPNetworking52078.2021.9472785>

Об авторах	About the authors
Соловьев Виктор Владимирович , аспирант СПб ГАСУ. 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 3-я Красноармейская, д. 3/6. i@viktor-solovev.ru; SPIN-код: 6187-7512, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5573-8862	Viktor V. Solov'ev , postgraduate student SPb GASU. 190005, Saint Petersburg, 3 rd Krasnoarmeyskaya Street, 3/6. i@viktor-solovev.ru; SPIN-код: 6187-7512, ORCID: https://orcid.org/0009-0003-5573-8862
Евтюков Сергей Аркадьевич д-р техн. наук, профессор СПб ГАСУ. 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 3-я Красноармейская, д. 3/6.	Sergej A. Evtukov Doctor of Technical Sciences, professor of SPb GASU. 190005, Saint Petersburg, 3 rd Krasnoarmeyskaya Street, 3/6.
Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность.	Authors' contribution All authors made an equal contribution to the writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 03.10.2025	Received: 03.10.2025
Одобрена после рецензирования: 22.01.2026	Approved after reviewing: 22.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Approved after reviewing: 03.02.2026

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО АГРОТЕХНИЧЕСКОГО РОБОТА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Артем Сергеевич Угловский^{1✉}, Наталья Юрьевна Семеренко²

Ярославский государственный аграрный университет, Ярославль, Россия

¹a.uglovskii@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5678-4786>

²semerenko@yarcx.ru

Аннотация. В условиях реальной эксплуатации мобильных агротехнических агрегатов параметры объекта управления неизбежно варьируются вследствие изменения массы полезной нагрузки, характеристик сцепления с грунтом и внешних возмущающих воздействий. Особенно уязвимыми в этом отношении являются разомкнутые системы управления, не обладающие механизмами компенсации параметрических возмущений. Обеспечение динамической устойчивости движения в таких условиях является критической задачей, решение которой ограничено возможностями бюджетных аппаратных платформ. Целью исследования является разработка и анализ замкнутой системы управления с обратной связью для мобильного агротехнического робота, которая снижает чувствительность системы к изменению коэффициента усиления объекта управления. В работе применены методы теории автоматического управления: частотный анализ, построение передаточных функций, анализ функций чувствительности и критерий устойчивости Найквиста. Численное моделирование и построение частотных характеристик выполнены в программной среде Matlab. Объектом исследования выступает разработанная авторами архитектура системы управления мобильным агротехническим роботом. Сравнительный анализ разомкнутой и замкнутой систем показал, что введение обратной связи снижает чувствительность к изменениям параметров на низких частотах (до 1 рад/с) до значений модуля функции чувствительности менее 0,8. Установлено, что увеличение коэффициента усиления минимизирует установившуюся ошибку, однако требует нахождения компромисса для сохранения запаса устойчивости по фазе. Обоснованы оптимальные параметры настройки регулятора для исследуемого аппаратно-программного комплекса. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании и настройке систем управления мобильных агрегатов и робототехнических платформ, функционирующих в условиях изменяющихся параметров объекта управления и внешних возмущений.

Ключевые слова: регулятор, робот, электропривод, разомкнутая система, замкнутая система

Для цитирования: Угловский А.С., Семеренко Н.Ю. Повышение устойчивости системы электрооборудования мобильного агротехнического робота методом компенсации параметрических возмущений // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126) С. 58-70 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-58-70>

INCREASING THE STABILITY OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT SYSTEM OF A MOBILE AGRICULTURAL ROBOT BY COMPENSATION OF PARAMETRIC DISTURBANCES

Artem S. Uglovskiy ^{1✉}, Natalia Yu. Semerenko²
Yaroslavl State Agrarian University, Yaroslavl, Russia

¹a.uglovskii@yarcx.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5678-4786>

²semerenko@yarcx.ru

Abstract. In real operating environment of mobile agricultural machinery, the parameters of the control object inevitably vary due to changes in the payload mass, ground grip characteristics, and external disturbances. Open-loop control systems that lack compensating mechanisms for parametric disturbances are particularly vulnerable in this regard. Ensuring dynamic travelling stability in such conditions is a critical task. Yet its solution is limited by the capabilities of low-cost hardware platforms. The study aim was to develop and analyze a closed-loop feedback control system for a mobile agricultural robot. This system would reduce the system's sensitivity to changes in the control object's gain. The study utilizes the methods of automatic control theory: frequency analysis, transfer function construction, sensitivity function analysis, and the Nyquist stability criterion. Numerical modeling and the construction of frequency responses were performed in the Matlab software environment. The study object was the architecture of the control system for a mobile agricultural robot developed by the authors. A comparative analysis of the open-loop and closed-loop systems showed that introducing the feedback reduced the sensitivity to parameter changes at low frequencies (up to 1 rad/s) to sensitivity function modulus values less than 0.8. It was found that increasing the gain minimized the steady-state error, but required a compromise to maintain the phase stability margin. Optimal controller tuning parameters for the hardware and software system under study were substantiated. The practical significance of the study lies in the potential application of the obtained results in the design and tuning of control systems for mobile units and robotic platforms operating under conditions of changing control object parameters and external disturbances.

Keywords: controller, robot, electric drive, open system, closed system

For citation: Uglovskiy A. S., Semerenko N. Yu. Increasing the stability of the electrical equipment system of a mobile agricultural robot by compensation of parametric disturbances. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126): 58-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-58-70>

Введение. Мобильные робототехнические агрегаты эксплуатируются в промышленной, аграрной и транспортной областях в условиях пространственной подвижности и неопределённости параметров внешней среды, что предъявляет повышенные требования к системам управления. Существенной особенностью таких объектов управления является изменение их динамических параметров в процессе эксплуатации, обусловленное вариацией нагрузки, состоянием опорной поверхности, износом приводов и воздействием

внешних возмущений. Указанные факторы приводят к снижению точности и устойчивости систем управления, особенно при использовании разомкнутых архитектур.

В ряде работ исследованы системы управления мобильными роботами с использованием классических регуляторов и методов компьютерного моделирования. В частности, в [1-5] рассмотрены вопросы моделирования движения, планирования траекторий и разработки алгоритмов управления мобильными роботами. Достоинством указанных исследований является проработка кинематических и алгоритмических аспектов управления.

Существующие подходы к управлению часто базируются на классических методах ПИД-регулирования [6] или сложных методах адаптивного управления с использованием технического зрения [7], где основной акцент делается на траекторном планировании мобильных агрегатов, а не на динамической устойчивости приводов. Существующие подходы к организации локальных контуров управления [8] подтверждают целесообразность разделения уровни регулирования. Вместе с тем, проблема оценки чувствительности подобных систем к частотным возмущениям в условиях ограниченных ресурсов гибридных платформ остается открытой.

Научная новизна исследования заключается в том, что на основе математических моделей и классических методов теории управления выполнен целенаправленный анализ чувствительности системы управления мобильного агротехнического робота к параметрическим возмущениям в частотной области, а также показано влияние коэффициента усиления на робастность и динамические характеристики системы. В отличие от существующих работ, акцент сделан на сравнительном анализе разомкнутой и замкнутой систем управления применительно к мобильному роботу с учётом практических ограничений по качеству переходных процессов.

Целью данного исследования является разработка и анализ замкнутой системы управления с обратной связью для мобильного агротехнического робота, которая снижает чувствительность системы к изменению коэффициента усиления объекта управления. Кроме того, задача исследования состоит в минимизации искажений и влияния внешних помех на процесс управления мобильным роботом.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования использовалась модель мобильного агротехнического робота, представленная в виде системы управления, способной функционировать как в открытом, так и в замкнутом контуре. Для описания динамики системы применялись математические модели, основанные на дифференциальных уравнениях второго порядка, а также передаточные функции регулятора и всей системы управления [1, 8-10].

Разработка мобильного агротехнического робота концептуально разделена на шесть основных функциональных подсистем: управление, контроль, электропривод, энергия, интеграция и техническое зрение. Детальная структурная схема (рис. 1), разработанная авторами статьи, иллюстрирует взаимодействие ключевых аппаратных компонентов и потоков данных между подсистемами.

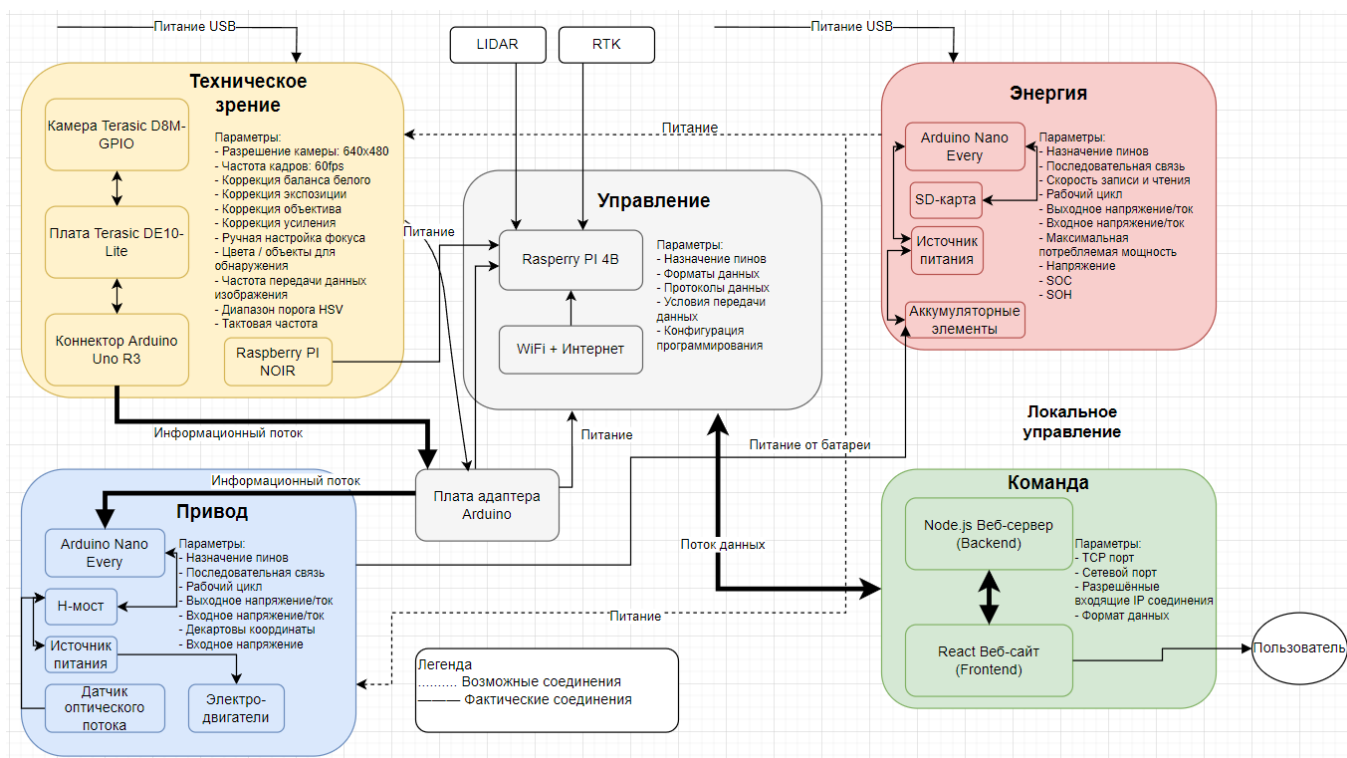


Рис. 1. Структурная схема, показывающая оборудование и параметры подсистем мобильного агротехнического робота (разработано авторами)

Fig. 1. Structural diagram showing the equipment and parameters of the subsystems of the mobile agricultural robot (developed by the authors)

На рисунке 1 показаны линии питания, так и соединения передачи данных, а также соответствующие стрелки, где необходима направленная передача информации. Аппаратное обеспечение каждой подсистемы имеет набор настраиваемых параметров, которые определяются в рамках проектирования.

Центральным элементом подсистемы «Управление» является одноплатный компьютер Raspberry Pi 4B, координирующий работу всего мобильного агротехнического робота. Raspberry Pi 4B обеспечивает беспроводную связь с другими устройствами по Wi-Fi (5 ГГц) и Bluetooth, а также обрабатывает данные с внешних датчиков, таких как LIDAR и RTK. Взаимодействие с подсистемами «Техническое зрение», «Энергия» и «Привод» осуществляется через прямые соединения, а также через плату-адаптер Arduino, которая также служит для передачи данных в подсистему «Управление». Конфигурация GPIO Raspberry Pi 4B позволяет использовать до 3 портов SPI, 2 портов I2C и 3 портов UART, предоставляя широкий набор периферийных устройств для эффективного обмена данными с различными микроконтроллерами [2].

Подсистема «Техническое зрение» построена на базе камеры Terasic D8M-GPIO и ПЛИС Terasic DE10-Lite, что обеспечивает высокоскоростную обработку изображений в реальном времени. При формировании требований к системе управления и взаимодействию с подсистемой навигации учитывались результаты исследований, посвящённых планированию пути мобильного робота с использованием метода искусственных потенциальных полей [3].

Подсистема «Энергия» включает в себя плату Arduino Nano Every, SD-карту для записи данных, блок питания и аккумуляторные батареи, обеспечивающие стабильное питание всех компонентов мобильного агротехнического робота, включая Raspberry Pi 4B.

При проектировании подсистемы энергии учитывался опыт построения мобильных систем с активными исполнительными механизмами [4].

Движение мобильного робота обеспечивается подсистемой «Привод», состоящей из электродвигателей, управляемых через H-мост с помощью платы Arduino Nano Every. Ключевым элементом комплекса выступает оптический датчик потока, который осуществляет прецизионное определение пространственных параметров движения с максимальной точностью [5].

Взаимодействие с оператором осуществляется через подсистему «Команда», представляющую собой веб-интерфейс, разработанный с Node.js для серверной части и React для клиентского интерфейса.

Методы исследования включали аналитическое построение и изучение передаточных функций как для разомкнутой, так и для замкнутой схемы управления.

Для численного моделирования и построения годографов Найквиста использовалась среда Matlab. Выбор данного инструментария обусловлен его эффективностью при анализе динамики локальных контуров управления и оценке общей устойчивости мобильных роботов частотными методами [9, 10], что легло в основу методики текущего исследования.

Примененный в данной работе подход к анализу устойчивости согласуется с принципами построения надежных систем управления приводами, описанными в работе Короткого О. А. [11].

Результаты. Упрощённая модель мобильного робота изображена на рисунке 2. Система может работать без обратной связи (рис. 2а) или с обратной связью (рис. 2б). Цель – управлять роботом с минимальными искажениями от помех, таких как препятствия, и с низкой чувствительностью к изменениям коэффициента усиления K .

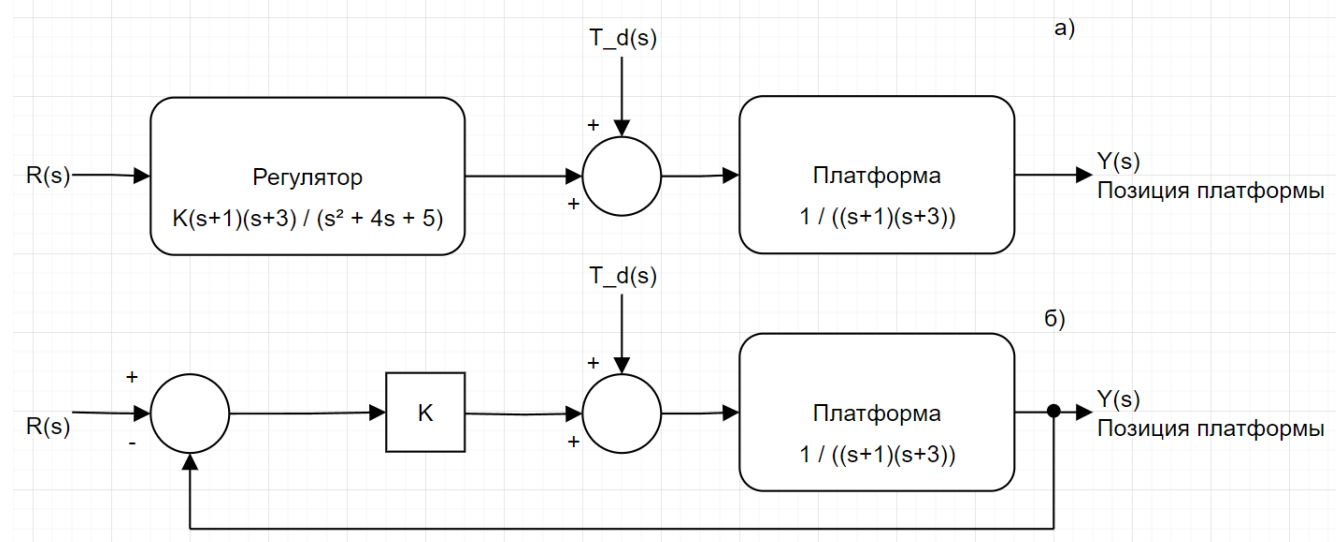


Рис.2. Схема (а) – открытая система (без обратной связи); схема (б) – замкнутая система (с обратной связью)

Fig. 2. Scheme (a) – open system (without feedback); scheme (b) – closed system (with feedback)

Передаточная функция регулятора:

$$G_c(s) = \frac{K(s+1)(s+3)}{s^2+4s+5}, \quad (1)$$

Запишем числитель и знаменатель:

$$G_c(s) = K \frac{s^2+4s+3}{s^2+4s+5}, \quad (2)$$

Пусть вход контроллера – ошибка $e(t) = r(t) - y(t)$, выход – управляющее воздействие $u(t)$.

Тогда:

$$U(s)(s^2+4s+5) = KE(s)(s^2+4s+3), \quad (3)$$

Временная область:

$$\frac{d^2u(t)}{dt^2} + 4\frac{du(t)}{dt} + 5u(t) = K \left(\frac{d^2e(t)}{dt^2} + 4\frac{de(t)}{dt} + 3e(t) \right), \quad (4)$$

Обозначим:

$y(t)$ – выход (позиция мобильного агротехнического робота);

$r(t)$ – задающий сигнал (команда);

$e(t) = r(t) - y(t)$ – ошибка управления;

$u(t)$ – управляющее воздействие (выход регулятора).

Тогда система уравнений (математическая модель):

$$\begin{cases} \frac{d^2y}{dt^2} + 4\frac{dy}{dt} + 3y = u(t) \\ \frac{d^2u}{dt^2} + 4\frac{du}{dt} + 5u = K \left(\frac{d^2e}{dt^2} + 4\frac{de}{dt} + 3e \right) \\ e(t) = r(t) - y(t) \end{cases}, \quad (5)$$

Подставим $e(t) = r(t) - y(t)$ во второе уравнение:

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 4\frac{du}{dt} + 5u = K \left(\frac{d^2r}{dt^2} + 4\frac{dr}{dt} + 3r - \frac{d^2y}{dt^2} - 4\frac{dy}{dt} - 3y \right), \quad (6)$$

Получили систему двух связанных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих динамику управления мобильным агротехническим роботом:

$$\begin{cases} \frac{d^2y}{dt^2} + 4\frac{dy}{dt} + 3y = u(t) \\ \frac{d^2u}{dt^2} + 4\frac{du}{dt} + 5u = K \left(\frac{d^2r}{dt^2} + 4\frac{dr}{dt} + 3r - \frac{d^2y}{dt^2} - 4\frac{dy}{dt} - 3y \right) \end{cases}, \quad (7)$$

Передаточная функция для разомкнутой системы:

$$T_0(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2+4s+5}, \quad (8)$$

Система управления с обратной связью.

Передаточная функция для замкнутой системы:

$$T_0(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + 4s + 3 + K}, \quad (9)$$

При $K=2$:

$$T(s) = T_0(s) = T_0(s) = \frac{2}{s^2 + 4s + 5}, \quad (10)$$

Анализ чувствительности.

Следовательно, можно сравнить чувствительность разомкнутой и замкнутой систем для одинаковой передаточной функции.

Чувствительность разомкнутой системы:

$$S_k^{T_0} = \frac{dT_0}{dK} \cdot \frac{K}{T_0} = 1. \quad (11)$$

Чувствительность замкнутой системы:

$$S_k^{T_c} = \frac{dT_c}{dK} \cdot \frac{K}{T_c} = \frac{s^2 + 4s + 3}{s^2 + 4s + 3 + K}, \quad (12)$$

Для исследования влияния чувствительности на низких частотах положим $s = j\omega$ [12, 14]:

$$S_k^{T_c} = \frac{dT_c}{dK} \cdot \frac{K}{T_c} = \frac{s^2 + 4s + 3}{s^2 + 4s + 3 + K}, \quad (13)$$

При $K = 2$ чувствительность на низких частотах $\omega < 0,1$ составляет $|S_k^{T_c}| \approx 0,6$ (безразмерная величина).

Частотная характеристика величины чувствительности показана на рисунке 3.

Следует отметить, что чувствительность для низких частот составляет:

$$|S_k^{T_c}| < 0,8 \text{ для } \omega \leq 1$$

Влияние возмущений.

Воздействие помех может быть определено путем установки $R(s) = 0$ и задания $T_d(s) = 1/s$. Тогда для разомкнутой системы получаем установившееся значение:

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{1}{(s+1)(s+3)} \right) \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{3}. \quad (14)$$

Как показано в разделе 4.4, выходной сигнал замкнутой системы при единичном ступенчатом возмущении $T_d(s) = 1/s$ составляет:

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{1}{s^2 + 4s + 3 + K} \right) \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{3 + K}, \quad (15)$$

При $K = 2$ получаем $y(\infty) = 1/5$. Поскольку мы стремимся минимизировать воздействие помех, очевидно, что большее значение K было бы предпочтительным. Увеличенное значение K , такое как $K = 50$, дополнительно уменьшит влияние помех, а также снизит величину чувствительности. Однако при увеличении K свыше $K = 50$ переходные характеристики системы для скачкообразного входного сигнала $r(t)$ начинают ухудшаться.

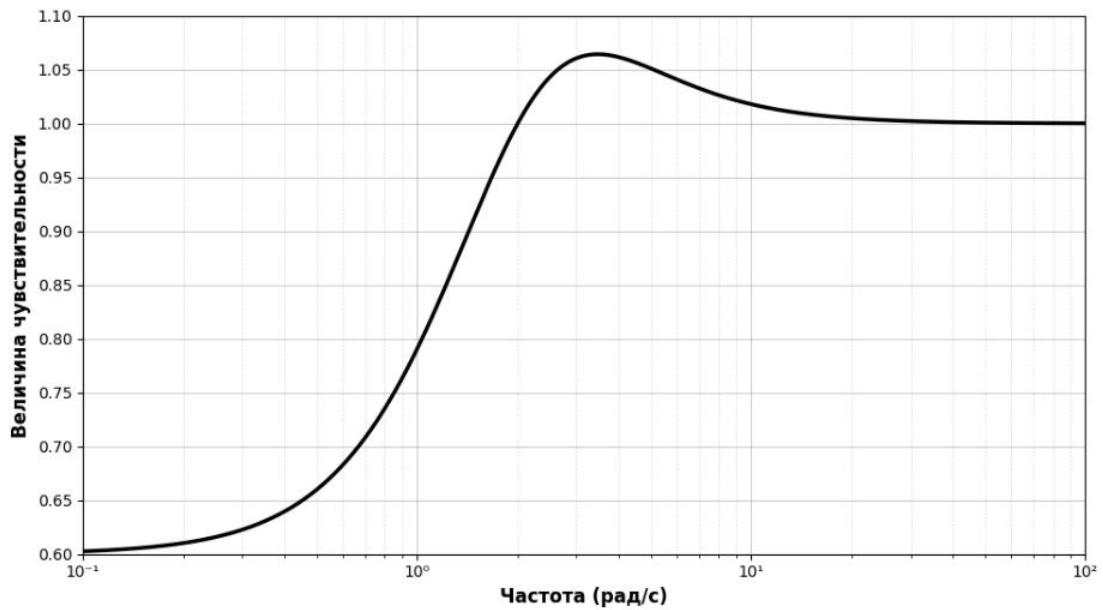


Рис. 3. Зависимость величины чувствительности от частоты

Fig. 3. Dependence of sensitivity value on frequency

Годограф Найквиста 4 (а) показывает, как комплексное значение $L(j\omega)$ обходит точку $-1 + j0$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ .

Если контур не охватывает точку -1 , система с обратной связью устойчива [9, 10]. На графике 4 (б) видно, что контур не пересекает критическую точку $-1 + j0$, что указывает на отсутствие опасных фазовых сдвигов, приводящих к колебаниям или неустойчивости.

Для $K=2$ система устойчива, что подтверждается расположением полюсов и формой годографа. Запас по фазе и усилению положительный, что обеспечивает надёжное управление мобильным агротехническим роботом с минимальными колебаниями.

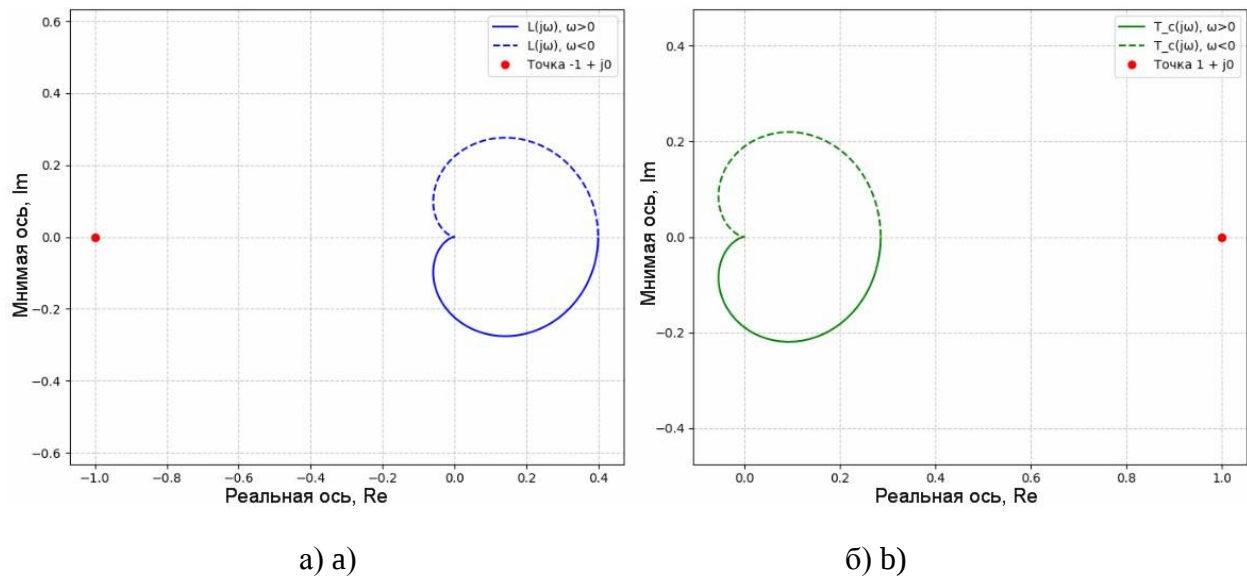


Рис. 4. Годограф Найквиста разомкнутой (а) и замкнутой (б) систем

Fig. 4. Nyquist hodograph of open (a) and closed (b) systems

Таблица 1 представляет ключевые аспекты работы системы управления мобильным агротехническим роботом.

Таблица 1. Сравнительная таблица характеристик
Table 1. Comparative table of characteristics

Параметр	Открытая система	Замкнутая система ($K=2$)	Замкнутая система ($K=50$)
Время переходного процесса	Очень большое / Нестабильно	Умеренное (2-3 с)	Быстрое (0.5-1 с)
Перерегулирование	Неконтролируемо	Низкое (0-5%)	Высокое (20-30%)
Установившаяся ошибка	Высокая / Неопределенная	Низкая $y(\infty)=1/5$ при возмущении)	Очень низкая (стремится к 0)
Чувствительность на низких частотах	$S_W^K(s) = 1$	≈ 0.6	≈ 0.1

Обсуждение. Анализ показал, что замкнутый контур обратной связи – основной элемент для обеспечения робастности электропривода мобильного агротехнического робота. Снижение величины параметрической чувствительности $\square_{\square}$ на низких частотах до 0,6 (при $K=2$) по сравнению с 1,0 в разомкнутой системе имеет прямое практическое применение. Похожая картина наблюдается и с ошибкой от внешних возмущений (помех). Ее снижение с $y(\infty) = 1/3$ до $y(\infty) = 1/5$ (при $K=2$) означает, что электропривод с обратной связью будет значительно лучше справляться с резкими внешними нагрузками. При наезде мобильного агротехнического робота на препятствие или при резком увеличении сопротивления почвы электропривод быстрее скомпенсирует возросший момент нагрузки и вернется к заданному режиму работы.

Анализ по критерию Найквиста подтвердил, что выбранное значение $K=2$ обеспечивает подавление помех, и устойчивость системы.

Согласно работе Р. Corke [12], точность планирования траектории и соблюдение кинематических ограничений мобильных платформ напрямую зависят от качества отработки команд на низком уровне управления приводами. Минимизация динамических искажений, достигнутая в данной работе, позволяет более эффективно интегрировать алгоритмы технического зрения, описанные в исследованиях S. J. Kim et al [13]. Как показано в работах [14,15], современные системы предотвращения столкновений, крайне требовательны к предсказуемости отклика исполнительных механизмов. Любое некомпенсированное внешнее воздействие на уровне электропривода может привести к накоплению ошибок позиционирования, что критически затрудняет работу алгоритмов планирования траектории в реальном времени.

Полученные нами цифры количественно подтверждают положения теории автоматического управления, изложенные в работах R. C. Dorf [9] и N. S. Nise [10], V. Moysiadis et al [16]. Данные авторы приводят теоретические доказательства того, что обратная связь снижает чувствительность к параметрам объекта и улучшает компенсацию возмущений.

Выводы. Внедрение замкнутого контура обратной связи (при $K=2$) в систему управления электроприводом снижает его параметрическую чувствительность $\square_{\square}$ на

низких частотах до 0,6 по сравнению с 1,0 в разомкнутой системе, что дает почти 40 процентное снижение восприимчивости к изменению внутренних параметров электрооборудования (к изменению КПД двигателя или падению напряжения питания). Установившаяся ошибка от помех $y(\infty)$ уменьшается с $1/3$ (в разомкнутой системе) до $1/5$, что критично для устойчивого движения мобильного агротехнического робота на неровном грунте. Рост коэффициента усиления K улучшает подавление помех, чрезмерные значения (в модели – свыше 50) приводят к нежелательным колебаниям и ухудшают переходные характеристики. Анализ по критерию Найквиста подтвердил, что система электропривода при выбранном коэффициенте $K=2$ остается устойчивой, так как годограф не охватывает критическую точку $(-1 + j0)$.

Таким образом, выбор оптимального коэффициента усиления K для электропривода мобильного агротехнического робота позволяет сбалансировать устойчивость системы, низкую чувствительность к параметрам электрооборудования и способность компенсировать внешние нагрузки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Компьютерное моделирование системы управления четырёхколёсным мобильным роботом в пакете Simulink // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 1(65). С. 128-135. EDN: AGZIDT
2. Угловский А. С. Система управления движением мобильного робота // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 2(66). С. 98-108. EDN: WFPSEJ
3. Угловский А. С. Исследование планирования пути мобильного робота с искусственным потенциальным полем // Вестник АПК Верхневолжья. 2024. № 3(67). С. 107-116. EDN: OJQXCB
4. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Мобильная система для уничтожения сорных растений с использованием высоковольтного разряда и обратной связи на основе датчика тока // Агротехника и энергообеспечение. 2024. № 4(45). С. 26-33. EDN: SACMNZ
5. Угловский А. С., Семеренко Н. Ю. Моделирование работы мобильного робота для обоснования его функциональных параметров и алгоритма управления // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 57-72. EDN: NNUDIN
6. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A review of literature // International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2021. Vol. 6(3). P. 48-53. <https://doi.org/10.32628/IJSRCSEIT.0639>
7. Marroquín A., Garcia G., Fabregas E., Aranda-Escolástico E., Farias G.. Mobile robot navigation based on embedded computer vision // Mathematics. 2023. Vol. 11 (11), 2561. <https://doi.org/10.3390/math11112561>
8. Лариошкин И. Н., Акименко Т. А. Система управления робототехническим комплексом на базе мобильного робота с локальными контурами управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 9. С. 260-265. EDN: YRVKHX
9. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern control systems. 13th ed. Boston: Pearson. 2016. 1032 p.
10. Nise N. S. Control Systems Engineering. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Limited. 2025. 896 p.
11. Короткий О. А., Лоскутов С. А., Корнеев А. А. Системы управления мобильным роботом // Известия Института инженерной физики. 2023. № 1 (67). С. 11-15. EDN: BOZDQO

12. Corke P. Robot arm kinematics // Robotics, Vision and Control. Textbook. 2nd ed. Cham: Springer. 2017. P. 191-226. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7
13. Kim S. J., Kim B. H., Cho H. G. Vision-based obstacle avoidance of autonomous mobile robots using deep learning // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2018. Vol. 24(5). P. 420-427. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2018.18.0056>
14. Raol J. R., Ayyagari R. Control systems: Classical, modern, and AI-based approaches. Boca Raton: CRC Press. 2019. 668 p. <https://doi.org/10.1201/9781351170802>
15. Al-Khafaji I. M. A., Panov A. V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2023. № 3. С. 35-47. <http://dx.doi.org/10.14529/ctcr230304>
16. Moysiadis V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations: a narrative review on planning aspects // Applied Sciences. 2020. Vol. 10 (10), 3453. <https://doi.org/10.3390/app10103453>

REFERENCES

1. Uglovskiy A.S., Semerenko N.Yu. Computer simulation of the four-wheel mobile robot control system in the Simulink package. Vestnik APK Verkhnevolzh'ya = Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2024;1 (65):128-135. (In Russ.) EDN: AGZIDT
2. Uglovskiy A. S. Mobile robot motion control system. Vestnik APK Verkhnevolzh'ya = Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2024;2(66):98-108. (In Russ.) EDN: WFPSEJ
3. Uglovskiy A. S. Mobile robot path planning study with artificial potential field. Vestnik APK Verkhnevolzh'ya = Herald of Agroindustrial complex of Upper Volga region. 2024;3 (67):107-116. (In Russ.) EDN: OJQXCB
4. Uglovskiy A. S., Semerenko N. Yu. Mobile weed killing system using high voltage discharge and current sensor feedback. Agrotekhnika i energoobespechenie = Agricultural Techniques and Energy Supply. 2024;4 (45):26-33. (In Russ.) EDN: SACMNZ
5. Uglovsky A. S., Semerenko N. Yu. Simulation of the operation of a mobile robot to justify its functional parameters and control algorithms. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2023;4 (117):57-72. (In Russ.) EDN: NNUDIN
6. Deshmukh A., Gupta M. PID Controller: A Review of Literature. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2021;6(3):48-53. (In Eng.) <https://doi.org/10.32628/IJSRCSEIT.0639>
7. Marroquín A., Garcia G., Fabregas E., Aranda-Escolástico E., Farias G.. Mobile robot navigation based on embedded computer vision. Mathematics. 2023;11(11), 2561. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/math11112561>
8. Larioshkin I. N., Akimenko T. A. Control system for a robotic complex based on a mobile robot with local control loops. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2020;9: 260-265. (In Russ.) EDN: YRVKHX
9. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern control systems. 13th ed. Boston: Pearson. 2016. 1032 p. (In Eng.) — ISBN 978-0134407623.
10. Nise N. S. Control Systems Engineering. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Limited. 2025. 896 p. (In Eng.)

11. Korotkiy O. A., Loskutov S. A., Korneev A. A. Mobile robot control systems. Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki = Bulletin of Institute of Engineering Physics. 2023;1 (67):11-15. EDN: BOZDQO
12. Corke P. Robot Arm Kinematics. In: Robotics, Vision and Control. Textbook. 2nd ed. Cham: Springer. 2017:191-226. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-319-54413-7_7
13. Kim S. J., Kim B. H., Cho H. G. Vision-based obstacle avoidance of autonomous mobile robots using deep learning. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2018; 24(5):420-427. (In Eng.) <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2018.18.0056>
14. Raol J. R., Ayyagari R. Control systems: Classical, modern, and AI-based approaches. Boca Raton: CRC Press. 2019. 668 p. (In Eng.) <https://doi.org/10.1201/9781351170802>
15. Al-Khafaji I. M. A., Panov A. V. Federated learning for vision-based obstacle avoidance in mobile robots Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control, Radioelectronics. 2023;3:35-47. (In Eng.) <http://dx.doi.org/10.14529/ctcr230304>
16. Moysiadi V., Tsolakis N., Katikaridis D., Sørensen C., Pearson S., Bochtis D. Mobile robotics in agricultural operations: a narrative review on planning aspects. Applied Sciences. 2020;10 (10), 3453. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/app10103453>

Об авторах	About the authors
Угловский Артем Сергеевич Канд.техн. наук, доцент кафедры электрификации, Ярославский государственный аграрный университет, Тутаевское шоссе, д.58, Ярославль, 150042, Россия a.uglovskii@yarcx.ru https://orcid.org/0000-0002-5678-4786	Artem S. UGLOVSKIY Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrification, Yaroslavl State Agrarian University, Tutaevskoe Shosse, 58, Yaroslavl, 150042, Russia a.uglovskii@yarcx.ru https://orcid.org/0000-0002-5678-4786
Семеренко Наталья Юрьевна, Старший преподаватель кафедры электрификации, Ярославский государственный аграрный университет, Тутаевское шоссе, д.58, Ярославль, 150042, Россия semerenko@yarcx.ru	Natal'ya Yu. Semerenko Senior Lecturer of the Department of Electrification, Yaroslavl State Agrarian University, Tutaevskoe Shosse, 58, Yaroslavl, 150042, Russia semerenko@yarcx.ru
Заявленный вклад авторов Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования.	Authors' contribution All authors of this study were directly involved in its design, execution, and analytical work.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declare no conflict of interest.
Авторы прочитали и одобрили	The authors have read and approved the final

окончательный вариант рукописи к публикации	version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 28.10.2025	Received: 28.10.2025
Одобрена после рецензирования: 13.01.2026	Approved after reviewing: 13.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

Научная статья
УДК 621.791

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-70-86

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ВАЛОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Сайфуллин Ринат Назирович¹, Миннихметов Ирек Сарварович^{2✉},

Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

¹bashagregat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>

²irek1109@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-9056>

Аннотация. В условиях импортозамещения и повышения требований к экологической безопасности аграрного сектора особую актуальность приобретают ресурсосберегающие технологии восстановления изношенных деталей сельскохозяйственной техники. Одной из таких технологий являются электроконтактные методы, которые обладают преимуществами по сравнению с дуговой наплавкой, такими как меньший нагрев детали, отсутствие выгорания легирующих элементов и минимальные припуски на механическую обработку. Однако существующие материалы для этих методов – ленты, проволока и порошки – имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение. Целью данного исследования являлась разработка способа изготовления и изучение характеристик новой композитной порошковой проволоки для электроконтактной приварки. В качестве основы использовалась низкоуглеродистая стальная проволока Св-08, на которую методом спекания с нагревом пропускаемым током наносился железный порошок марки ПЖРЗ.200.28. В предыдущих исследованиях экспериментально установлены оптимальные параметры процесса спекания (время выдержки 40-45 сек), обеспечивающие прочное сцепление порошкового слоя, который не осыпается. Исследован процесс приварки полученной проволокой на цилиндрические детали. Показано, что при электроконтактной приварке формируется композитное покрытие, состоящее из зон деформированной проволоки и пористого спечённого порошка. Определены зависимости ширины наплавленного валика от диаметра детали, погонной массы порошка от времени напекания и плотности порошковой зоны покрытия. Ускоренные испытания на износ показали, что износостойкость композитного покрытия в 1,4-1,5 раза выше, чем у покрытия из стандартной проволоки. Разработанная технология позволяет создавать износостойкие покрытия с

заданными свойствами, способствует ресурсосбережению, снижению себестоимости ремонта и уменьшению нагрузки на агроэкосистему за счёт сокращения отходов и энергозатрат.

Ключевые слова: электроконтактная приварка, металлический порошок, порошковая проволока, порошковый припой, восстановление изношенных деталей

Для цитирования: Сайфуллин Р.Н., Миннихметов И. С. Разработка композитной порошковой проволоки для электроконтактного восстановления изношенных валов сельскохозяйственной техники // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126) С. 70-87 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-70-86>

Research article

Universal Decimal Code 621.791

DEVELOPMENT OF COMPOSITE FLUX-CORED WIRE FOR ELECTRIC CONTACT RESTORATION OF WORN SHAFTS OF AGRICULTURAL MACHINERY

Rinat N. Saifullin¹, Irek S. Minniakhmetov^{2✉},

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

¹bashagregat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8765-6461>

²irek1109@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8554-9056>

Abstract. In the context of import substitution and increasing environmental safety requirements in the agricultural sector, the resource-saving technologies for restoring worn-out parts of agricultural machinery are becoming increasingly important. One such technology is electric contact welding. It offers advantages over arc welding. These are lower component heating, no burnout of an alloying element, and minimal machining allowances. However, existing materials for this method – strips, wires, and powders – have several significant drawbacks that limit their use. The aim of this study was to develop a manufacturing method and characterize a new composite flux-cored wire for electric contact welding. The study used a SV-08 low-carbon steel wire as the base. The PZHR3.200.28 iron powder was applied on the base by sintering method with heating by passing an electric current. The previous experiments established the optimal sintering parameters (namely, the holding time of 40 to 45 seconds), ensuring strong adhesion of the powder layer without crumbling. The study explored the welding with the use of the resulting wire on cylindrical parts. The study demonstrated that electric contact welding produced a composite coating that consisted of zones of deformed wire and porous sintered powder. The study determined the relationships between the deposited bead width and the part diameter, the linear powder mass and the sintering time, and the density of the powder coating zone. Accelerated wear tests showed that the wear resistance of the composite coating was 1.4-1.5 times higher than that of a coating made from standard wire. The developed technology enables the creation of wear-resistant coatings with specified properties, promotes resource conservation, reduces repair costs, and alleviates the burden on the agroecosystem by reducing waste and energy consumption.

Keywords: contact welding, metal powder, flux-cored wire, powder solder, restoration of worn parts

For citation: Saifullin R. N., Minniakhmetov I. S. Development of composite flux-cored wire for electric contact restoration of worn shafts of agricultural machinery. AgroEcoEngineering. 2026;1(126): 70-87. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-70-86>

Введение. В условиях импортозамещения и роста требований к экологической безопасности аграрного сектора особую актуальность приобретают задачи увеличения ресурса сельскохозяйственной техники и снижения затрат на её обслуживание. Некоторую долю в структуре ремонтов составляет восстановление изношенных деталей, в частности, валов. Электроконтактные методы восстановления изношенных валов можно назвать прогрессивными и ресурсосберегающими. Они основаны на шовной сварке и выгодно отличаются от электродуговых способов.

Электроконтактные методы обеспечивают меньший нагрев детали, предотвращают выгорание легирующих элементов и минимизируют припуски на последующую механическую обработку.

При электроконтактном восстановлении используют стальные ленты, проволоки и металлические порошки. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки [1].

Ленты усложняют процесс электроконтактной приварки (ЭКП) из-за необходимости раскрытия и закрепления. Даже при оптимальных условиях возникают дефекты, такие как поры, трещины и выкрашивание. В приваренном слое часто появляются значительные растягивающие напряжения [2, 3].

Стальные проволоки имеют структурную неоднородность и ускоряют износ электродов.

Напекание порошков сложно контролировать по толщине и плотности слоя, а также велики потери материала [1].

Перспективно комбинировать материалы для создания композитных покрытий. Например, приваривают стальную сетку с подачей порошка в зону соединения [4, 5].

Из металлических порошковых материалов (ПМ) можно изготовить порошковые проволоки, которые рекомендуем использовать для ЭКП с целью восстановления изношенных деталей машин (получения износостойких порошковых покрытий на изделиях).

Одним из ведущих производителей изделий из металлических порошков и композиционных материалов является завод порошковой металлургии АО «ПОЛЕМА» (г. Тула). Продукция компании применяется более, чем в 20 отраслях промышленности. Например, при ремонте сельскохозяйственной техники применяются припои порошковые, смеси порошков для покрытий и др.

Порошковые материалы классической сварочной проволоки улучшают качество металла шва и повышают устойчивость сварочной дуги. При плавлении эти материалы образуют гомогенный сплав необходимого состава, определяемого соотношением состава и количества ПМ и материала оболочки. В состав порошковой проволоки (лент) наряду с металлическими ПМ, которыми служат смеси различных ферросплавов, могут вводить также газообразующие, шлакообразующие, раскислительные вещества и др. Эти дополнительные материалы учитывают особенности плавления металлов в случае существования и образования во времени сварочной ванны. При ЭКП наличие таких веществ в присадочном материале может препятствовать процессам сварки, протекающим без расплавления соединяемых материалов, где не желательно чрезмерное размельчение ПМ ферросплавов (чрезмерное размельчение приводит к выплескам при электроконтактной приварке) [6, 7].

Промышленность выпускает пустотелые присадочные проволоки с порошковым наполнителем для дуговой сварки. Однако такие проволоки не подходят для электроконтактной наплавки. В Башкирском государственном аграрном университете (Р.Н. Сайфуллин, М.З. Нафиков и др.) предложили использовать стальную присадочную проволоку сплошного сечения, на которую наплавляют металлический порошок, для электроконтактной наплавки изношенных поверхностей [1].

В предлагаемом материале имеется возможность комбинирования материалов, которые затруднительно получить сплавлением. При использовании в качестве второго компонента ПМ можно получить проволоку со спечённым слоем, которую в последующем

приваривают ЭКП с получением твёрдых износостойких и антифрикционных поверхностных слоёв [8, 9].

В работе [10] проанализированы особенности наплавленных слоев порошками сплавов системы Ni-Cr-B-Si, полученных технологией газотермического наплавления, даны характеристики методов нанесения покрытий. Исследованы микроструктура покрытий и определены их механические свойства. Также установлено, что добавление оксида кремния в состав известной порошковой смеси позволяет получить самозатачивающееся пилообразное лезвие рабочего органа во время эксплуатации, благоприятно влияющее на срезание волокнистой структуры сорных растений, а также повышает ресурс рабочего органа [11]. И.И. Загировым и др. установлено, что в наплавленном ЭКП слое формируются, в отличие от контактной приварки стальных лент и порошков, благоприятные сжимающие напряжения [2]. А.И. Куловым и др. отмечено, что замена традиционно выполняемых цилиндрических отверстий на конические позволяет снизить потери присадочной стали при сверлении с 19,4 до 6,5 % без снижения качества (прочности) приварки [12]. В.С. Наталенко и др. проведена расчётно-экспериментальная оценка толщины покрытия, полученного ЭКП металлической тканой сетки на детали из бронзы. Отмечено, что разница в значениях, полученных расчётным и экспериментальным путём, составляет 4,5-10,3 % с достаточным припуском на последующую механическую обработку детали в размер [13]. А.П. Павловым и др. показано, что толщина покрытия рассмотренных металлических тканых сеток, полученная расчётным путём, достаточно хорошо коррелирует с толщиной покрытия, полученной экспериментально при оптимальных параметрах режима электроконтактной приварки [14]. Также предлагают комбинированную присадку, состоящую из 2-х слоев – стальной ленты и тканой металлической сетки, способствующую упрочнению деталей, повышающую производительность и технологичность процесса электроконтактной приварки [5].

М.З. Нафиковым и др. обоснован выбор комбинированного присадочного материала для восстановления деталей электроконтактной приваркой. Указано, что наиболее перспективным для восстановления деталей с малыми износами является присадочный материал, представляющий из себя комбинацию ленты и тканой сетки [4].

Таким образом, разработанный способ создания порошковых проволок (лент) для ЭКП отличается от известных. В этом исследовании рассматривается восстановление валов стальной проволокой с нанесённым на неё порошком.

Предлагаемая разработка способствует решению современных задач аграрного машиностроения:

1) Ресурсосбережение и снижение себестоимости: восстановление валов локальной наплавкой значительно дешевле их полной замены. Использование доступной стальной проволоки и порошков отечественного производства снижает зависимость от импорта и удешевляет процесс ремонта.

2) Снижение нагрузки на агроэкосистему:

- уменьшение отходов (восстановление деталей вместо их утилизации сокращает объём металлолома и потребность в производстве новых запасных частей, что ведёт к снижению энергозатрат и выбросов парниковых газов);

- повышение надёжности техники (износостойкие покрытия, получаемые из порошковых композиций, увеличивают межремонтный период сельскохозяйственных машин. Это минимизирует простои в критические периоды полевых работ, что способствует

сохранению урожая сельскохозяйственных культур и рациональному использованию земельных ресурсов);

- разработка биологических технологий (данный метод является основой для создания новых экологически ориентированных технологических процессов ремонта, характеризующихся низким энергопотреблением и минимальным использованием первичных ресурсов).

3) Гибкость и инновационность (метод позволяет комбинировать материалы, которые трудно получить сплавлением. Это открывает путь к созданию специализированных покрытий с заданными свойствами — износостойкими, антифрикционными, коррозионностойкими, адаптированных под конкретные условия эксплуатации сельскохозяйственной техники).

Таким образом, существующие присадочные материалы для электроконтактного восстановления либо технологически сложны в применении (ленты), либо экономически неэффективны (импортные проволоки), либо не обеспечивают требуемых эксплуатационных характеристик (стандартные стальные проволоки). Это создаёт предпосылки для разработки нового композитного материала, лишённого указанных недостатков.

Цель исследования. Разработка способа изготовления проволоки со спечённым слоем порошка для электроконтактной приварки и исследование её характеристик.

Материалы и методы. Для получения проволоки со спечённым слоем порошка использовался метод спекания порошкового материала. Для спекания порошкового материала использовался его нагрев прохождением электрического тока через стальную проволоку, нагрев которой приводил к нагреву металлического порошка и его спеканию.

В качестве стальной проволоки использовалась низкоуглеродистая сталь марки 08кп. В качестве порошкового материала использовался железный порошок марки ПЖРЗ.200.28. Для нагрева стальной проволоки применялась установка для стыковой сварки марки МС-801.

Технологическими свойствами порошка, спечённого на стальной проволоке являются прочность, гибкость и электропроводность. Достаточная прочность необходима для осуществления ЭКП на детали машин. Гибкость определяет возможность приварки на цилиндрические детали. Электропроводность лент определяет возможность ЭКП данных присадочных материалов и режимы электроконтактной приварки.

Силу тока при спекании определяли с помощью измерителя сварочного тока АСУ-1М. Продолжительность импульса тока и продолжительность пауз при ЭКП определяли по регулятору времени РВИ- 501.

Планируя поисковые эксперименты, подбор оптимальных режимов спекания порошков по критерию качества спекания порошков со стальной проволокой определяли классическим методом (метод Гаусса-Зейделя). Качество спекания порошков со стальной проволокой и между собой определялась визуально по осыпанию порошка при огибании вокруг цилиндров разного диаметра. Гибкость определялась при однократном огибании образцов вокруг металлических цилиндров различного диаметра (рис. 1): от 5 до 90 мм (через 5 мм). За критерий гибкости принимали наименьший диаметр цилиндра, при котором образец разрушался.



Рис. 1. Ступенчатый вал для определения гибкости спечённых лент

Fig. 1. Stepped shaft for determining the flexibility of sintered tapes

Результаты. Проведённые эксперименты подтвердили возможность изготовления стальной присадочной проволоки сплошного сечения, на которую наплавляют металлический порошок, для ЭКП изношенных поверхностей. В зажимах стыковой сварочной установки МС-801 закрепили сварочную электродную проволоку Св-08 ГОСТ 2246-70 диаметром 1,8 мм. Проволоку пропустили через бункер с порошком ПЖР3.200.28 ГОСТ 9849-86. При включении тока порошок притягивался к проволоке и припекался к её поверхности. Масса напечённого порошка и прочность его сцепления с проволокой зависят от силы тока (температуры нагрева проволоки) и времени выдержки. При недостаточной силе тока и выдержке слой порошка легко осыпается с проволоки, а при избыточной выдержке оплавляется и растрескивается.

В более ранних исследованиях установлено, что при оптимальном времени выдержки (40-45 с) слой порошка, нанесённый на проволоку, получается хрупким и трескается при сгибании или навивке вокруг цилиндрической детали, но не осыпается. Такая проволока может быть намотана на катушки большого диаметра (более 300 мм) без повреждения порошкового слоя [1].

Рисунок 2 объясняет принцип изготовления порошковых проволок для ЭКП (закljučающийся в спекании металлического ПМ на стальной низкоуглеродистой проволоке), учитывающий особенности контактной сварки [1, 15].

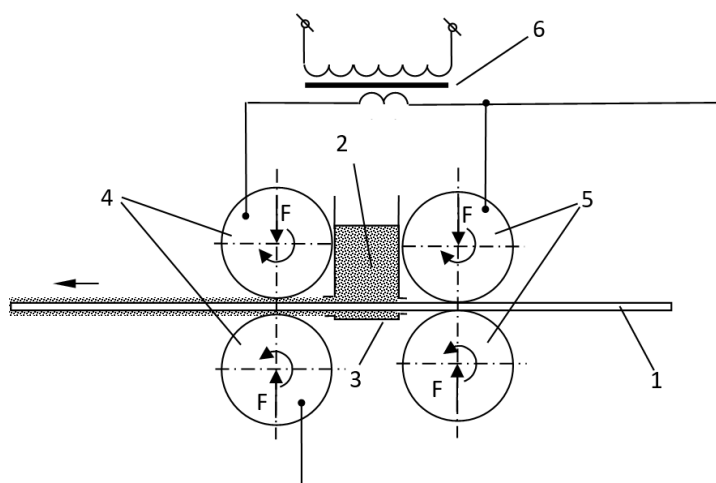


Рис. 2. Схема изготовления порошковой проволоки:

1 – электродная проволока; 2 – порошковый материал; 3 – бункер; 4-5 – ведущая и ведомая пары вращающихся роликовых электродов; 6 – источник тока

Fig. 2. Powder wire manufacturing scheme:

1 – electrode wire; 2 – powder material; 3 – hopper; 4-5 – leading and driven pairs of rotating roller electrodes; 6 – electric current source

Порядок изготовления электродной порошковой проволоки (рис. 2):

1) Электродную проволоку (1) протягивают через бункер (3) с порошковым материалом (2) между ведущими (4) и ведомыми (5) роликами.

2) По одному из роликовых электродов ведущей (4) и ведомой пар (5) подключены к источнику тока (6).

3) При прохождении тока через электродную проволоку (1) она нагревается с максимальной температурой на середине расстояния между вращающихся роликовых электродов (4 и 5).

4) Между роликовыми электродами (4 и 5) расположен бункер (3) с порошковым материалом (2), который напекается на нагретую электродную проволоку.

5) После прохождения через бункер электродная проволока (1) с напечённым слоем ПМ втягивается между ведущими (4) вращающимися роликовыми электродами, которые подключены параллельно к источнику тока (6).

6) Ток, проходящий между ведущей парой (4), нагревает электродную проволоку с напечённым слоем ПМ и образует форму по профилю образующей роликов.

Таким образом, данная операция последовательно повторяется по всей длине проволоки. В данном случае выдержкой и проходящим током определялась прочность сцепления ПМ с проволокой. При недостаточных выдержке и токе порошковый слой на проволоке осыпается, при продолжительных — оплавляється и образуются трещины (рис. 3).

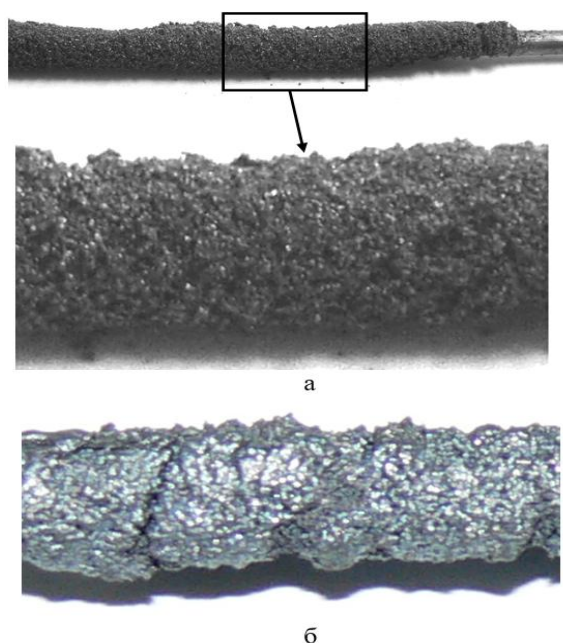


Рис. 3. Порошковая проволока:

a – при оптимальных условиях; б – при продолжительных условиях

Fig. 3. Flux-cored wire:

a – under optimal conditions; b – under long-lasting conditions

При оптимальных условиях выдержке и токе полученный на проволоке слой ПМ не осыпается, получается относительно хрупким и при сгибании (навивке) вокруг цилиндрической детали трескается (рис. 4).



Рис. 4. Трещины на порошковой проволоке

Fig. 4. Cracks in flux-cored wire

Порошковая проволока может навиваться на катушки большого диаметра (более 300 мм) без разрушения сплошности порошкового слоя и привариваться ЭКП к поверхности деталей машин (рис. 5).



Рис. 5. Поверхность покрытия после ЭКП

Fig. 5. Surface of the coating after electric contact welding

Для уменьшения выдавливания напечённого порошка из-под роликового электрода рекомендуем использовать широкие роликовые электроды.

Соприкасавшаяся часть проволоки с днищем бункера при напекании порошка остаётся оголённой (рис. 6).



Рис. 6. Оголённая часть порошковой проволоки

Fig. 6. Exposed part of the flux-cored wire

Таким образом, уменьшается расход дорогостоящего ПМ и улучшается свариваемость покрытия с поверхностью детали.

Порошковую проволоку можно использовать для восстановления изношенных цилиндрических деталей машин с помощью установок «Ремдеталь» 011-1-05, 011-102Н, 01-11.022М и других. Шаг наплавки по винтовой линии должен быть значительно больше (примерно в 2-3 раза), чем при наплавке обычной стальной проволоки.

Порошковая проволока разогревается импульсами тока. Её стальная основа осаживается и приваривается к детали. Порошок, покрывающий проволоку, выдавливается из контактов и прессируется как наплавляющим роликом, так и деформируемой стальной основой. Затем он припекается к поверхности детали и к сварному валику, образуя композитное покрытие из чередующихся витков присадочной проволоки и металлического порошка (рис. 5). Схема приваренного слоя проволоки с напечённым слоем порошка

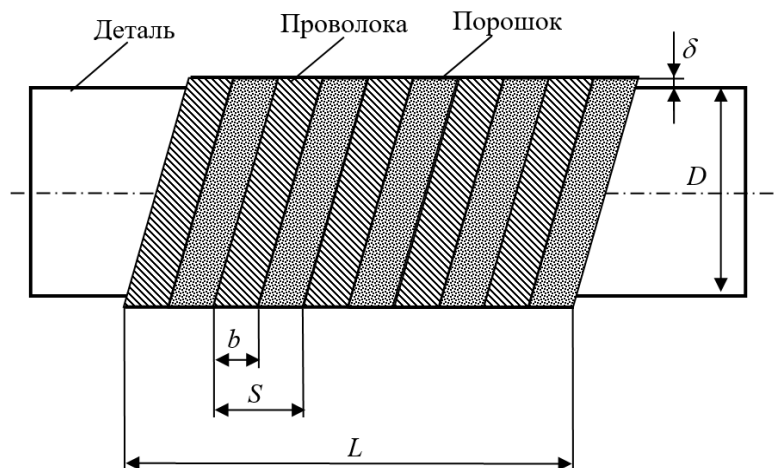


Рис. 7. Схема приваренного слоя проволоки с напечённым слоем порошка
Fig. 7. Schematic diagram of a welded wire layer with a sintered powder layer

Присадочная проволока при наплавке испытывает трёхмерную пластическую деформацию. Для прочного соединения стальной проволоки с основой детали необходимо, чтобы осевая составляющая деформации была в пределах $\varepsilon_{OC} = 0,42\text{--}0,46$. Поэтому режим наплавки следует подбирать с учётом этого условия.

Для наплавки композитных проволок рекомендуется использовать ролики-электроды шириной не менее 15 мм.

Для определения плотности порошковой зоны на покрытии (рис. 6) произвели следующие расчёты.

Из проволоки длиной $L_{ПП}$ и диаметром d на деталь диаметром D наваривается сварной валик длиной L_B , шириной b и высотой δ . Относительная осевая деформация присадочной проволоки равна:

$$\varepsilon_{OC} = (L_B - L_{ПП}) / L_{ПП}.$$

Отсюда длина напавленного валика:

$$L_B = L_{ПП} (1 + \varepsilon_{OC}).$$

Объёмы присадочной проволоки и сварного валика практически равны между собой:

$$V_{ПП} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L_{ПП} = V_B = b \cdot \delta \cdot L_B.$$

Таким образом, среднюю толщину металлопокрытия можно определить без её непосредственного измерения:

$$\delta = \frac{\pi \cdot d^2}{4(1 + \varepsilon_{OC}) \cdot b}.$$

Число витков покрытия при наплавке шейки длиной L с шагом S :

$$n = L / S. \quad (1)$$

Длина одного витка покрытия равна:

$$L_{ED} = \sqrt{(\pi \cdot D)^2 + S^2} \quad (2)$$

Определим число витков покрытия как отношение длины сварного валика к длине одного витка:

$$n = L_B / L_{ED} \quad (3)$$

Приравняв выражения (1) и (3) с учётом (2) определяли длину восстанавливаемой шейки при наплавке присадочной проволоки длиной L_{PP} :

$$L = \frac{S \cdot L_B}{\sqrt{(\pi \cdot D)^2 + S^2}}$$

Объём нанесённого слоя (из порошка и проволоки):

$$V = \pi \cdot D \cdot L \cdot \delta$$

Объём напечённого на деталь порошка:

$$V_{II} = V - V_{PP} = \pi \cdot D \cdot L \cdot \delta - L_{PP} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Плотность напечённого порошка равна:

$$\rho_{II} = \frac{M_{II}(1 - \kappa_{II})}{V_{II}},$$

где M_{II} — масса использованного порошка;

κ_{II} — коэффициент потерь порошка (принимается 5 %).

На рисунке 8 представлена экспериментально найденная зависимость ширины наплавленного стального валика от диаметра восстанавливаемой детали [4].

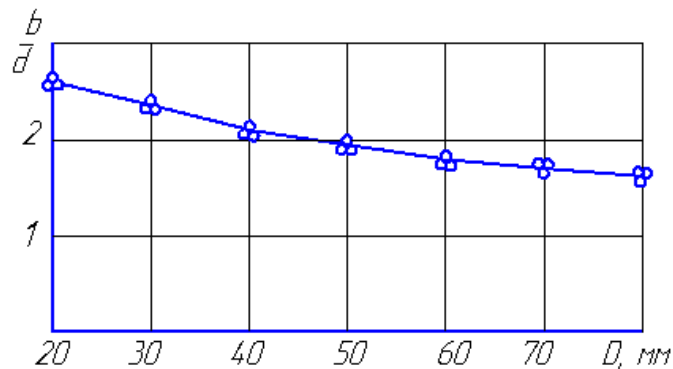


Рис. 8. Экспериментальные значения относительной ширины b/d наплавленного валика при электроконтактной наплавке валов различных диаметров (при $\varepsilon_y = 0,44...0,46$)

Fig. 8. Experimental values of relative width b/d weld bead during electric contact surfacing of shafts of various diameters (at $\varepsilon_y = 0,44...0,46$)

При проведении опытов регулированием тока наплавки добивались оптимального значения осевой деформации присадочной проволоки $\varepsilon_{oc} = 0,45$. Шаг наплавки по винтовой линии устанавливали из соотношения $S \cong (2...3)b$.

В поисковых экспериментах также была определена зависимость массы порошка ПЖР3.200.28, нанесённого на проволоку Св-08 диаметром 1,8 мм, от времени выдержки (рис. 9). Массу напекаемого порошка измеряли весовым методом. Температура нагрева проволоки при нанесении на неё порошка поддерживалась в пределах 1300-1350 °С.

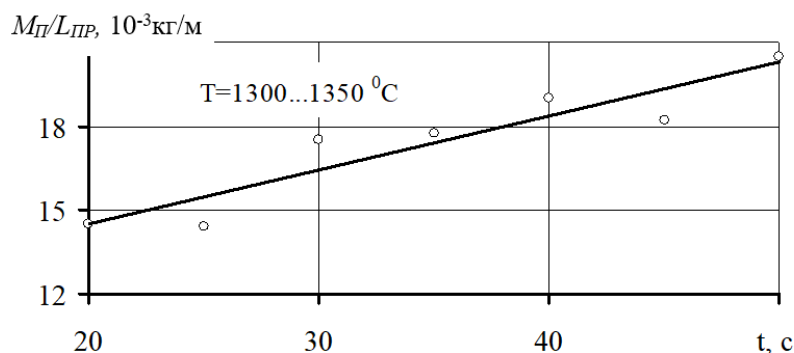


Рис. 9. Зависимость погонной массы напечённого на проволоку порошка от времени напекания

Fig. 9. Dependence of the linear mass of powder sintered onto the wire on the sintering time

Плотность напекаемого покрытия на поверхности восстанавливаемой детали зависит от погонной массы порошка, нанесённого на проволоку, и от технологических параметров режима электроконтактной наплавки детали (шага наплавки по винтовой линии и эффективного значения тока наплавки).

Подсчитаны значения плотности для случая наплавки шейки диаметром $D = 50$ мм проволокой Св-08 диаметром $d = 1,8$ мм с порошком ПЖР 3.200.28. При вычислениях было принято $\varepsilon_{oc} = 0,45$, $S = 2b = 7$ и $S = 3b = 10,5$ мм. На рисунке 10 показан график зависимости плотности ρ от времени выдержки t напекания порошка на присадочную проволоку.

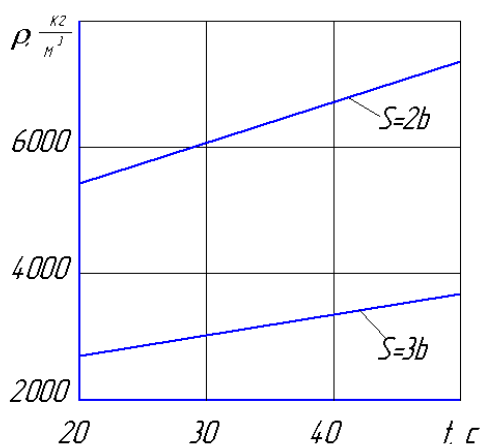


Рис. 10. Плотность нанесённой на поверхность восстанавливаемой детали порошковой зоны покрытия в зависимости от длительности процесса напекания порошка на проволоку

Fig. 10. The density of the powder coating zone applied to the surface of the part being restored, depending on the duration of the powder sintering process on the wire

Наплавленное электроконтактным способом покрытие состоит из двух зон (рис. 7). Первая зона формируется из деформированного металла проволоки, что придает ей высокую прочность и жёсткость. Это покрытие выдерживает значительные нагрузки и выполняет роль каркаса в подвижных соединениях. Вторая зона создаётся из пористого порошка, который хорошо впитывает и удерживает смазку.

Ускоренные испытания на износ по схеме буксового трения показали, что композитное покрытие в 1,4-1,5 раза устойчивее к износу, чем металлопокрытие, созданное электроконтактной приваркой проволоки без покрытия.

Порошок достаточно прочно сцепляется с деталью и витками проволоки, не выкрашивается, его можно механически обрабатывать точением или шлифованием.

Таким образом, из металлических порошков можно изготовить порошковые проволоки, которые можно рекомендовать использовать для ЭКП с целью получения износостойких порошковых покрытий и восстановления изношенных деталей машин.

Обсуждение. Полученные в работе результаты демонстрируют принципиальную возможность и технологическую эффективность предложенного метода изготовления композитной порошковой проволоки. Установленные оптимальные параметры спекания позволяют получать стабильный и прочно сцепленный с основой порошковый слой, пригодный для практического использования. Образование трещин в слое при изгибе не является критическим дефектом, т.к. в процессе последующей ЭКП происходит его дополнительное уплотнение и спекание.

Ключевым результатом исследования является формирование при ЭКП композитного покрытия, состоящего из зон деформированной проволоки и пористого спечённого порошка. Этот результат находится в русле современных тенденций, отмеченных в литературе, где перспективным направлением признано комбинирование материалов для получения покрытий с улучшенными свойствами [4, 5]. Однако, в отличие от известных методов, таких как приварка сетки с подачей порошка [4] или использование комбинированных присадок из ленты и сетки [5], разработанная нами проволока представляет собой единый, готовый к использованию материал. Это существенно повышает технологичность процесса, устраняя необходимость в сложной подготовке и одновременной подаче нескольких присадочных компонентов.

Полученное в работе повышение износостойкости композитного покрытия в 1,4-1,5 раза по сравнению со стандартной проволокой согласуется с исследованиями других авторов, демонстрирующими преимущества композитных и порошковых материалов. Например, Багаутдиновой И.И. и др. было показано, что газотермические покрытия на основе самофлюсующихся порошковых систем также значительно повышают износостойкость рабочих органов [10, 11]. В нашем случае аналогичный эффект достигается за счёт синергетического взаимодействия двух зон в покрытии: проволоочный каркас обеспечивает высокую прочность и сопротивление нагрузкам, а пористая порошковая зона, способная удерживать смазку, придаёт покрытию антифрикционные свойства. Это подтверждает гипотезу о том, что комбинирование разнородных материалов в одном присадочном элементе является эффективным путём модификации поверхностных свойств восстанавливаемых деталей.

Важным аспектом является формирование в наплавленном слое благоприятных остаточных напряжений. В работе Загирова И.И. и др. [2] было установлено, что в отличие от приварки стальных лент, при ЭКП проволокой в покрытии формируются сжимающие напряжения. Можно предположить, что разработанная композитная проволока, основу которой составляет стальная проволока, также будет способствовать формированию благоприятной напряжённой состояния, что положительно сказывается на сопротивлении усталости и третинообразованию.

Предложенная методика расчёта плотности порошковой зоны и установленные зависимости (рис. 8-10) позволяют прогнозировать геометрию и свойства покрытия, что является развитием идей, заложенных в работах по расчётно-экспериментальной оценке толщины покрытий [13, 14]. Это имеет важное практическое значение для планирования технологического процесса восстановления деталей с заданными эксплуатационными характеристиками.

Выявленная необходимость использования широких роликовых электродов (≥ 15 мм) для минимизации выдавливания порошка согласуется с исследованиями, посвящёнными оптимизации режимов ЭКП [3], и подчёркивает важность учёта специфики нового присадочного материала при выборе технологического оснащения.

Таким образом, разработанная технология не только подтверждает выводы предыдущих исследований о преимуществах композитных и порошковых материалов для ЭКП [1, 15], но и предлагает принципиально новое, более технологичное решение в виде готовой композитной проволоки. Это решение способствует решению задач ресурсосбережения и импортозамещения, обозначенных во введении, за счёт использования отечественных материалов (Св-08, ПЖР3.200.28) и снижения трудоёмкости процесса по сравнению с использованием отдельных компонентов (лент, сеток, порошков).

Перспективным направлением дальнейших исследований является использование в качестве наполнителя не только железных, но и легированных порошков, а также порошков карбидов, что позволит целенаправленно формировать покрытия с повышенной износостойкостью, теплостойкостью или коррозионной стойкостью, расширяя область применения разработанной технологии.

Выводы. 1. Разработана и экспериментально подтверждена принципиальная возможность изготовления новой композитной присадочной проволоки для электроконтактной приварки. Технология заключается в напекании металлического порошка (ПЖР 3.200.28) на стальную проволоку сплошного сечения (Св-08) за счёт нагрева последней пропускаемым электрическим током.

2. Установлены критические параметры процесса изготовления проволоки. Определено, что прочность сцепления порошкового слоя с проволокой зависит от силы тока и времени выдержки. Найден оптимальный режим спекания (время выдержки 40-45 секунд), при котором формируется слой, не осыпавшийся с проволоки, но сохраняющий хрупкость, установленный в предыдущих исследованиях [1]. Полученная проволока пригодна для навивки на катушки большого диаметра (свыше 300 мм).

3. Исследован процесс электроконтактной наплавки разработанной проволокой. Показано, что на поверхности детали формируется композитное покрытие, состоящее из двух зон: прочного каркаса из деформированной стальной проволоки и пористой, антифрикционной зоны из спечённого порошка. Для обеспечения качественного соединения установлено, что осевая деформация проволоки должна находиться в пределах 0,42–0,46.

4. Получены экспериментальные зависимости, характеризующие процесс наплавки. Установлены связи между диаметром восстанавливаемой детали и шириной наплавленного валика, а также между временем напекания и погонной массой порошка на проволоке. Определена плотность формируемой порошковой зоны покрытия.

5. Доказано значительное повышение эксплуатационных характеристик. Ускоренные испытания на износ подтвердили, что износостойкость полученного композитного покрытия в 1,4–1,5 раза превышает износостойкость покрытия из стандартной проволоки без

порошкового слоя. Покрытие обладает хорошей обрабатываемостью точением или шлифованием.

6. Разработанная технология имеет значительный ресурсосберегающий и экологический потенциал. Она позволяет создавать износостойкие покрытия с заданными свойствами, снижая стоимость ремонта, зависимость от импорта, объём отходов и энергозатраты, что способствует повышению надёжности сельскохозяйственной техники и снижению нагрузки на агроэкосистему.

Таким образом, исследования подтвердили высокую технико-экономическую и экологическую эффективность предлагаемого способа восстановления изношенных деталей с использованием композитной порошковой проволоки, что открывает перспективы для её внедрения в ремонтную практику сельскохозяйственных предприятий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сайфуллин Р.Н., Нафиков М.З., Загиров И.И. Порошковые покрытия, полученные электроконтактной приваркой // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2023. № 2 (66). С. 136-140. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-66-2-136-140>

2. Загиров И.И., Игнатьев А.Г., Павлов А.П., Костюков А.Ю. Сравнительные исследования остаточных напряжений в металлопокрытиях, сформированных контактной приваркой проволок // Технический сервис машин. 2018. Т. 131. С. 194-201. <https://www.elibrary.ru/uzlaw>

3. Масягутов Р.Ф., Загиров И.И., Фаюршин А.Ф., Зарипов Р.Р., Камильянов М.Р. Оптимальные режимы контактной приварки перфорированной стальной ленты // Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: матер. нац. науч.-практ. конф. с межд. участием (Оренбург, 03 февраля 2023 г.). Оренбург: Оренбургский ГАУ. 2023. С. 613-618. <https://www.elibrary.ru/evrdbf>

4. Нафиков М.З., Павлов А.П., Шаймухаметова Д.М. К выбору комбинированного присадочного материала для восстановления деталей электроконтактной приваркой // Современное состояние, традиции и инновационные технологии в развитии АПК: матер. межд. науч.-практ. конф. в рамках XXXI Межд. специализированной выставки «Агрокомплекс-2021» (Уфа, 23-26 марта 2021 г.). Уфа: Башкирский ГАУ. 2021. С. 113-119. <https://www.elibrary.ru/ojbbda>

5. Павлов А.П., Шаймухаметова Д.М., Нафиков М.З. Стальная тканая сетка в качестве мягкой прослойки // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 2 (58). С. 112-116. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-58-2-112-116>

6. Фархшатов М.Н., Фаюршин А.Ф., Зиганшин Р.А. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (62). С. 144-154. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-62-2-144-150>

7. Фаюршин А.Ф., Багаутдинова И.И., Ахметьянов И.Р., Дик Е.Н., Пермяков В.Н. Исследование микроструктуры лап культиваторов, упрочненных технологией газопламенной наплавки // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2022. № 4 (64). С. 129-136. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-64-4-129-136>

8. Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R., Islamov L., Gaskarov I., Masyagutov R., Bagautdinova I. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19 (1). P. 57-67. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27725>
9. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. Vol. 14-2. P. 153-156. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>
10. Багаутдинова И.И., Фаюршин А.Ф., Зиганшин Р.А. Структура и свойства покрытий на основе самофлюсующихся порошковых систем методами газотермического наплавления // Наука молодых – инновационному развитию АПК: матер. XIII Нац. науч.-практ. конф. молодых ученых (Уфа, 02-03 декабря 2020 г.). Уфа: Башкирский ГАУ. 2020. С. 3-8. <https://www.elibrary.ru/xeruss>
11. Багаутдинова И.И., Фаюршин А.Ф., Петряков В.Г., Пермиков В.Н., Ахметьянов И.Р. Структурообразование и формирование свойств самофлюсующихся покрытий, обеспечивающие повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (62). С. 113-118. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-62-2-113-118>
12. Кулов А.И., Фаюршин А.Ф., Нафиков М.З. Потери присадочной ленты можно уменьшить // Российский электронный научный журнал. 2021. № 1 (39). С. 42-50. <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-39-1-42-50>
13. Наталенко В.С., Павлов А.П., Латыпова Г.Р., Алсобх М. Оценка толщины покрытия, полученного электроконтактной приваркой металлической сетки на цилиндрические детали из бронзы // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ - 2022): сб. науч. статей 14-й Межд. науч.-техн. конф. (Курск, 18 ноября 2022 г.). Курск: Юго-Западный государственный университет. 2022. С. 186-191. <https://www.elibrary.ru/wqkgri>
14. Павлов А.П., Наталенко В.С., Латыпов Р.А. Расчетно-экспериментальная оценка толщины покрытия, полученного электроконтактной приваркой металлической тканой сетки на детали из бронзы // Сварочное производство. 2022. № 11. С. 27-32. <https://www.elibrary.ru/vlovya>
15. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., Fayurshin A., Gaskarov I., Islamov L., Shaymukhametova D. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials // International Journal on Engineering Applications. 2021. Vol. 9 (2). P. 62-70. <https://doi.org/10.15866/irea.v9i2.19511>

REFERENCES

1. Saifullin R.N., Nafikov M.Z., Zagirov I.I. Powder coatings obtained by electric contact welding. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2023;2 (66):136-140. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-66-2-136-140>
2. Zagirov I.I., Ignatiev A.G., Pavlov A.P., Kostyukov A.Yu. Comparative study of residual stresses in the coatings formed by the contact welding of wires. Tekhnicheskii servis mashin = Machinery Technical Service. 2018;131:194-201. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/uzlawa>
3. Masyagutov R.F., Zagirov I.I., Fayurshin A.F., Zaripov R.R., Kamilianov M.R. Optimal modes of contact welding of perforated steel tape. In: Improving Engineering and Technical

Support for Production Processes and Technological Systems. Proc. Nation. Sci. Prac. Conf. with Int. Part. (Orenburg, February 03, 2023). Orenburg: Orenburg State Agrarian University. 2023:613-618. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/evrdbf>

4. Nafikov M.Z., Pavlov A.P., Shaimukhametova D.M. To the selection of combined additive material for parts' restoration of electric contact welding. In: Current State, Traditions and Innovative Technologies in Development of Agro-Industrial Complex: Proc. Int. Sci. Prac. Conf. within the framework of XXXI Int. Specialized Exhibition "Agrocomplex-2021" (Ufa, 23-26 March 2021). Ufa: Bashkir State Agrarian University. 2021:113-119. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ojbbda>

5. Pavlov A.P., Shaimukhametova D.M., Nafikov M.Z. Filler tape as soft layer. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2021;2 (58):112-116. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-58-2-112-116>

6. Farkhshatov M.N., Fayurshin A.F., Ziganshin R.A. Increasing the resource of the working bodies of tilling agricultural machinery. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2022;2 (62):144-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-62-2-144-150>

7. Fayurshin A.F., Bagautdinova I.I., Akhmetyanov I.R., Dick E.N., Permyakov V.N. Investigation of the microstructure of cultivator paws hardened by the technology of gas-flame surfacing. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2022;4 (64):129-136. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-64-4-129-136>

8. Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R., Islamov L., Gaskarov I., Masyagutov R., Bagautdinova I. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing. Journal of Applied Engineering Science. 2021;19 (1): 57-67. (In Eng.) <https://doi.org/10.5937/jaes0-27725>

9. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019; 14-2: 153-156. (In Eng.) <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>

10. Bagautdinova I.I., Fayurshin A.F., Ziganshin R.A. Structure and properties of coatings based on self-fluxing powder systems methods of gas-thermal deposition. In: Science of the Young - For Innovative Development of Agro-Industrial Complex: Proc. XIII Nat. Sci. Prac. Conf. of Young Scientists (Ufa, 2-3 December 2020). Ufa: Bashkir State Agrarian University. 2020: 3-8. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/xeruss>

11. Bagautdinova I.I., Fayurshin A.F., Petryakov V.G., Permyakov V.N., Akhmetyanov I.R. Structure and properties of self-fluxing coatings used for improving wear resistance of tillage tools. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2022;2 (62):113-118. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2022-62-2-113-118>

12. Kulov A.I., Fayurshin A.F., Nafikov M.Z. The loss of the filler tape can be reduced. Rossiiskii elektronnyi nauchnyi zhurnal = Russian Electronic Scientific Journal. 2021;1 (39): 42-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/2308-9644-2021-39-1-42-50>

13. Natalenko V.S., Pavlov A.P., Latypova G.R., Alsobkh M. Evaluation of the coating thickness obtained by electric contact welding of a metal mesh on cylindrical bronze parts. In: Modern automotive materials and technologies (SAMIT - 2022): Proc. 14th Int. Sci. Tech. Conf.

(Kursk, 18 November 2022). Kursk: South-West State University of Russia. 2022:186-191. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/wqkgri>

14. Pavlov A.P., Natalenko V.S., Latypov R.A. Calculation and experimental evaluation of the coating thickness obtained by electric contact welding of a metal woven mesh onto bronze parts. Svarochnoe Proizvodstvo = Welding Industry. 2022; 11: 27-32. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/vlovya>

15. Pavlov A., Saifullin R., Farkhshatov M., Fayurshin A., Gaskarov I., Islamov L., Shaymukhametova D. Study of part restoration modes using electrocontact welding with gauze filler materials. International Journal on Engineering Applications. 2021;9(2):62-70. (In Eng.) <https://doi.org/10.15866/irea.v9i2.19511>

Об авторах	About the authors
Сайфуллин Ринат Назирович д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. E-mail: bashagregat@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8765-6461	Rinat N. Sayfullin Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bashkir State Agrarian University", 450001, Republic of Bashkortostan, Ufa, 50th Anniversary of October Str., 34. E-mail: bashagregat@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8765-6461
Миннихметов Ирек Сарварович канд. с.-х. наук, доцент, 450001, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. E-mail: irek1109@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8554-9056	Irek S. Minniakhmetov Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, 450001, Republic of Bashkortostan, Ufa, 50th Anniversary of October Str., 34. E-mail: irek1109@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8554-9056
Заявленный вклад авторов Р.Н. Сайфуллин – руководство исследованием, концептуализация, методология И.С. Миннихметов – создание черновика и окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация	Authors' contribution R.N. Saifullin – research management, conceptualization, methodology I.S. Minniakhmetov – draft and final version (revision) of the manuscript and its editing, visualization
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interests The authors declare no conflict of interest
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication
Статья поступила в редакцию: 20.10.2025	Received: 20.10.2025
Одобрена после рецензирования: 16.01.2026	Approved after reviewing: 16.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

РАЗДЕЛ 2. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 631.31

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-87-110

РЕСУРСОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОДОБНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВНУТРИПОЧВЕННОГО РЕЦИКЛИНГА В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ЖИВОТНОВОДСТВА

Вячеслав Филиппович Федоренко

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

professorfedorenko@yandex.ru; vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6395-4463>

Аннотация. Любая производственная деятельность человечества обусловлена необходимостью удовлетворения жизненных потребностей и сопряжена с образованием значительных объемов различных отходов и побочных продуктов, которые зачастую загрязняют атмосферу, почвенные и водные ресурсы, негативно влияют на биосферу, растительный и животный мир. В связи с этим в большинстве стран мира в последнее время набирает популярность концепция «ноль отходов» и реализация трех базовых принципов обращения с отходами 3R: Reduce, Reuse, Recycle (сокращай, повторно используй, перерабатывай). Сельское хозяйство является одной из основополагающих в жизнедеятельности человеческой популяции производственных сфер, в которой создаются продукты питания, без них человечество просто не может жить. В результате по различным оценкам в аграрном производстве Российской Федерации образуется около 650 млн т отходов – побочных продуктов, из которых до 60% – в животноводстве, порядка 35% – в растениеводстве, остальное – в перерабатывающей промышленности. В этой связи наиболее перспективны и востребованы процессы, технологии, технические системы рециклинга для переработки побочных продуктов животноводства, образующихся при содержании сельскохозяйственных животных и птицы (навоз, помет, подстилка и сточные воды) и их использование в качестве органических удобрений. Это особенно важно и актуально для растениеводства, поскольку позволит значительно сократить процессы деградации, эрозии сельскохозяйственных земель и вывод их из хозяйственного оборота. Цель исследования – вовлечь побочные продукты животноводства в замкнутый цикл функционирования агроэкосистем, повысить эффективность АПК, сформировать физиологическую и экологическую природоподобную ресурсоэнергоэффективную, агротехнологическую систему, обеспечивающую создание на поверхностях, в тканях, клетках корневой системы растений специализированных ниш. Они в совокупности с микроорганизмами почвы образуют сложные сообщества и являются для растений донорами адаптивно значимых функций: питания, защиты от стрессов, сорняков, возбудителей болезней и пр. В статье представлены основные результаты исследований, обоснования и разработки технологических процессов и технических систем оптимальной интеграции в природную среду и естественный природный ресурсооборот побочных продуктов животноводства посредством их подачи через вертикально погружаемые в корнеобитаемые слои почвы пневмогидробуры. Импульсами сжатого воздуха они осуществляют рыхление, аэрирование, формируют в корнеобитаемых горизонтах полости, поры и микропустоты, в которые затем под давлением подаются водные растворы побочных продуктов животноводства, микробных

биопрепаратов. Это обеспечивает оптимальное орошение, аэрацию, удобрение непосредственно корневой системы растений и рациональную утилизацию побочных продуктов животноводства.

Ключевые слова: ресурсоэнергоэффективные технологии, природоподобные технические системы, рециклинг, побочные продукты животноводства, внутрипочвенная обработка, импульсы сжатого воздуха, электромагнитное воздействие, растения, почвенная биота

Для цитирования: Федоренко В.Ф. Ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенного рециклинга в растениеводстве побочных продуктов животноводства // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1(126). С.87-110 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-87-110>

Research article

Universal Decimal Code 631.31

RESOURCE AND ENERGY EFFICIENT TECHNOLOGY AND A NATURE-LIKE TECHNICAL SYSTEM FOR INTRA-SOIL RECYCLING OF ANIMAL BY-PRODUCTS IN CROP PRODUCTION

Viacheslav F. Fedorenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

professorfedorenko@yandex.ru; vim@vim.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6395-4463>

Abstract. Any human production activity relies on the need to meet the necessities of life. It is associated with the generation of significant amounts of various wastes and by-products. They often pollute the atmosphere, soil and water and have a negative effect on the biosphere, flora and fauna. Consequently, the concept of “zero waste” and introduction of three basic principles of waste management (known as 3R – Reduce, Reuse, Recycle) are gaining global traction. Agriculture is a fundamental production sector for the human population providing food products without which people simply cannot survive. For instance, according to various estimates, approximately 650 million tons of waste (by-products) are generated in the Russian Federation's agricultural sector. Up to 60% of them come from livestock farming, approximately 35% – from crop production, and the remainder – from the processing industry. The most promising and in-demand processes, technologies, and technical systems for waste recycling are those designed primarily for processing the animal by-products generated in livestock housing (animal and poultry manure, bedding, and wastewater) and their use as fertilizers. This process is particularly important for crop production as it will significantly reduce the degradation and erosion of agricultural lands that otherwise may take them out of production. The study aimed to integrate animal by-products into the closed-loop functioning of agroecosystems and improve the efficiency of the agricultural sector. The study objective was to develop a physiologically and ecologically compatible, resource and energy efficient agro-technological system creating specialized niches on the surfaces, tissues, and cells of plant roots. Together with soil microorganisms, these niches form the complex communities and provide adaptively important functions for plants: nutrition, protection from stress, weeds, pathogens, etc. The article presents the main results of research, justification, and development of technological processes and technical systems for optimal integration of animal by-products into the

natural environment and natural resource management. This is supposed to be done by using pneumatic hydro-drills vertically inserted into the root zones of the soil. Using pulses of compressed air, these drills loosen and aerate the soil creating cavities, pores, and microvoids in the root zones. Here the water solutions of prepared animal by-product and microbial preparations are then injected under pressure. This ensures optimal irrigation, aeration, and fertilization of the plant root system itself, and efficient utilization of animal by-products.

Keywords: resource and energy efficient technologies, nature-like technical systems, recycling, livestock by-products, subsurface tillage, compressed air pulses, electromagnetic action, plants, soil biota.

For citation: Fedorenko V.F. Resource and energy efficient technology and nature-like technical system for intra-soil recycling of animal by-products in crop production. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126): 87-110 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-87-110>

Введение. Одной из важнейших задач развития АПК является увеличение темпов прироста объемов производства сельскохозяйственной продукции, не менее 3% в год. Это во многом зависит от темпов ежегодного прироста животноводческой продукции. Как показывает практика, выход основной продукции в животноводстве составляет 15-30% от объемов исходного сырья. Остальное – это побочные продукты животноводства (ППЖ), которые содержат значительное количество ценных веществ и являются потенциальным сырьем для производства дополнительной продукции или утилизируются [1, 2]. Поэтому одной из глобальных проблем АПК является утилизация органических отходов интенсивного животноводства и птицеводства (навоза, помета и стоков). Несмотря на их сырьевую ценность и возможность использования в качестве вторичных ресурсов, работа с ними имеет технические, экономические и экологические ограничения [2-6]. Основной риск обусловлен их токсичностью и значительными негативами от загрязнений окружающей среды при нерациональной утилизации навоза и помета. По сравнению с другими технологическими процессами сельскохозяйственного производства он составляет 85% [6]. По данным Национальной мясной ассоциации в Российской Федерации в хозяйствах всех категорий за год образуется около 300 млн. т. навоза и помета [3].

По разным оценкам, общий объем сельскохозяйственных отходов и побочных продуктов в АПК Российской Федерации достигает 630-650 млн т (рис. 1), которые содержат более 40 млн тонн органического вещества и имеют колоссальный ресурс для превращения их прежде всего в высокоэффективные органические удобрения [4-8].

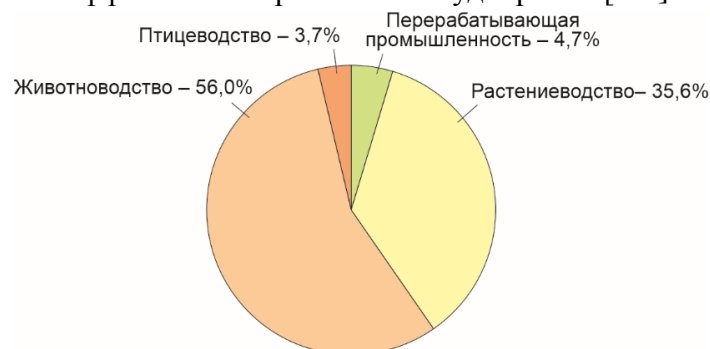


Рис. 1. Структура и объемы образования отходов в АПК Российской Федерации

Fig. 1. The structure and amount of waste generation in the agro-industrial complex of the Russian Federation

При этом степень утилизации навоза и помета остается крайне низкой и по данным экспертов не превышает 45%. Накопление навоза и помета несет ряд проблем экологического характера: непродуктивное использование земель сельскохозяйственного назначения, которые заняты под хранение навоза и помета; высокий риск контаминации почвы, грунтовых и поверхностных вод патогенными, условно-патогенными микроорганизмами, яйцами гельминтов, солями тяжелых металлов, нитратным, аммиачным и амидным азотом, фосфатами; высокий уровень эмиссии парниковых газов (углекислого газа, метана, закиси азота); эмиссия неприятного запаха [5, 6]. По данным Россельхознадзора только за 8 месяцев из 120,9 тыс. гектаров проконтролированных земель сельхозназначения выявлены загрязнения навозом и пометом на площади 5,1 тыс. гектаров [5].

Наиболее перспективным направлением использования ППЖ является применение их для улучшения плодородия почв. В настоящее время доза внесения органических удобрений составляет около 1,5 т/га, что совершенно недостаточно и не обеспечивает поддержание баланса гумуса в почве [7]. Рекомендуется вносить навоз и компост в количестве 8-20 тонн на гектар севооборотной площади, чтобы компенсировать ежегодные потери гумуса, составляющие 0,8-1,6 тонн на гектар [5]. По данным экспертов, около 45% сельхозпроизводителей не заделывают навоз в почву⁴. Основными причинами являются длительная его подготовка к использованию и недостаток специальной техники. В настоящее время, по мнению специалистов, именно поэтому темпы деградации почв в России достигли 2 млн. га в год [5].

На повышение эффективности использования навоза и помета, снижение неблагоприятного экологического воздействия направлено действие ГОСТ 113.15.01-2019⁵, который применяется при внедрении наилучших доступных технологий (НДТ) в интенсивном свиноводстве, птицеводстве. В нем приводится перечень НДТ, способствующих сокращению объема производимого навоза и помета, снижению эмиссий при их длительном хранении, обработке, внесении в почву удобрений на их основе, обезвреживания и обеззараживания, мониторинг эмиссий и параметров их обработки [8].

Для повышения эффективности вовлечения веществ, образующихся при содержании сельскохозяйственных животных и птицы в сельскохозяйственное производство, в том числе для обеспечения воспроизводства плодородия земель сельскохозяйственного назначения был принят Федеральный закон от 14.07.2022 г. №248-ФЗ⁶ [9-11].

По мнению специалистов Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства ИАЭП-филиала ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» важной юридической задачей закона стало закрепление за навозом и пометом в законодательном поле статуса побочных продуктов животноводства и

⁴ Бюллетень «Внесение удобрений под урожай 2024 года, проведение работ по химической мелиорации земель и применяемые почвозащитные агротехнологии» [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen_udobren_2024.xlsx (дата обращения 19.01.2026)

⁵ ГОСТ Р 113.15.01-2019 Наилучшие доступные технологии. Рекомендации по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов сельскохозяйственного производства [Электронный ресурс] URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293728/4293728194.pdf?ysclid=m8mg8b1143338040763> (дата обращения 20.01.2026)

⁶ Федеральный закон «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 14.07.2022 №248-ФЗ [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_4217767/vsclid=m8mrlwp3ox974339989 (дата обращения 25.01.2026)

принятие ряда подзаконных и нормативно-правовых актов, регламентирующих порядок обращения с ППЖ^{7,8,9,10,11}.

В этой связи актуальной является разработка технологических процессов и технических систем, которые базируются на принципиально отличных от подходов земледельческой механики физических принципах, физиологических представлениях о продукционных процессах в растениеводстве и направлены на обеспечение оптимальных условий сохранения и развития агробиоценозов, сформировавшихся при возделывании сельскохозяйственных культур в корнеобитаемых слоях почвы без их оборота и разрушения за счет внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации, создание полостей, микропустот импульсами сжатого воздуха посредством погружения в почву пневмогидробуров, для последующего внесения жидких органических удобрений, получаемых из ППЖ [12-14].

Цель исследования – обоснование инновационных ресурсоэнергоэффективных принципов внутрипочвенного рециклинга жидких органических удобрений в виде ППЖ и формирование природоподобных процессов симбиоза растений и почвенных микроорганизмов посредством вертикального погружения пневмогидробуров в корнеобитаемые горизонты и внутрипочвенные обработки импульсами сжатого воздуха, электромагнитного воздействия, регулируемой подачи растворов ППЖ для максимальной реализации генетического потенциала продуктивности созданных сортов сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. Научные исследования выполнялись на основании анализа теоретических и практических результатов, производственного опыта, действующих нормативно-методических документов¹² с учетом оценки тенденций и результатов исследований развития эмпирического понимания важности и необходимости перехода земледелия и сельскохозяйственного производства на ресурсоэнергоэффективные технологии и природоподобные технические системы рециклинга побочных продуктов животноводства, которые имеют большое значение прежде всего для растениеводства в

⁷ Постановление Правительства Российской Федерации от 2 сентября 2022 года №1542 «О внесении изменения в Положение о Министерстве сельского хозяйства Российской Федерации» [Электронный ресурс] URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_425841/ (дата обращения 20.01.2026)

⁸ Приказ Минсельхоза России от 7 октября 2022 г. № 671 «Об утверждении порядка, сроков и формы направления уведомления об отнесении веществ, образуемых при содержании сельскохозяйственных животных, к побочным продуктам животноводства» [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202210280016> (дата обращения 20.01.2026)

⁹ Постановление Правительства Российской Федерации от 29 октября 2022 года №1925 «О внесении изменений в Положение о федеральном государственном земельном контроле (надзоре) и Положение о федеральном государственном ветеринарном контроле (надзоре)» [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202210310030> (дата обращения 20.01.2026)

¹⁰ Постановление Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 года №1940 «Об утверждении требований к обращению побочных продуктов животноводства» [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/352185302> (дата обращения 20.01.2026)

¹¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 года №3256-р «Об утверждении перечня нарушений требований к обращению побочных продуктов животноводства, в результате которых побочные продукты животноводства признаются отходами» [Электронный ресурс] URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=435181> (дата обращения 20.01.2026)

¹² Закон о побочных продуктах животноводства: что нужно знать [Электронный ресурс] URL: <https://umik.ru/news/zakon-o-pobochnyh-produktah-zhivotnovodstva-chto-nuzhno-znat/> (дата обращения 20.01.2026)

качестве наиболее естественного и эффективного органического удобрения¹³. Были рассмотрены вопросы обеспечения максимальной интеграции их в естественный ресурсооборот; предотвращения формирования и развития деградации и эрозии сельскохозяйственных земель на основании современных принципиальных представлений о физиологии растительных, почвенных организмов, базирующихся в настоящее время на концепции симбиоза растений и почвенных биоценозов; разработки технологических параметров, технических характеристик, потребительских свойств, технических систем и средств для внутрпочвенной обработки, рыхления, аэрации, орошения, внесения удобрений и гидрогеля в корнеобитаемые слои почвы¹⁴ [15-18].

Основные методы научного исследования: анализ, оценка, обобщение информационных, статистических и экспериментальных сведений, данных производственного опыта, проведение лабораторных и полевых исследований. В процессе исследований разработаны и защищены патентами инновационные конструкции пневмогидробуров¹⁵ [18-19, 22].

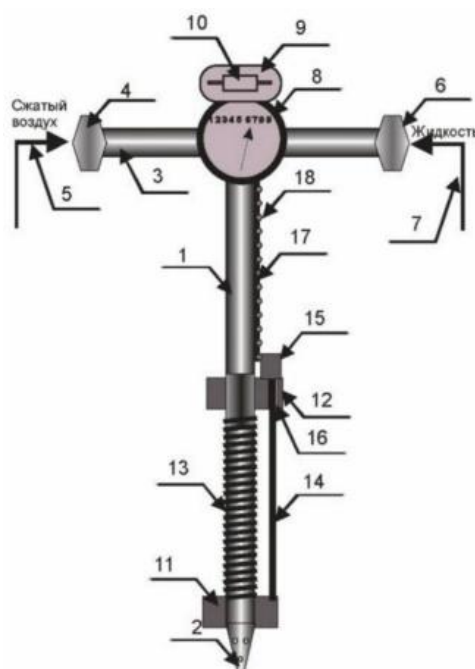


Рис.2. Пневмогидробур внутрпочвенного рыхления, аэрации сжатым воздухом, орошения и удобрения корнеобитаемых слоев почвы (патент № 2838190 РФ, МПК, А01С23/02):

¹³Федеральный закон «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 14.07.2022 №248-ФЗ [Электронный ресурс]URL:https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_421776/?vsclid=m8mrlwp3ox974339989 (дата обращения 25.01.2026)

¹⁴ГОСТ 26074-84 Навоз жидкий. Ветеринарно-санитарные требования к обработке, хранению, транспортированию и использованию [Электронный ресурс] URL:<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828368.pdf> (дата обращения 19.01.2026)

¹⁵Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [Электронный ресурс] URL:<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744162.pdf?ysclid=m8my2wt2io256075884> (дата обращения 25.01.2026)

1 – ствол; 2 – перфорированный наконечник; 3 – полая рукоятка; 4 – воздушный электропневмоклапан; 5 – шланг; 6 – электропневмоклапан; 7 – шланг жидкости; 8 – блок управления; 9 – пенетрометр; 10 – тензометрический датчик силы; 11 – подвижный упор; 12 – неподвижный упор; 13 – возвратная пружина; 14 – измерительный стержень; 15 – магнит; 16 – отверстия; 17 – линейка; 18 – геркон.

Fig. 2. Pneumatic hydro-drill for subsoil loosening, aeration with compressed air, irrigation, and fertilization of the root-bearing layers of soil:

1 – barrel; 2 – perforated tip; 3 – hollow handle; 4 – air electropneumatic valve; 5 – hose; 6 – electropneumatic valve; 7 – liquid hose; 8 – control unit; 9 – penetrometer; 10 – strain gauge; 11 – movable stop; 12 – fixed stop; 13 – return spring; 14 – measuring rod; 15 – magnet; 16 – holes; 17 – ruler; 18 – reed switch.

Подача сжатого воздуха через перфорированный наконечник позволяет осуществить внутрипочвенное рыхление, формирование в почве системы каналов и пустот с одновременной аэрацией воздухом и последующим заполнением водой, растворами удобрений корнеобитаемых слоев почвы, что обеспечивает поддержание благоприятного для корневой системы растений водно-воздушного и аэрохимического режимов. Это обеспечивает формирование оптимальных условий для жизнедеятельности агроценоза, грибов и пр., позволяет проводить рыхление, аэрацию, орошение, удобрение всех видов почвы без оборота корнеобитаемых почвенных слоев, повысить продуктивность почвы, максимально сохранить биологические и экологические ее параметры при высоком качестве энергоэффективности процессов обработки.

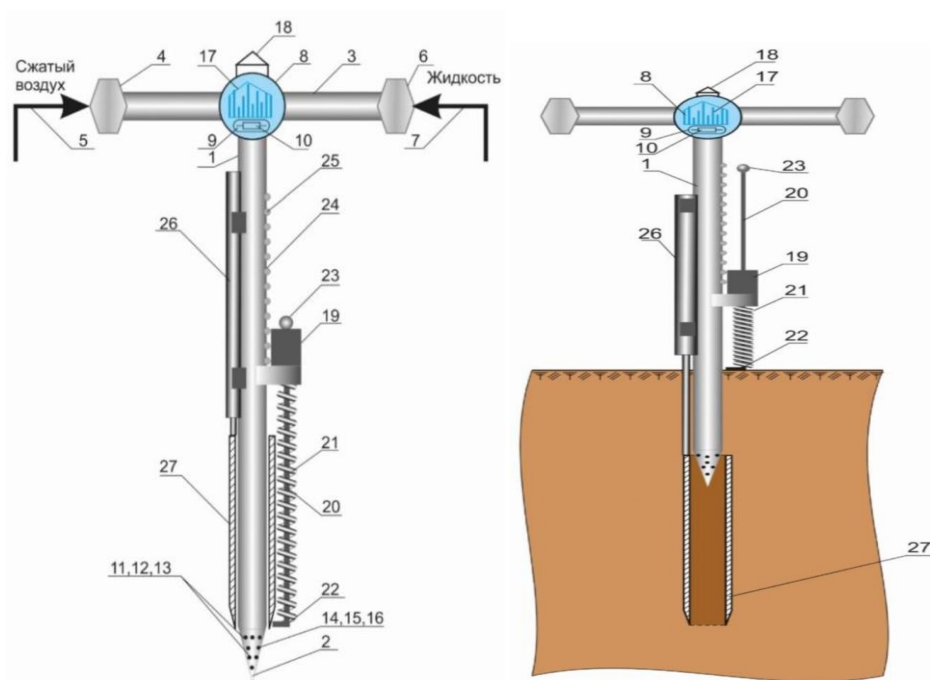


Рис. 3. Пневмогидробур-пробоотборник внутрипочвенных экспресс-мониторинга, обработки и отбора проб почвы (Патент № 2841266 РФ, МПК, G01N1/04):

а) общий вид

б) схема отделения монолит-пробы на заданной глубине почвенного горизонта:

1 – ствол; 2 – перфорированный наконечник; 3 – полая рукоятка; 4 – воздушный электропневмоклапан; 5 – шланг сжатого воздуха; 6 – электропневмоклапан; 7 – шланг

жидкости; 8 – блок управления; 9 – пенетрометр; 10 – тензометрический датчик силы; 11 – датчик влажности; 12 – датчик температуры; 13 – датчик концентрации ионов; 14 – датчик уровня азота; 15 – датчик фосфора; 16 – датчик калия; 17 – цифровые измерительные системы; 18 – записывающие устройства, размещенные в блоке управления; 19 – неподвижный упор; 20 – возвратная пружина; 21 – измерительный стержень; 22 – подвижный упор; 23 – магнит; 24 – линейка; 25 – геркон; 26 – пробоотборное кольцо; 27 – пневмоцилиндр

Fig. 3. Pneumatic hydro-drill - sampler for in-situ express monitoring, processing, and sampling of soil:

a) general view; b) separation scheme of the monolith sample at a given depth of the soil horizon:

1 – trunk; 2 – perforated tip; 3 – hollow handle; 4 – air electropneumatic valve; 5 – compressed air hose; 6 – electropneumatic valve; 7 – liquid hose; 8 – control unit; 9 – penetrometer; 10 – strain gauge; 11 – humidity sensor; 12 – temperature sensor; 13 – ion concentration sensor; 14 – nitrogen level sensor; 15 – phosphorus sensor; 16 – potassium sensor; 17 – digital measuring systems; 18 – recording devices located in the control unit; 19 – fixed stop; 20 – return spring; 21 – measuring rod; 22 – movable stop; 23 – magnet; 24 – ruler; 25 – reed switch; 26 – sampling ring; 27 – pneumatic cylinder.

Предлагаемое изобретение обеспечивает возможность погружения перфорированного наконечника с размещенными в нем датчиками на заданную глубину с одновременным определением величины его пенетрации, проводить последующие внутрипочвенные экспресс-измерения влажности, температуры, концентрации ионов, уровня азота, фосфора, калия. В соответствии с результатами измерений этих параметров в онлайн режиме осуществлять регулируемую внутрипочвенную подачу импульсов сжатого воздуха и растворов агрохимикатов в корнеобитаемые почвенные горизонты, осуществлять экспресс-мониторинг агротехнического и агрохимического состава корнеобитаемых горизонтов почв, формировать электронную карту поля и при необходимости, производить отбор проб почвы с заданной глубины почвенных горизонтов в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 17.4.3.01-2017¹⁶

Подача импульсов воздуха осуществляет внутрипочвенное рыхление, формирование в почве системы каналов и пустот, одновременной аэрацией воздухом, и последующим заполнением водой, растворами удобрений корнеобитаемых горизонтов почвы. Это обеспечивает поддержание благоприятного для корневой системы растений водно-воздушного, агрохимического режимов и позволяет повысить продуктивность почвы, максимально сохранить биологические и экологические ее параметры при высоком качестве энергоэффективности процессов обработки.

Испытания и проверку результатов лабораторных исследований в хозяйственных условиях проводили с использованием изготовленных и смонтированных в кузове автомобиля и тракторного прицепа мобильных лабораторий, которые позволили провести в полевых условиях ряда регионов оценку эффективности внутрипочвенной обработки, подачи импульсов сжатого воздуха и электромагнитные воздействия в корнеобитаемые горизонты

¹⁶ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. Последнее изменение: 17.04.2024 [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508> (дата обращения 25.01.2026)

почвы с последующим внесением органических удобрений на основе ППЖ, водно-воздушных смесей и водных растворов удобрений, пестицида через универсальные пневмогидробуры (рис. 2-3) [19-25].

Результаты и обсуждение. Из анализа отечественного и зарубежного опыта следует, что переработка ППЖ на органические удобрения является перспективным направлением, позволяющим существенно снизить негативное экологическое воздействие, связанное с их накоплением на животноводческих предприятиях, и получить органические и органоминеральные удобрения, которые могут использоваться как внутри хозяйства, так и в качестве товарного продукта [25, 26]. Следует отметить, что по оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), рынок органических удобрений ежегодно растет на 5-10% и, по прогнозам, к 2025 году должен достигнуть 20-25 млн. тонн. Кроме того, они регулируются отдельно как ППЖ (animal by-products). Свежий навоз вносится в почву без предварительной обработки. Аналогичные правила действуют в Великобритании. При этом в стране установлены достаточно жесткие требования: минимальные расстояния от водных источников (хранения и внесения); ограничения внесения и места внесения (зима, заснеженная или замороженная почва); нормативы внесения навоза (по массе) в зависимости от выращиваемых культур. В США навоз и помет могут вносить в почву без обработки в следующих случаях: если вносится в поля, где выращивается культура, не предназначенная для потребления в пищу человеком; если вносится в почву не менее чем за 120 дней до сбора урожая, если съедобная часть растения касается почвы; вносится в почву не менее, чем за 90 дней до сбора урожая - если съедобная часть растения не касается почвы [10, 27-29].

Значительный объем ППЖ имеет жидкое и полужидкое состояние и требует при использовании в качестве органического удобрения соответствующего оборудования и машин для транспортировки и внесения в почву. Внесение навоза различной степени разложения может осуществляться по двум технологическим схемам: прямоточной (ферма-поле) и перевалочной (ферма-бурт-поле) [29-32]. При использовании прямоточной технологии навоз накапливают в прифермском навозохранилище, где осуществляется его выдерживание и обеззараживание и откуда его транспортируют и вносят в поле. Обязательным условием его использования является заделка в почву сразу после внесения, чтобы снизить потери питательных веществ, в первую очередь азота [16-18, 24]. Для внесения жидкого навоза используют цистерны-разбрасыватели или шланговые системы. Наиболее простой технологией внесения жидкого навоза является прямоточная, где все операции от загрузки до внесения выполняет одна машина. Недостатком данной технологии является существенное увеличение транспортных расходов. С целью их оптимизации может применяться комбинированная перегрузочная схема, предусматривающая следующие операции (рис. 4): 1 – загрузка из прифермского навозохранилища и транспортировка до поля; 2 – перегрузка навоза в машину для внесения жидких органических удобрений; 3 – внутрипочвенное внесение. Шланговое внесение возможно для навоза с влажностью 92% и выше. Преимущество шланговых систем заключается в следующем: высокая производительность внесения – от 100 до 450 м³/ч и более; минимальные затраты труда и ГСМ; дальность перекачки одной насосной станцией – до 6500 м. и более с применением дополнительной бустерной станции; быстрое разматывание и сматывание шланговых линий за счет применения плоскосворачиваемых шлангов для перекачки навоза и специальных транспортировщиков, с минимальным привлечением рабочего персонала и техники;

простота эксплуатации и обслуживания. На рисунке 4 представлена система шлангового внесения навоза с использованием оборудования, предлагаемого ООО «МЗ Поток» [22].

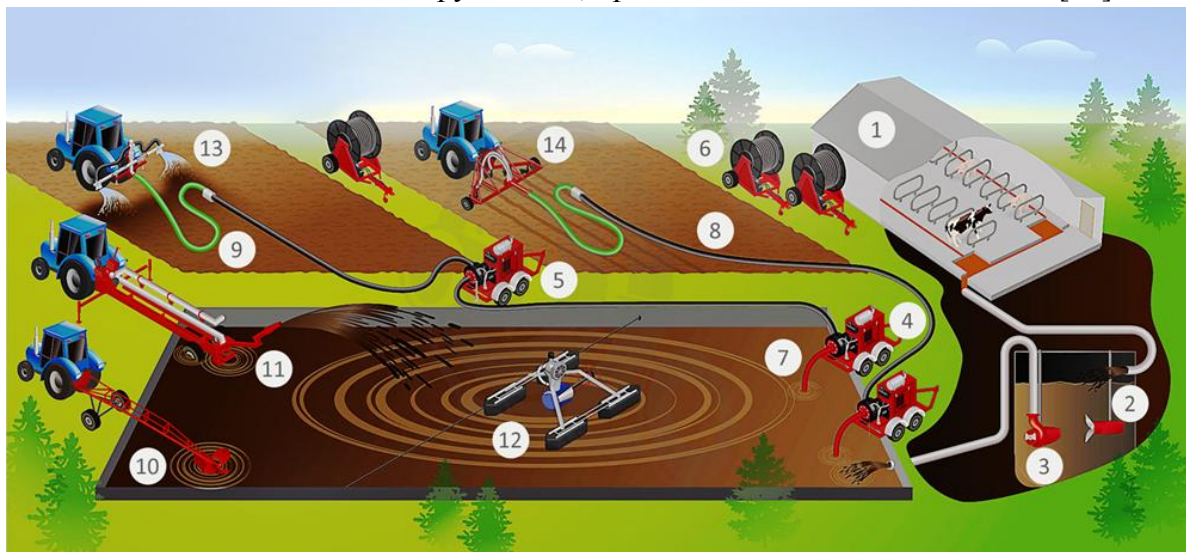


Рис. 4. Принципиальная схема шлангового внесения навоза [28].

1 – животноводческий комплекс; 2 – погружной миксер; 3 – погружной насос; 4 – дизельная насосная станция (основная); 5 – дизельная насосная станция (бустерная); 6 – транспортировщик шлангов; 7 – всасывающая линия; 8 – магистральный шланг; 9 – буксируемый шланг; 10 – лагунный миксер; 11 – лагунная помпа; 12 – миксер-аэратор понтонный; 13 – устройство поверхностного внесения (аппликатор); 14 – устройство внутрипочвенного внесения (культиватор).

Fig. 4. Schematic diagram of manure application by hose [28].

1 – livestock complex; 2 – submersible mixer; 3 – submersible pump; 4 – diesel pumping station (main); 5 – diesel pumping station (booster); 6 – hose conveyor; 7 – suction line; 8 – main hose; 9 – towed hose; 10 – lagoon mixer; 11 – lagoon pump; 12 – pontoon aerator mixer; 13 – surface application device (applicator); 14 – intra-soil application device (cultivator).

Предварительно перемешанный навоз подается по магистральному трубопроводу в центр технологической площадки на поле, где к нему подсоединен буксируемый шланг. При необходимости удлинения системы используют подкачивающие насосные станции. Технические характеристики почвообрабатывающих машин, применяемых в системах шлангового внесения навоза представлены в таблице [26, 28-29].

Таблица. Технические характеристики почвообрабатывающих машин, используемых в системах шлангового внесения жидкого навоза

Table. Technical specifications of tillage machines used in liquid manure hose-based application systems

	Аппликатор	Глубоко-рыхлитель	Культиватор-инжектор		Борона дисковая
Модель	UPV-1/UPV-2	UVV-4/5G/ UVV-4/6G	UVV-5/9D/ UVV-8/14D	UVV-8/14KPE	UVV-6/21x2Dis
Тип агрегата	Навесной	Навесной	Навесной		Навесной
Тип навески	3-х точечная				
Производительность	До 280 м³/ч	0,97-2,73 га/ч	1,1-3,3 га/ч	2,2-6,4 га/ч	Согласно нормам, определяется

					индивидуальн о
Тяговый класс трактора	3 и выше	5 и выше	5 и выше/ 7 и выше	7 и выше	5 и выше
Рабочие органы	Форсунки 1/2	Сопло 5/6 шт.	9/14 шт.	9-14 шт.	Диски – 42 шт., Сопло – 9 шт.
Рабочая ширина захвата	До 7/До 12	4,5	4,8/9	9	6,3
Обработка почвы	Поверхностное внесение ЖОУ*	Внутрипочвенное внесение ЖОУ на глубину до 50 см	Рыхление почвы на глубину до 20 см с внутрипочвенным внесением ЖОУ	Рыхление почвы на глубину до 20 см с внутрипочвенным внесением ЖОУ	Рыхление почвы на глубину до 18 см
Масса	520	До 1050	2400/4000	3000	3100

**Примечание: ЖОУ – жидкие органические удобрения*

Основным преимуществом шланговых систем является меньшая масса сцепки с агрегатом по сравнению с цистернами разбрасывателями. Это позволяет использовать трактора меньшей мощности с меньшей грузоподъемностью и положительно сказывается на сохранении структуры почвы и уменьшении колеечности в поле; не требуется дополнительное время для заправки агрегата; лучшая гомогенизация навозной жижи при разбавлении водой. К недостаткам шланговых систем следует отнести потребность во времени, необходимом для развертывания оборудования и перевозки на новое место, а также значительный износ шлангов при эксплуатации системы на каменистых почвах. Для внесения органических удобрений и снижения выбросов и запахов при внесении в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ изготовлены машины, позволяющие до 50 % сократить выбросы аммиака, что не только положительно влияет на экологию, но и позволяет сохраненные вещества закрепить в почве для питания растений [18, 29].

Анализ свидетельствует, что наиболее перспективными техническими системами для внутрипочвенной обработки и внесения жидких органических удобрений являются технические решения, основанные на применении импульсов сжатого воздуха и электромагнитного воздействия [1, 4, 12, 16, 18, 28-32].

Такой симбиоз обеспечивает высокоэффективное природоподобное одновременное рыхление, аэрацию, орошение, подачу органических удобрений, агрохимических препаратов непосредственно в корнеобитаемые горизонты почвы особенно в вегетационный период растений и обеспечивает повышение продуктивности растений и плодородие почвы.

Широко известны положительные результаты многочисленных научных исследований и практического опыта применения при обработке почвы импульсных потоков сжатого воздуха электромагнитной энергии. Достоверно установлено, что обработка импульсами электромагнитного воздействия с эллиптической поляризацией стимулирует микробиологическую активность почвы, увеличивает содержание питательных веществ. Результаты экспериментов свидетельствуют, что однократная обработка почвы таким воздействием при плотности 20 Дж/м² достоверно увеличивает содержание общего гумуса на 16%, азота – на 27% и фосфора – на 25%. Эффект возрастает, если в почву одновременно вносят органические остатки и/или жидкие органические удобрения (навоз). [29-32].

Толерантность разных групп микроорганизмов к воздушному и электромагнитному воздействию, внесению жидких органических удобрений во многом зависит от типа почвы, частоты, интенсивности, времени обработки. Установлено, что наиболее эффективно и рационально это происходит при внутрипочвенном рыхлении импульсами сжатого воздуха, аэрации, подачи жидких органических удобрений и одновременном электромагнитном воздействии.

В настоящее время одна из основных проблем – это повышение эффективности возделывания сельскохозяйственных культур за счет применения ресурсноэнергоэффективных технических систем и средств одномоментной внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации, орошения, удобрения и электромагнитного воздействия на корнеобитаемые слои почвы, внесения микробных биопрепаратов, при необходимости пестицидов в вегетационный период растений.

Особенно важно и актуально это в экстремальных ситуациях: при недостатке влаги, воздуха, питательных элементов и переуплотнении почвы, необходимости борьбы с сорняками, вредителями и болезнями растений. Поэтому целью предлагаемого устройства является своевременная, качественная и ресурсноэнергоэффективная комплексная внутрипочвенная обработка в период вегетации возделываемых культур, которая позволяет повысить плодородие почвы, урожайность и качество продукции за счет создания оптимальных условий симбиоза почвенных агроценозов и корневой микоризы растений и обеспечить таким образом максимальную реализацию генетической продуктивности созданных сортов сельскохозяйственных культур.

За рубежом разработаны и широко применяются специальные, работающие по уникальным технологиям, полностью автономно самоходные технические системы (рис. 5а) [28]. В них входит интегрированная катушка, шланг которой всегда находится под давлением, и роботизированная «рука», которая разматывает и укладывает или подбирает и скручивает шланг в зависимости от направления движения без участия человека. Система имеет ширину захвата до 36 м и распределяет навоз на уровне 0-20 см от земли без всплесков, минимизируя разбрызгивание и его попадание на листья, а также увеличивая точность внесения в междурядьях (рис. 5б).



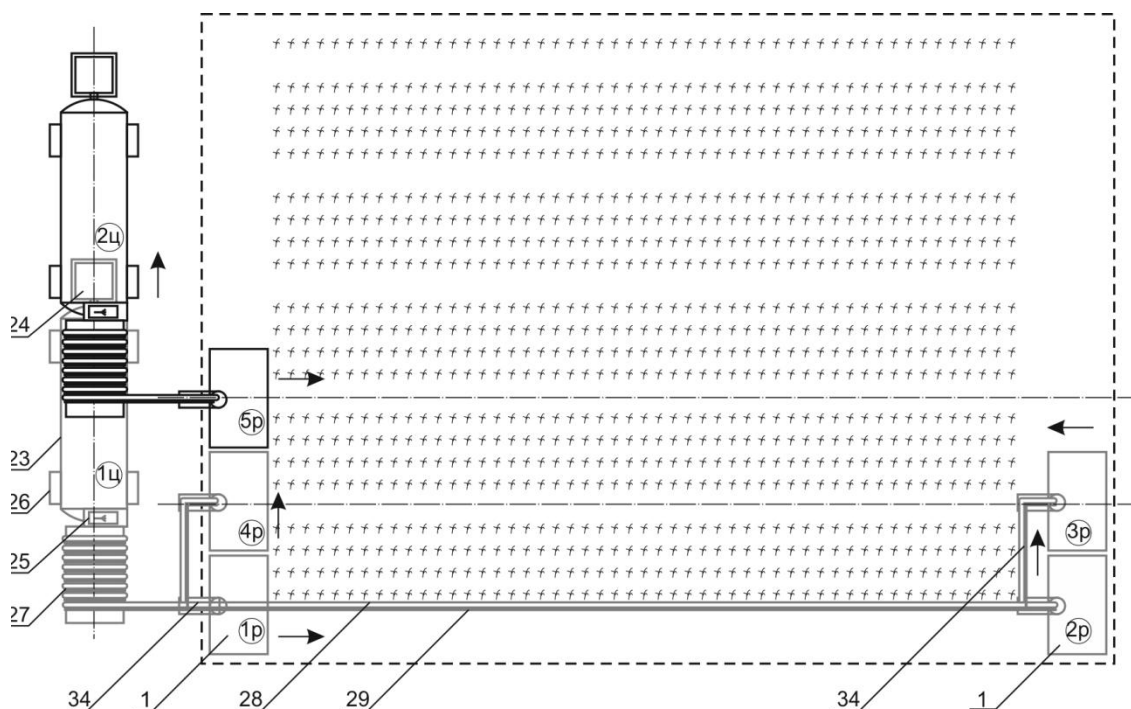
Рис. 5. Специальные системы, работающие по уникальным технологиям
а – Agrometer SDS 8000 Trailing shoe; б – «волочащийся башмак»

Fig. 2. Special systems using unique technologies:
a – Agrometer SDS 8000 Trailing shoe; b – dragging (trailing) shoe

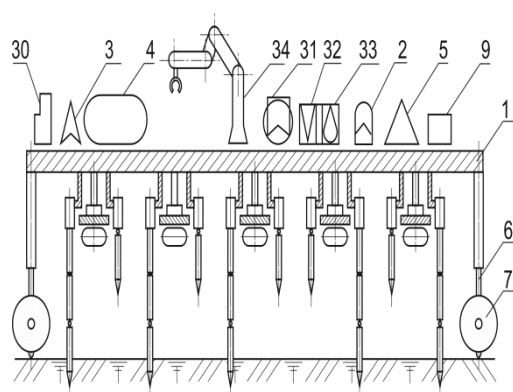
Объем большинства цистерн всех модификаций подобных распределителей жидкого навоза составляет порядка 20 м^3 ; при производительности внесения навоза в поле $100\text{-}120 \text{ м}^3/\text{ч}$ требуется 5-6 заправок. Более того при площадях российских полей зачастую для обработки удобрений одного прогона не хватает одной заправки, требуется дозаправка цистерны в поле. Это не позволяет обеспечить эффективную логистику, а, следовательно, значительно снижает производительность внесения навоза и освобождения лагун. Более того, многочисленные перемещения по полю агрегатов и транспортных средств весом 30-40 тонн катастрофически переуплотняют почву, разрушают корнеобитаемые почвенные горизонты, уничтожают и повреждают растения. В результате урожай сокращается, как показывает практика на 15-20 %.

В этой связи, на основании лабораторных и полевых исследований, а также анализа информации разработаны инновационные ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенных рециклинга ППЖ, обработки импульсами сжатого воздуха и электромагнитного воздействия в растениеводстве, представленные на рисунке 6.

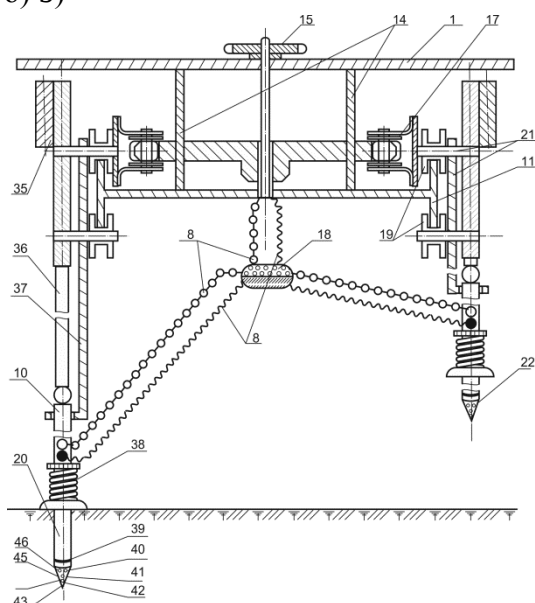
Они исключают перемещение по полю массивных, тяжелых распределителей и цистерн. В инновационной технической системе цистерна перемещается по краю поля и соединена с распределителем навоза шлангом, который разматывается и сматывается в зависимости от направления движения распределителя.



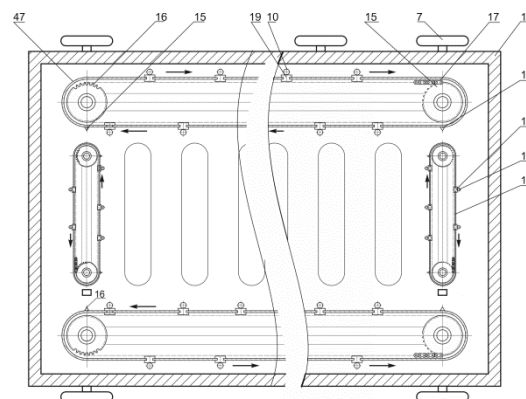
а) а)



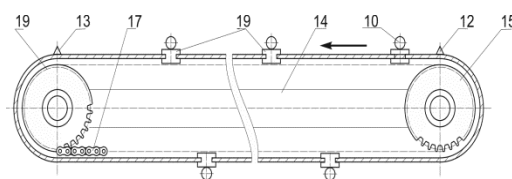
б) б)



г) д)



в) с)



д) е)

Рис. 6. Схема инновационной ресурсоэнергоэффективной технологии и природоподобной технической системы внутрипочвенных рециклинга ППЖ, обработки импульсами сжатого воздуха и электромагнитного воздействия в растениеводстве (патенты RU 2740805, RU 280039, RU 2807342, RU 2807736, RU 2812537, RU 2833681):

а) общий вид сверху; б) общий вид несущей рамы, фронтальный разрез; в) общий вид сверху дополнительных направляющих; г) общий вид сверху рабочих направляющих; д) общий вид рабочей направляющей при выполнении рабочего процесса, фронтальный разрез.

Fig. 6. Schematic diagram of an innovative resource and energy efficient technology and a nature-like technical system for subsoil recycling of animal by-products, treatment with compressed air pulses, and electromagnetic influence in crop production (patents RU 2740805, RU 280039, RU 2807342, RU 2807736, RU 2812537, RU 2833681):

а) general view from above; б) general view of the main frame, frontal section; в) general view from above of additional guides; г) general view from above of the working guides; д) general view of the working guide during the work process, frontal section.

Инновационная ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенных рециклинга ППЖ, обработки импульсами сжатого воздуха и электромагнитного воздействия в растениеводстве содержит несущую раму 1, на которой установлены электропривод 2, компрессор 3 с ресивером 4 сжатого воздуха, насос 5,

регулируемые опоры 6 с колесами 7, шланги 8, регулятор-стабилизатор давления 9, пневмогидробуры 10, рабочие направляющие 11 в форме прямоугольника, в начале и конце каждой направляющей установлены включатель 12 и выключатель 13, в центре размещен рамный элемент 14, на котором установлены с возможностью вращения ведущая 15 и ведомая 16 тяговые звездочки, соединяющая их приводная тяговая цепь 17, снизу с возможностью вращения размещен распределитель-стабилизатор 18, на каждой направляющей 11 установлены опорные катки 19, каждый из которых оснащен пневмогидробуром 10 в виде подпружиненного ствола 20 с механизмом возвратно-вертикального перемещения 21 и перфорированного наконечника 22.

Техническая система снабжена автономной самоходной цистерной 23 для жидких органических удобрений с источником электроэнергии 24 и дополнительным электроприводом 25, колесами 26, универсальной катушкой 27, на которой размещены с возможностью разматывания-сматывания магистральный шланг 28 для жидких органических удобрений и электрокабели 29, соединяющие самоходную цистерну 23 с самоходной несущей рамой 1, на которой размещены генератор импульсов электромагнитного воздействия 30, блок управления 31, пенетромметр 32, даталоггер 33, манипулятор 34 с захватным устройством 48 на его подвижном конце. Каждый механизм возвратно-вертикального перемещения 21 пневмогидробура 10 выполнен в виде линейного актуатора 35, шток 36 которого шарнирно связан с подпружиненным стволом 20, установленным в консольной направляющей 37 с возможностью вертикально-возвратного перемещения и соединен шлангами 8 с ресивером 4 сжатого воздуха и магистральным шлангом 28 для жидких органических удобрений. В нижней части каждого ствола 20 установлен подпружиненный эластичный защитный зонд 38, перфорированный наконечник 22 с излучателем электромагнитных воздействий 39, тензометрический датчик силы 40, датчики температуры 42, влажности 41, концентрации ионов 43, уровня азота 44, фосфора 45, калия 46 в почве, каждый из которых связан через включатель 12 и выключатель 13 связаны через блок управления 31 с пенетромметром 32, даталоггером 33, каждым линейным актуатором 35 и излучателем импульсов электромагнитного воздействия 39, выполненным с возможностью изменения полярности электромагнитного поля. Самоходная несущая рама 1 выполнена прямоугольной, большие ее стороны снабжены жестко присоединенными снизу дополнительными направляющими 47, размещенными перпендикулярно рабочими направляющим 11 и установлены перед и за ними с возможностью перемещения самоходной несущей рамы 1 поперек рядков насаждений на смежные необработанные участки поля синхронно с перемещением автономной самоходной цистерны 23 по краю поля.

Техническая система и самоходное устройство для внутривредной обработки импульсами сжатого воздуха, электромагнитного воздействия и внесения жидких органических удобрений работает следующим образом.

Самоходную несущую раму 1 на колесах 7 устанавливают в начало обрабатываемого поля, ориентируя так, чтобы рабочие ветви направляющих 11 располагались по центру и параллельно междурядий насаждений (позиция IP). Одновременно на краю поля устанавливают автономную самоходную цистерну 23 ориентируя ее так (позиция П), чтобы универсальная катушка 27, магистральный шланг 28 и электрокабели 29 располагались в междурядьях насаждений и по центру самоходной несущей рамы 1. Производят соответствующее её подключение и включают подачу электроэнергии от источника 24, которая через блок управления 31, электропривод 2 вращает ведущие звездочки 15 и

перемещает приводные тяговые цепи 17 с закрепленными на них опорными катками 19, свободно установленными на рабочих направляющих 11. На осях опорных катков размещены консольные направляющие 37 с возможностью стабилизации линейных актуаторов 35, которые, взаимодействуя с включателем 12 соединяются с источником электроэнергии 24 и посредством штока 36, шарнирно связанного со стволом 20, по консольной направляющей 37 погружают вертикально в почву пневмогидробуры 10, находящиеся на ветвях рабочих направляющих 11. Пневмобуры 10 взаимодействуют с почвой и посредством приводных тяговых цепей 17, создают тяговые усилия, перемещают самоходную несущую раму 1.

Одновременно блок управления 31 включает подачу электроэнергии от источника 24 в дополнительный электропривод 25, который вращает универсальную катушку 27 и разматывает магистральный шланг 28 и электрокабели 29 синхронно с движением самоходной несущей рамой 1.

При этом каждый перфорированный наконечник 22, преодолевая пенетрацию корнеобитаемых горизонтов почвы, деформирует упругий элемент тензометрического датчика силы 40, создает электрический сигнал, величина которого прямо пропорциональна величине силы пенетрации почвы, поступает в пенетрометр 32, который в зависимости от величины этого электрического сигнала, устанавливает частоту и величину давления импульсов сжатого воздуха.

Достигнув заданной глубины каждый ствол 20, воздействуя на включатель 12, соединяет генератор импульсов электромагнитного воздействия 30 соответствующими излучателями электромагнитного воздействия 39 обеспечивает на каждой рабочей ветви соседней направляющей 11 противоположенную полярность электромагнитного поля и формирует целенаправленный вектор электромагнитной обработки почвы.

Включатели 12 открывают подачу импульсы сжатого воздуха по шлангам 8, стволам 20 через перфорацию наконечников 22 в корнеобитаемые горизонты почвы, осуществляют ее рыхление, аэрацию, создают полости и микропустоты. Датчики температуры 42, влажности 41, концентрации ионов 43, уровня азота 44, фосфора 45, калия 46 фиксируют величину и содержание этих компонентов в данной точке корнеобитаемого горизонта почвы и передают соответствующие сигналы в даталоггер 33, который устанавливает необходимое количество жидких органических удобрений и подает его насосом 5 из магистрального шланга 28 по стволам 20, наконечникам 22 в образованные в почве полости и пустоты непосредственно в корневую систему растений. При этом подпружиненный эластичный защитный зонд 38 плотно прижимается к поверхности почвы вокруг поверхности ствола 20 и предотвращает потери сжатого воздуха и подаваемых под давлением органических удобрений.

Даталоггер 33 передает данные в блок управления 31, который записывает их и направляет в блок памяти, формирует электронную карту поля. При достижении конца рабочей ветви направляющей 11 ствол 20 воздействуя на выключатель 13, закрывает подачу импульсов сжатого воздуха, импульсов электромагнитного воздействия и жидких органических удобрений.

Линейный актуатор 35 по консольной направляющей 37, извлекает из почвы и перемещает по холостой ветви направляющей 11 пневмогидробур 10 над поверхностью почвы до включателя 12.

При достижении самоходной несущей рамой 1 края поля блок управления 31 отключает подачу электроэнергии и электропривод 2 останавливает несущую раму 1 (позиция ПР). Одновременно закрывает подачу сжатого воздуха и органических удобрений, а находящиеся на рабочих ветвях направляющих 11 пневмогидробуры 10, включают подачу электроэнергии в линейные актуаторы 35, которые расположены на рабочих ветвях дополнительных направляющих 47. Актуаторы 35 опускают регулируемые опоры 6 на почву и поднимают несущую раму 1.

Затем блок управления 31 включает электропривод 2 ведущих тяговых звездочек и приводные тяговые цепи 17 каждой дополнительной направляющей 47 перемещают дополнительные регулируемые опоры 6 на опорных катках 19, которые взаимодействуют с почвой, создают тяговое усилие и перемещают несущую раму 1 поперек рядков насаждений на смежные необработанный участок поля (позиция ППР). Одновременно манипулятор 34 захватным устройством 48 поднимает магистральный шланг 28 и электрокабели 29 над поверхностью поля, разворачивается поперек междурядья, обеспечивая их устойчивое положение над обработанным междурядьем насаждений. Регулируемые опоры 6 опускают несущую раму 1 на поверхность почвы, ориентируя рабочие ветви направляющих 11 вдоль междурядий насаждений. Блок управления 31 включает электропривод 2, ведущие тяговые звездочки и приводные тяговые цепи 17 каждой дополнительной направляющей 47 перемещают опорные катки 19 и регулируемые опоры 6, взаимодействующие с почвой, создают тяговое усилие и перемещают несущую раму 1 поперек рядков междурядий насаждений на смежный необработанный участок поля. Устанавливают раму 1 так, чтобы рабочие направляющие 11 располагались по центру междурядий насаждений. Одновременно блок управления 31 включает подачу электроэнергии от источника 24 в дополнительный электропривод 25, который вращает универсальную катушку 27 в обратном направлении и сматывает магистральный шланг 28 и электрокабели 29.

Достигнув края поля, блок управления 31 выключает электроприводы 2 и 25, останавливает самоходную несущую раму 1 и универсальную катушку 27 (позиция IVP). Одновременно блок управления 31 закрывает подачу сжатого воздуха и органических удобрений в пневмогидробуры 10, находящиеся на рабочих ветвях направляющих 11. Затем включает подачу электроэнергии в линейные актуаторы 35, которые расположены на рабочих ветвях дополнительных направляющих 47, опускает регулируемые опоры 6 на почву и поднимает несущую раму 1.

Блоком управления 31 включается электропривод 25 и самоходная цистерна 23 перемещается на колесах 26 по краю поля синхронно с самоходной несущей рамой 1 (позиция ПЦ). Одновременно манипулятор 34 движется синхронно с движением катушки 27. Захватное устройство 48 перемещает, опускает и фиксирует магистральный шланг 28 и электрокабели 29 по центру несущей рамы 1 (позиция VP). Затем блок управления 31 включает электроприводы 2 и 25, которые двигают, соответственно, несущую раму 1 обрабатывающую насаждения, и вращает универсальную катушку 27, которая разматывает магистральный шланг 28 и электрокабели 29 в обратном направлении до следующего края поля.

В заключении необходимо акцентировать внимание на том, что ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенного рециклинга в растениеводстве побочных продуктов животноводства базируется на инновационных, физических принципах совмещения, комплексности и

одновременной реализации функций сельскохозяйственного агрегата и движителя. Пневмогидробуры, вертикально погружаемые в почву и находящиеся в ней до нескольких десятков секунд, выполняют более 10 агротехнологических операций и одновременно осуществляют функции почвозацепа движителя и обеспечивают перемещение агрегата над поверхностью почвы, что полностью исключает ее уплотнение и повреждение растений и корней.

При этом почвозацепы-пневмогидробуры обеспечивают эффективное взаимодействие с почвами различных физико-механических характеристик, осуществляют сканирование в режиме реального времени агрохимический состав почвы с минимальными ресурсоэнергозатратами без разрушения корнеобитаемых горизонтов, совмещают следующие функции:

1. Почвозацепы – внутрипочвенное взаимодействие движителя с почвенными горизонтами и перемещение агротехнологического агрегата над поверхностью почвы без воздействия на нее.

2. Опоры – вертикально-возвратное внутрипочвенное погружение, устойчивое положение и энергоэффективное перемещение по ним агротехнологического агрегата над поверхностью почвы без воздействия на нее.

3. Зонды – внутрипочвенное сканирование в режиме реального времени пенетрации и агрохимических характеристик корнеобитаемых слоев почвы.

4. Рыхлители – внутрипочвенные импульсы сжатого воздуха с учетом характеристик почвы в корнеобитаемых слоях.

5. Агроаэраторы – внутрипочвенная подача импульсов сжатого воздуха по результатам сканирования в режиме онлайн пенетрации корнеобитаемых слоев.

6. Форсунки-распылители – внутрипочвенная подача растворов агробиопрепаратов с учетом результатов сканирования агрохимических характеристик почвы непосредственно в корневую систему растений.

Выводы. 1. В Российской Федерации при производстве продукции животноводства и птицеводства в течение года образуется более 300 млн. тонн навоза, помета, стоков и пр. Они являются побочными продуктами отрасли и содержат более 40 млн. тонн органических веществ, которые имеют колоссальный потенциал превращения в высококачественные органические удобрения для растениеводства. Этот фундаментальный процесс материально-энергетического цикла жизнедеятельности биосферы Земли обеспечивает естественно-природное формирование гумусовой составляющей почвы.

2. Вследствие роста трудоэнергозатрат на процессы удаления и утилизации навоза и помета, которые составляют в последние годы 30-50% от общих трудозатрат по уходу за животными и птицей, а также в связи с активным применением минеральных удобрений внесение навоза и помета на поля сокращается. В настоящее время оно не превышает 40-45% производимого объема.

3. Рост мощностей, интенсификация производства увеличивают объемы ППЖ, ужесточение экологических требований, сокращение сроков внесения навоза на поля в течение года с весны по осень, усложняют технологии, повышают затраты. Вследствие этого растет актуальность и востребованность технологии и технической системы внесения ППЖ в виде жидких органических удобрений в период вегетации растений, которые при заделке жидкого навоза в почву усваивают более 75% содержащегося в них азота, что значительно сокращает расходы на минеральные удобрения и ГСМ.

4. В связи с этим нами разработаны инновационные ресурсоэнергоэффективная технология и природоподобная техническая система внутрипочвенного рециклинга в растениеводстве ППЖ, которые обеспечивают одновременное внутрипочвенное воздействие четырьмя природоподобными физико-технологическими приемами: обработка, рыхление, аэрация импульсами сжатого воздуха; электромагнитное воздействие; онлайн оценка агрохимического состава почвы; последующее, дозированное адресное внесение агробиологических препаратов непосредственно в корневую систему растений.

5. Они базируются на принципиально отличных от подходов земледельческой механики физических принципах и физиологических представлениях о продукционных процессах в растениеводстве и направлены на обеспечение оптимальных условий сохранения и развития симбиоза растений и почвы, биоценозов, сформировавшихся при воздействии сельскохозяйственных культур в корнеобитаемых горизонтах почвы без их оборота и разрушения за счет внутрипочвенной обработки, рыхления, аэрации, орошения, создания полостей, микропустот импульсами сжатого воздуха посредством погружения в почву пневмогидробуров; исключается полностью механическое воздействие и переуплотнение на верхних, наиболее продуктивных слоях почвы за счет движения агрегата над поверхностью почвы и растениями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федоренко В.Ф. Переход к технологическим процессам и техническим системам обработки почвы, интегрированным в природный ресурсооборот // Агроинженерия. 2025. № 27(2). С. 30-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37>
2. Виноградов П.Н., Чекалина В.Г., Тюрин В.Г. Нормативное обеспечение в области утилизации побочных продуктов животноводства как инструмент государственного управления биобезопасностью и охраной окружающей среды // Техника и оборудование для села. 2025. №7. С. 34-35 <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-7-34-36> EDN: LIJWKN
3. Синельников М. Побочные продукты – это не отходы // Животноводство России. 2023. №2. С. 8-11 EDN: VKUEWA
4. Попов В.Д., Брюханов А.Ю. Агроинженерные методы обеспечения экологической безопасности и сохранения плодородия почв // Чтения академика В. Н. Болтинского: семинар: сб. статей, часть 2 (Москва, 22-23 января 2025 г.); под ред. Дидманидзе О.Н., Пуляева Н.Н. М.: СамПолиграфист. 2025. С. 16-22. EDN: JVAFAQ
5. Безопасные отходы. Как закон о побочных продуктах животноводства изменил жизнь фермера [Электронный ресурс] URL: <https://поле.рф/journal/publication/bezopasnye-otkhody?yselid=me9mgpih2p635662956> (дата обращения 16. 01. 2026)
6. Попов В.Д., Ерохин М.Н., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Перспективы создания экологических центров промышленной переработки органических отходов животноводства // Агроинженерия. 2020. №3 (97). С. 4-11 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-4-11>
7. Теучеж А.А. Химический состав различных видов навоза // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2018. № 14 (1). С. 54-58 EDN: YWWSQD
8. Могилевцев В.И., Брюханов А.Ю., Максимов Д.А., Васильев Э.В., Субботин И.А., Чернин С. Я., Парубец Ю. С., Гарзанов А.Л. / Под ред. В.И. Могилевцева. Утилизация навоза/помета на животноводческих фермах для обеспечения экологической безопасности территории,

- наземных и подземных водных объектов в Ленинградской области. СПб.: СЗНИИМЭСХ. 2012. 238 с. URL: <https://eco.sznii.ru/booklet.pdf>
9. Слободской машиностроительный завод [Электронный ресурс] URL: <https://www.smsz.ru> (дата обращения 20.01.2026)
10. Реммаш. Оборудование для ферм. [Электронный ресурс] URL: <https://www.glazovmash.ru> (дата обращения 20.01.2026)
11. Брюханов А.Ю. Закон все расставил по местам // Сельскохозяйственные вести. 2023. №2. С. 4-7 URL: <https://agri-news.ru/zhurnal/2023/2-2023/>
12. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Федоренко В.Ф., Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Индустрия побочных продуктов животноводства и ее научно-техническое обеспечение // Агроинженерия. 2025. № 27(1). С. 4-12. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>
13. Шигапов И.И. Технология уборки навоза // Научный вестник Технологического института-филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. 2013. №12. С. 370-373 EDN: RSMWLT
14. Максимов Д.А., Валкама Е., Минин В.Б., Ранта-Корхокен Т., Захаров А.М. Подходы к освоению органического земледелия // АгроЭкоИнженерия. 2020. №4(105). С. 101-113 <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270>
15. Мишуров Н.П., Федоренко В.Ф., Аристов Э.Г., Краховецкий Н.Н., Давыдов А.А., Золотилов В.А., Золотилова О.М., Скипор Н.В. Результаты исследований подпочвенногоорошения многолетних эфиромасличных культур с использованием гидрогеля // Техника и оборудование для села. 2022. №11. С.11-15 <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-11-11-15>
16. Брюханов А.Ю., Романовская А.А., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Вертянкина В.Ю. Влияние технологий переработки навоза и помета на эмиссии парниковых газов // Инженерные технологии и системы. 2024. № 34(4). С. 563-583. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>
17. Романцева Ю.Н., Бодур А.М., Маслакова В.В., Кагирова М.В. Анализ динамики и структуры эмиссии парниковых газов в сельском хозяйстве России // Аграрная наука. 2024. №2. С.139-145 <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
18. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Прогнозное распределение технологий переработки навоза КРС в Российской Федерации. // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. № 25 (3). С. 507-517 <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>
19. Федоренко В.Ф., Брюханов А.Ю., Захаров А.М., Мурзаев Е.А. Концептуальные основы развития органического производства сельскохозяйственной продукции // Техника и оборудование для села. 2024. №1(319). С. 2-7 <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-1-2-7>
20. Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Комоедов А.Д., Иванов Д.Ю. Теоретические предпосылки к определению глубины залегания и величины уплотнённого слоя почвы // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 4(117). С. 14-32 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-14-32> EDN: PZPENX
21. Захаров А.М., Мурзаев Е.А. Зависимость физических параметров почвенного состояния от способа междурядий обработки посадок органического картофеля // Известия НВ АУК. 2022. №1(65). С. 408-418 <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-01-40>
22. Машиностроительный завод «Поток» [Электронный ресурс] URL: <https://mzpotok.ru/?ysclid=mcspp3m998v915308503> (дата обращения 16.01.2026)

23. Борисов В.А. Система удобрения овощных культур. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2016. 392 с.
24. Вестник испытаний сельскохозяйственной техники. Информационное издание. М.: Росинформагротех. 2025. 95 с.
25. Голышев Д.С., Другов М.П., Рядных В.В., Кривопуст Н.С. Механизация внесения удобрений. Л.: Агропромиздат. 1985. 95 с.
26. Леонов М.В., Щеголева И.В. Современные технологии для подготовки и внесения жидкого навоза // СФЕРА: Мясная промышленность. 2017. №1(116). С. 48-49 EDN: ZUCVUV
27. Ножевникова А.Н., Миронов В.В., Бочкова Е.А., Литти Ю.В., Русскова Ю.И. Состав микробного сообщества на разных стадиях компостирования, перспектива получения компоста из муниципальных органических отходов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2019. № 55 (3). С. 211-221. <https://doi.org/10.1134/S0555109919030103>
28. Харитонов Д.А. Выгодная утилизация // Агропрофи. 2019. №7 (94). С. 34-39
29. Korotchenya V. Ideal final result for agriculture: Striving for sustainability. In: Nowak R., Chrzęszcz J., Brad S. (eds) Systematic Innovation Partnerships with Artificial Intelligence and Information Technology. Springer, Cham. 2022. Vol. 655. P.405-416. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17288-5_34
30. Connor D.J. Analysis of farming systems establishes the low productivity of organic agriculture and inadequacy as a global option for food supply // Sustainable Agriculture. 2024. Vol 2, 2 <https://doi.org/10.1038/s44264-023-00009-7>
31. Белова С.В. Диагностика минерального питания моркови и свёклы столовой при органической и минеральной системах удобрения // Овощи России. 2024. №4. С. 69-79. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-4-69-79>
32. Коломиец А.А., Васючков И.Ю., Успенская О.Н. Урожайность и качество лука репчатого при применении удобрений и стимулятора роста // Картофель и овощи. 2025. №1. С. 23-26. <https://doi.org/10.25630/PAV.2025.81.22.002>

REFERENCES

1. Fedorenko V.F. Transition to technological processes and technical systems of soil tillage integrated into natural resource management. Agroiinzheneriya = Agricultural Engineering (Moscow). 2025;27(2):30-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-30-37>
2. Vinogradov P.N., Chekalina V.G., Tyurin V.G. Regulatory support in the field of utilization of by-products of animal husbandry as a tool of the state control over biosafety and environmental protection. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2025;7:34-35. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2025-7-34-36> EDN: LIJWKH
3. Sinelnikov M. By-products are not waste. Zhivotnovodstvo Rossii = Animal Husbandry of Russia. 2023;2:8-11 (In Russ.) EDN: VKUEWA
4. Popov V.D., Bryukhanov A.Yu. Agroengineering methods of ensuring ecological safety and preservation soil fertility. In: Didmanidze O.N., Pulyaev N.N. (eds.) Readings of Academician V. N. Boltinsky. Collection of Papers of the seminar (Moscow, January 22-23, 2025). Moscow: Sam Poligrafist Publ. 2025;2:16-22. (In Russ.) EDN: JVAFAQ
5. Safe waste. How the law on livestock by-products changed the life of a farmer [online] URL: <https://поле.рф/journal/publication/bezopasnye-otkhody?yselid=me9mgpih2p635662956> (accessed 16.01.2026) (In Russ.)

6. Popov V.D., Yerokhin M.N., Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V. Prospects of establishing ecological centers for industrial processing of organic animal waste. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering* (Moscow). 2020;3(97):4-11 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-4-11>
7. Teuchezh A.A. The chemical composition of various types of manure. *Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*. 2018. Vol. 14. No. 1. P. 54-58 (In Russ.) EDN: YWWSQD
8. Mogilevtsev V.I., Briukhanov A.Yu., Maksimov D.A., Vasilev E.V., Subbotin I.A., Chernin S. Ya., Parubets Yu.S., Garzanov A.L. / V.I. Mogilevtsev (ed.) Manure/poultry litter management on livestock farms to ensure the ecological security of the territory, ground and underground water bodies in the Leningrad Region. Saint Petersburg: SZNIIMESH. 2012. 238 p. (In Russ.) URL: <https://eco.sznii.ru/booklet.pdf>
9. Slobodskoy Machine-Building Plant [online] URL: <https://www/smsz.ru> smsz.ru (accessed 20.01.2026) (In Russ.)
10. Remmash. Farm Equipment. [online] URL: <https://www//glazovmash.ru> (accessed 20.01.2026) (In Russ.)
11. Bryukhanov A.Yu. The law put everything in its place. *Sel'skokhozyaistvennye vesti = Agricultural News*. 2023;2:4-7. (In Russ.) URL: <https://agri-news.ru/zhurnal/2023/2-2023/>
12. Briukhanov A.Yu., Popov V.D., Fedorenko V.F., Vasilev E.V., Shalavina E.V. Scientific and technical support of animal by-product industry. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering* (Moscow). 2025;27 (1):4-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>
13. Shigapov I.I. Manure removal technology. *Nauchnyi vestnik Tekhnologicheskogo instituta-filiala FGBOU VPO Ul'yanovskaya GSKhA im. P.A. Stolypina = Scientific Bulletin of the Technological Institute, branch of the Ulyanovsk State Agricultural Academy named after P.A. Stolypin*. 2013;12:370-373 (In Russ.)
14. Maksimov D.A., Valkama E., Minin V.B., Ranta-Korhonen T., Zakharov A.M. Approaches to harnessing organic agriculture. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2020;4(105):101-113 (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10270>
15. Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Aristov E.G., Krakhovetskiy N.N., Davydov A.A., Zolotilov V.A., Zolotilova O.M., Skipor N.V. Results of studies of subsoil irrigation of perennial essential oil crops using hydrogel. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;11:11-15 (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-11-11-15>
16. Briukhanov A. Y., Romanovskaya A. A., Shalavina E. V., Vasilev E.V., Vertyankina V.Y. Effect of animal and poultry manure processing technologies on greenhouse gas emissions. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):563-583. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.563-583>
17. Romantseva Yu.N., Bodur A.M., Maslakova V.V., Kagirowa M.V. Analysis of the dynamics and structure of greenhouse gas emissions in Russian agriculture. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*. 2024;2:139-145 (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-139-145>
18. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V. Forecast distribution of cattle manure processing technologies in the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2024;25(3):507-517 (In Russ.) <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.507-517>
19. Fedorenko V.F., Bryukhanov A.Yu., Zakharov A.M., Murzaev E.A. Conceptual basis for the development of organic agricultural production. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery*

- and Equipment for Rural Area. 2024;1(319):2-7 (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2024-1-2-7>
20. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Komoedov A.D., Ivanov D. Y. Theoretical background for determining the occurrence depth and size of compacted soil layer. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2023;4(117):14-32 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-4117-14-32> EDN: PZPENX
21. Zakharov A.M., Murzaev E.A. The dependence of the physical parameters of the soil condition on the method of inter-row cultivation of plantings of organic potatoes. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*. 2022;1(65):.408-418 (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2022-01-40>
22. Machine-building plant “Potok” [online] URL: <https://mzpotok.ru/?ysclid=mcsp3m998v915308503> (accessed 16.01.2026) (In Russ.)
23. Borisov V.A. Fertilization system for vegetable crops. Moscow: Rosinformagrotech. 2016. 392 p. (In Russ.)
24. Bulletin of agricultural machinery tests. Information edition. Moscow: Rosinformagrotech. 2025. 95 p. (In Russ.)
25. Golyshev D.S., Drugov M.P., Ryadnykh V.V., Krivopust N.S. Mechanization of fertilizer application. Leningrad: Agropromizdat. 1985. 95 p. (In Russ.)
26. Leonov M.V., Shchegoleva I.V. Modern technologies for preparation and application of liquid manure. *SFERA: Myasnaya promyshlennost' = SFERA: Meat Industry*. 2017;1 (116):48-49 (In Russ.) EDN: ZUCVUV
27. Nozhevnikova A.N., Mironov V.V., Botchkova E.A., Litt Y.V., Russkova Y.I. Composition of a microbial community at different stages of composting and the prospects for compost production from municipal organic waste (review). // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2019;55(3):211-221. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0555109919030103>
28. Kharitonova D.A. Profitable utilization. *Agroprofi = Agricultural Professional*. 2019; 7 (94):34-39 (In Russ.)
29. Korotchenya V. Ideal final result for agriculture: Striving for sustainability. In: Nowak R., Chrzęszcz J., Brad S. (eds) *Systematic Innovation Partnerships with Artificial Intelligence and Information Technology*. Springer, Cham. 2022; 655:405-416. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-031-17288-5_34
30. Connor D.J. Analysis of farming systems establishes the low productivity of organic agriculture and inadequacy as a global option for food supply. *Sustainable Agriculture*. 2024; 2, 2 (In Eng.) <https://doi.org/10.1038/s44264-023-00009-7>
31. Belova S.V. Diagnostics of mineral nutrition of carrot and red beet at organic and mineral fertilization systems. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia*. 2024;(4): 69-79. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-4-69-79>
32. Kolomiets A.A., Vasyuchkov I.Yu., Uspenskaya O.N. Yield and quality of onions using organic, mineral fertilizers and growth stimulators. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*. 2025;1:23-26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25630/PAV.2025.81.22.002>

Об авторах	About the authors
Федоренко Вячеслав Филиппович академик РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный	Viacheslav F. Fedorenko Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Engineering), chief researcher,

агроинженерный центр ВИМ, 109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5 vim@vim.ru, f@maro.pro; ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6398-4463	Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5 vim@vim.ru, f@maro.pro; ResearcherID: A-9022-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6398-4463
Заявленный вклад автора Автор выполнил все функции проекта	Author's contribution Single author article - the author fulfilled all the functions in the project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и несет ответственность за плагиат	Conflict of interest The author declares no conflict of interest and bears responsibility for plagiarism
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The author has read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 25.11.2025	Received: 25.11.2025
Одобрена после рецензирования: 19.01.2026	Approved after reviewing: 19.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

Научная статья
УДК 631.331.86

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-110-128

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОСЕВА СЕМЯН ЛУКА МАЛОГАБАРИТНЫМ АГРЕГАТОМ

Ислом Анварович Искандаров^{1✉}, Тохир Мамаджонович Сафаров²

Научный центр инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук, г. Гиссар, Республика Таджикистан.

¹islomiskandarov@gmail.com, ORCID 0009-0001-3226-3185

²tohirjon.s-1993@mail.ru

Аннотация. В потребительской корзине населения стран мира репчатый лук является одним из основных видов сельскохозяйственных продуктов для жизнедеятельности человека. Для достижения продовольственной безопасности и производства достаточного объема репчатого лука следует максимально эффективно использовать имеющиеся ресурсы. Республика Таджикистан обладает благоприятным климатом для возделывания этой культуры. Однако 93% территории страны занимают горы, а площадь орошаемых земель составляет примерно 700 тысяч гектаров. В этой связи нужно пересмотреть имеющийся подход к эффективному использованию посевных площадей и повышать урожайность сельскохозяйственных культур за счет соблюдения всех агротехнических норм, в частности,

качества посева семян посевным агрегатом. Для возделывания сельскохозяйственных культур на малых посевных площадях (до 30 соток) по плану государственного проекта научно-исследовательских работ в Научном центре инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук была разработана система машин, включающая комбинированную машину КМ-0,6-0,3 для посева мелкосеменных культур широкополосным методом на гребнях. Основной целью исследования было повышение эффективности посева семян репчатого лука на гребнях путем оптимизации скоростных режимов работы посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 в условиях Гиссарской долины Республики Таджикистан. В статье анализируются основные факторы, влияющие на качество посева, такие как норма высева и глубина заделки семян репчатого лука, равномерность распределения семян, ширина между гребнями и скорость движения агрегата. Предлагаются рекомендации по выбору и регулировке режимов работы посевного агрегата для достижения максимальной эффективности посева. В результате проведенных экспериментальных исследований было определено, что для соблюдения принятых показателей качества при посеве семян репчатого лука посевным агрегатом Мотоблок+КМ-0,6-0,3 скорость его движения должна составлять от 2,2 до 3,44 км/ч.

Ключевые слова: репчатый лук, качество посева, посевной агрегат, норма высева, глубина заделки, равномерность распределения, скорость движения

Для цитирования: Искандаров И. А., Сафаров Т. М. Повышение эффективности посева семян лука малогабаритным агрегатом // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1 (126) С. 110-129 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-110-128>

Research article

Universal Decimal Code 631.331.86

INCREASING THE SEEDING EFFICIENCY OF ONION SEEDS WITH A SMALL-SIZED UNIT

Islom A. Iskandarov^{1✉}, Tohir M. Safarov²

Scientific Center of Innovative Technologies and Mechanization of Agricultural of the Tajik Academy of Agricultural Sciences, Hissar City, Republic of Tajikistan

¹islomiskandarov@gmail.com; ORCID 0009-0001-3226-3185

²tohirjon.s-1993@mail.ru

Abstract: In the consumer basket of the world's population, onions are one of the main types of agricultural products for human life. To achieve food security and produce enough onions, it is important to make the use of available resources as efficient as possible. The Republic of Tajikistan has a favorable climate for growing onions. Yet 93% of the country's territory are mountains. The area of irrigated land is approximately 700 thousand hectares. In this regard, there is a need to reconsider the existing approach to the efficient use of cultivated areas. The yields of agricultural crops are to be increased by observing all agricultural standards, the seeding quality included. According to the state research project plan, the Scientific Center of Innovative Technologies and Mechanization of Agriculture of the Tajik Academy of Agricultural Sciences designed a system of machines to cultivate the agricultural crops on small sown areas (up to 0.3

hectares). The system included a combined machine KM-0.6-0.3 for sowing small-seeded crops by strip method on ridges. The main aim of research was to improve the efficiency of onion seeding on raised beds by optimizing operating modes of the seeding unit that consisted of a two-wheel tractor and KM-0.6-0.3 machine in the conditions of the Hissar Valley in the Republic of Tajikistan. This article analyses the main factors affecting the onion seeding quality, such as the seeding rate and depth, the uniformity of seed distribution, the width between the ridges and the travelling speed of the unit. Recommendations are provided for selecting and adjusting the operating modes of the seeding unit to achieve the greatest seeding efficiency. The experimental studies determined that to follow the accepted quality indicators in onion seeding with the designed seeding unit its travelling speed should be from 2.2 to 3.44 km/h.

Key words: onions, seeding quality, seeding unit, seeding rate, seeding depth, distribution uniformity, travelling speed

For citation: Iskandarov I. A., Safarov T. M. Increasing the seeding efficiency of onion seeds with a small-sized unit. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126): 110-129. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-110-128>

Введение. Репчатый лук является одной из наиболее употребляемых овощных культур, широко распространенных во всем мире. С возрастанием потребности в репчатом луке и его экспорту в зарубежные страны в Республике Таджикистан растет его цена, что делает возделывание репчатого лука актуальным вопросом. В связи с тем, что малые фермерские и приусадебные хозяйства используют в основном ручной труд для возделывания сельскохозяйственных культур, внедрение малогабаритных сельскохозяйственных машин является своевременным методом для перехода от ручного к механизированному труду. Использование разработанных в Научном центре инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук машин может повысить энергоэффективность сельскохозяйственного производства для малых хозяйств, а также улучшить его экономическую эффективность. Одной из разработок Научного центра является малогабаритная комбинированная машина KM-0,6-0,3 для посева мелкосеменных культур. Данная машина была разработана для посева семян на гребнях широкополосным методом, так как почвенно-климатические условия Республики Таджикистан обладают недостаточной влажностью, что требует дополнительного орошения сельскохозяйственных культур при их возделывании. Качество и урожайность репчатого лука во многом зависят от правильной организации посева. Оптимизация режимов работы посевного агрегата позволяет повысить качество и эффективность посева, что способствует получению высокого урожая. Также за счет комбинированного характера агрегата и сокращения его проходов обеспечивается экологичность и энергоэффективность.

Разработке новых технических средств и технологий в растениеводстве, а также оценке их экологической и экономической эффективности посвящены труды отечественных и зарубежных учёных.

В качестве примера приводится краткий анализ наиболее значимых работ.

В ниже указанных работах рассматриваются основные показатели для определения и оценки негативного влияния на окружающую среду технологий и технических средств производства сельскохозяйственной продукции.

В частности, в статье [1] представлены методы разработки и реализации цифровых технологий в обеспечении экологической безопасности сельхозпроизводства, которые достигаются путем широкого освоения современных мониторинговых систем.

Авторами статьи [2] разработаны критерии оценки негативного влияния разработанных сельскохозяйственных машин на экологическую устойчивость сельскохозяйственных площадей.

В статье [3] приводится сравнение энергетических и экологических показателей оценки эффективности почвообрабатывающих агрегатов для поверхностной и мелкой обработки почвы.

Обоснованные вышеперечисленными авторами показатели могут быть применимы для изучения влияния эксплуатации разработанных технических средств на окружающую среду и установить значение уменьшения неблагоприятного экологического воздействия за счет оптимизации его конструктивных параметров и режимов работы.

В следующих статьях авторами предложены конструкции универсальных рабочих органов для почвообрабатывающей и посевной техники.

Авторами статьи [4] разработаны универсальные рабочие органы для почвообрабатывающих посевных агрегатов, которые обеспечивают одновременный посев и обработку почвы.

В статье [5] показаны научные принципы прогнозирования эксплуатационных показателей и расчет конструктивных параметров, которые необходимо учесть при проектировании и использовании почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

В статьях [6-8] рассматриваются процессы крошения почвы под воздействием рабочего органа, которые применимы к разработанной нами комбинированной машине. На основе рациональной комбинации предложенных рабочих органов была разработана сельскохозяйственная комбинированная машина КМ-0,6-0,3.

Авторами статей [9-11] разработаны и усовершенствованы комбинированные машины для посева мелкосеменных культур. На основе данных исследований можно спроектировать комбинированные машины для посева лука на гребнях, которые адаптированы к почвенно-климатическим особенностям Республики Таджикистан.

Энергосберегающие технологии возделывания мелкосеменных культур изложены в статьях [12-15], где авторами подробно рассмотрены результаты энергетической оценки функционирования посевного агрегата.

Цель работы. Оптимизация параметров и скоростных режимов работы посевного агрегата для посева репчатого лука на гребнях в условиях Республики Таджикистан.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования комбинированной машины КМ-0,6-0,3 в агрегате с мотоблоком «Zirka WC10D» (мощностью 10 л.с.) для посева семян репчатого лука проводились на опытном участке Научного центра инновационных технологий и механизации сельского хозяйства ТАСХН 10 октября 2024 года, с целью определения вероятностно-статистических характеристик показателей качества работы посевного агрегата в условиях, приведенных в таблице 1.

Влажность почвы определялась с использованием электронных весов OHAUS SX 5200 (высокоточные лабораторные весы) и сушильного шкафа СШ-3 ТУ 79. Масса образца почвы измерялась до и после сушки, и по разности массе образца почвы определялась ее влажность.

Твердость и плотность почвы определялись пенетрометром DICKEY-john, состоящим из щупа для внедрения в почву и стрелочного индикатора. Щуп прибора вводится в почву с постоянным усилием, а индикатор даст показания в фунтах на дюйм квадратный, которые в дальнейшем переводятся на другие величины.

Для определения влажности и температуры окружающей среды был использован профессиональный термогигрометр TESTO 610, а для определения скорости ветра – анемометр TESTO 410.

Table 1. Conditions for experimental studies on sowing onion seeds using a seeding unit of a two-wheel tractor and combined machine KM-0.6-0.3

На рисунке 1 представлена конструктивно-технологическая схема комбинированной машины КМ-0,6-0,3 для посева мелкосеменных культур, которая агрегируется с мотоблоком мощностью 8-15 л.с.

Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема комбинированной машины КМ-0,6-0,3 (вид сверху):

8 – широкополосный сошник; 9 – загортач

Fig. 1. Design and technological scheme of the combined machine КМ-0.6-0.3 (top view):
 1 – frame; 2 – ridge makers; 3 – support and drive wheels; 4 – mechanism for transmitting rotational motion from the support and drive wheel to the seeding unit; 5 – seeding unit; 6 – seed hopper; 7 – seed pipe; 8 – wide-band coulter; 9 – coverer

Машина состоит из рамы с навесным механизмом, двух почвообрабатывающих отвалов-гребнеделателей, двух опорно-приводных колёс, цепного механизма для передачи вращательного движения, высевающего аппарата, бункера для семян, семяпровода, широкополосного сошника, загортачей. Посредством рамы и навесного механизма КМ-0,6-0,3 агрегируется с мотоблоком. В начале поступательного движения агрегата отвалы-гребнеделатели под воздействием собственного веса машины врезаются в почву и способствуют нарезке гребня. Опорно-приводные колёса под воздействием сопротивления почвы посредством цепного механизма передают вращательное движение на высевающий аппарат, находящийся на дне семенного бункера. Заданная норма семян возделываемой культуры через семяпровод попадает в широкополосный сошник, установленный под определённым углом наклона, направленный вниз. Далее семена рассыпаются по поверхности гребня и производится широкополосный посев, а загортачи накрывают семена почвой.

Широкополосный сошник (структурная схема показана на рисунке 2), работает следующим образом: семена, выделенные высевающим аппаратом сеялки и поступившие потоком в горловину 3 попадают на поверхность дна 1 сошника, на котором в шахматном порядке закреплены штифты 6. В результате соударения о штифты, они, равномерно распределяясь внутри камеры, высыпаются из нижней части сошника полосой шириной 30 см на поверхность почвы [16].

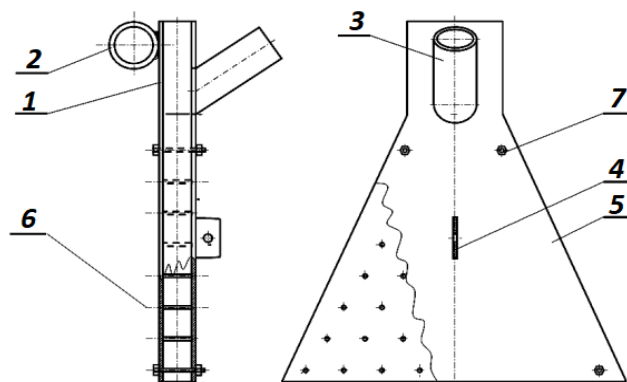


Рис. 2. Структурная схема широкополосного сошника комбинированной машины КМ-0,6-0,3:
 1–дно; 2 – втулка; 3 – горловина; 4 – кронштейн; 5 – крышка; 6 – штифты; 7 – болт с гайкой

Fig. 2. Structural diagram of the wide-band coulter of the combined machine КМ-0.6-0.3:
 1 – bottom; 2 – bushing; 3 – neck; 4 – bracket; 5 – cover; 6 – pins; 7 – bolt with nut

На рисунке 3 представлен общий вид посевного агрегата Мотоблок+ КМ-0,6-0,3 во время выполнения технологического процесса посева семян репчатого лука на гребнях.



Рис. 3. Посевной агрегат Мотоблок+КМ-0,6-0,3 при выполнении технологического процесса посева репчатого лука

Fig. 3. Seeding unit two-wheel tractor+КМ-0.6-0.3 during the technological process of onion seeds sowing

В таблице 2 приведены основные технические характеристики разработанной малогабаритной комбинированной машины КМ-0,6-0,3.

Таблица 2. Техническая характеристика комбинированной машины КМ-0,6-0,3
Table 2. Technical characteristics of the combined machine КМ-0.6-0.3

Параметры	Значения
Тип агрегатирования	Навесная
Производительность, га/ч	0,3
Рабочая скорость, м/с (км/ч)	0,6 - 1,4 (2-5)
Глубина борозд, см	13 - 15
Норма высева семян, кг/га	3 - 20
Ширина захвата, см	60
Габаритные размеры, мм	
-длина	910
-ширина	716
-высота	760
Обслуживающий персонал, чел.	1
Масса машины, кг	35,0

Оптимизация параметров и скоростных режимов работы посевного агрегата способствует не только улучшению показателей качества посева, но и увеличению производительности без существенной потери качества выполненной технологической операции, что в свою очередь обеспечивает экономическую эффективность выполняемого технологического процесса. Для оптимизации скоростного режима работы посевного агрегата следует учитывать изменения показателей качества в зависимости от режимов работы МТА.

По требованиям агротехники для посева мелкосеменных культур основными показателями оценки качества выполнения технологического процесса являются глубина посева семян, густота семян, глубина поливных борозд и ширина стыкового междурядья. В

таблице 3 приведены агротехнические требования, предъявляемые к посеву семян репчатого лука в условиях Республики Таджикистан [17].

Таблица 3. Агротехнические требования, предъявляемые к посеву мелкосеменных культур
Table 3. Agrotechnical requirements for small-seeded crops sowing

Контролируемые показатели качества	Допустимые отклонения
Глубина заделки семян, см	Глубина заделки семян должна соответствовать заданной, отклонение не более $\pm 0,5$ см
Густота семян, шт./га	Густота семян не должно отклоняться от заданного не более чем на ± 3 %
Глубина нарезки поливных борозд, см	Глубина нарезки поливных борозд должна соответствовать заданной ± 2 см
Ширина стыкового междурядья, см	Ширина стыкового междурядья должна быть везде одинаковой и соответствовать заданной ± 2 см

Для согласования двух критериев эффективности – скорости и показателя качества выполнения технологического процесса посева, на рисунке 4 представлена схема для определения оптимального диапазона рабочей скорости посевного агрегата, где Π_k – принятый показатель качества, а V_p – рабочая скорость посевного агрегата [18].

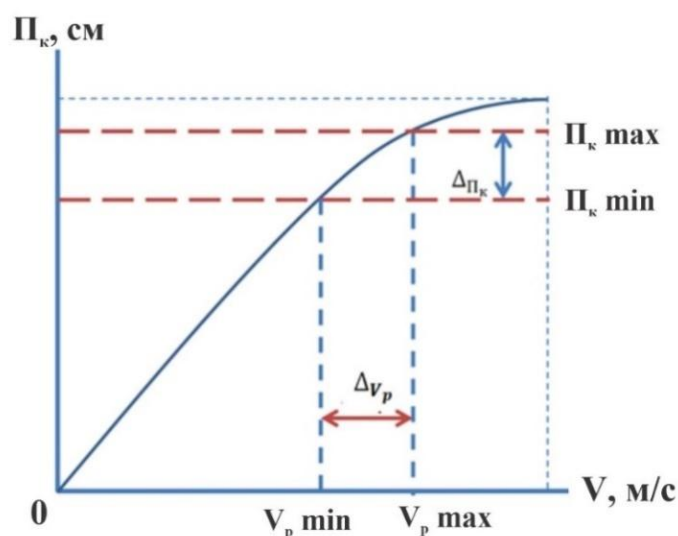


Рис. 4. Зависимость показателя качества от рабочей скорости посевного агрегата
Fig. 4. Dependence of the quality indicator on the working speed of the seeding unit

Общеизвестно, что с увеличением скорости движения наблюдается повышение производительности машинно-тракторных агрегатов. При этом следует отметить, что скоростные режимы работы МТА ограничиваются многими факторами, в том числе и показателями качества процесса, которые в свою очередь могут значительно отклониться за допустимые агротехнические нормы и являются основным фактором оценки выполненного технологического процесса [19].

В этой связи, оптимальное значение скорости посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 необходимо определить с учетом допустимого диапазона изменения агротехнических показателей качества процесса.

На рисунке 4 $P_{k_{min}}$ и $P_{k_{max}}$ – минимальное и максимальное допустимое значение показателей качества по предъявляемым агротехнологическим требованиям, ΔP_k представляет допустимый диапазон изменения агротехнических показателей качества процесса, $V_{p_{min}}$ и $V_{p_{max}}$ – минимальное и максимальное допустимое значение скорости движения посевного агрегата, а $\Delta \square_{\square}$ – диапазон изменения оптимальных значений рабочей скорости посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3, который соответствует показателям качества.

Значения $\Delta \square_{\square}$ и ΔP_k определяются при проведении и обобщении экспериментальных исследований, где посевной агрегат Мотоблок+КМ-0,6-0,3 эксплуатируется в различных скоростных режимах.

То есть, в результате проведения экспериментальных исследований выбираются оптимальные диапазоны скорости и производительности посевного агрегата в соответствии с соблюдением предъявляемых агротехнических требований. Для этого нами было выбрано три скорости движения посевного агрегата: 2,2, 2,9 и 3,6 км/ч. Данный диапазон был выбран не только с учётом агротехнических норм, но и для того, чтобы собрать данные при трёх различных скоростных режимах. Это позволяет выявить закономерности изменения изучаемых параметров.

Для измерения значения глубины нарезки поливных борозд, ширины стыковых междурядий, глубины посева был использован комплект реек и линеек. На рисунке 5 показан процесс измерения глубины борозд, а на рисунке 6 – измерение ширины стыкового междурядья после технологического процесса посева семян репчатого лука посевным агрегатом Мотоблок+КМ-0,6-0,3.



Рис. 5. Процесс измерения глубины поливных борозд

Fig. 5. Measuring the depth of irrigation furrows



Рис. 6. Процесс измерения ширины стыковых междурядий
Fig. 6. Measuring the width of the guess rows

Результаты исследования. Во время проведения экспериментальных исследований для получения объективных результатов каждый исследуемый показатель качества (глубина посева семян, густота семян, глубина поливных борозд и ширина стыкового междурядья) был записан по 20 раз и были установлены среднее значение, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации показателей качества выполненного технологического процесса посева семян репчатого лука с одновременной нарезкой поливной борозды. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4. Вероятностно-статистические характеристики показателей качества работы посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 при посеве семян репчатого лука

Table 4. Probabilistic and statistical characteristics of the performance indicators of the sowing unit two-wheel tractor+КМ-0,6-0,3 when sowing onion seeds

Показатели качества	Скорость движения, км/ч	Среднее значение	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %
Глубина посева семян, см	2,2	2,01	0,29	14,43
	2,9	1,74	0,32	18,39
	3,6	1,42	0,39	27,46
Густота семян, млн. шт./га	2,2	1,24	0,07	5,32
	2,9	1,22	0,09	7,69
	3,6	1,21	0,12	10,26
Глубина нарезки поливных борозд, см	2,2	14,19	1,46	10,29
	2,9	13,26	1,55	11,70
	3,6	11,67	1,50	12,86
Ширина стыкового междурядья, см	2,2	56,95	4,77	8,37
	2,9	60,95	2,77	4,54
	3,6	63,25	6,23	9,85

По экспериментальным исследованиям установлено, что с повышением скорости посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 с 2,2 до 3,6 км/ч, среднее значение глубины посева семян уменьшается с 2,01 до 1,44 см. Это приводит к снижению качества посева, так как увеличивается разброс значений (стандартное отклонение возрастает с 0,29 до 0,39 см, а коэффициент вариации с 14,43 до 27,46%), что указывает на ухудшение качества, и несоответствие принятым агротехническим нормам посева.

На рисунке 7 представлена графическая зависимость среднего значения глубины посева семян от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3. На графике указаны минимальное и максимальное агротехнические требования, предъявляемые к глубине посева мелкосеменных культур, которые указаны штрихованными линиями min и max, а пересечение данных линий (V_{min} и V_{max}) указывают на оптимальный диапазон скорости для выполнения данной технологической операции, который составляет от 2,23 до 3,44 км/ч.

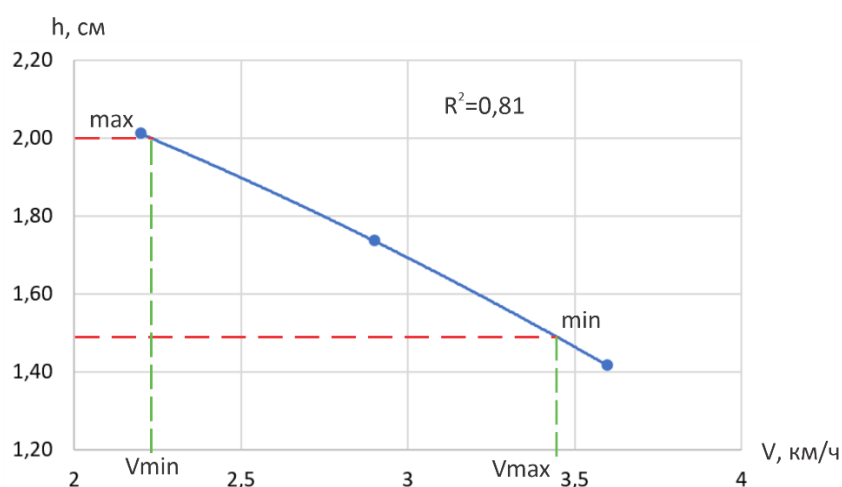


Рис. 7. Графическая зависимость среднего значения глубины посева семян от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Fig. 7. Graphic dependence of the average value of seed sowing depth on the travelling speed of the sowing unit two-wheel tractor+KM-0.6-0.3

Экспериментально установлено (таблица 4), что с увеличением скоростного режима от 2,2 до 3,6 км/ч среднее значение густоты семян уменьшается от 1,24 до 1,21 млн. шт./га. При этом стандартное отклонение и коэффициент вариации увеличиваются от 0,07 до 0,12 млн. шт./га и от 5,32 до 10,26% соответственно, что указывает на снижение принятых показателей качества густоты семян.

На рисунке 8 представлена графическая зависимость среднего значения густоты семян от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 во время выполнения технологического процесса посева семян репчатого лука на гребнях, а оптимальный диапазон скорости для выполнения данной технологической операции составляет от 2,2 до 3,6 км/ч.

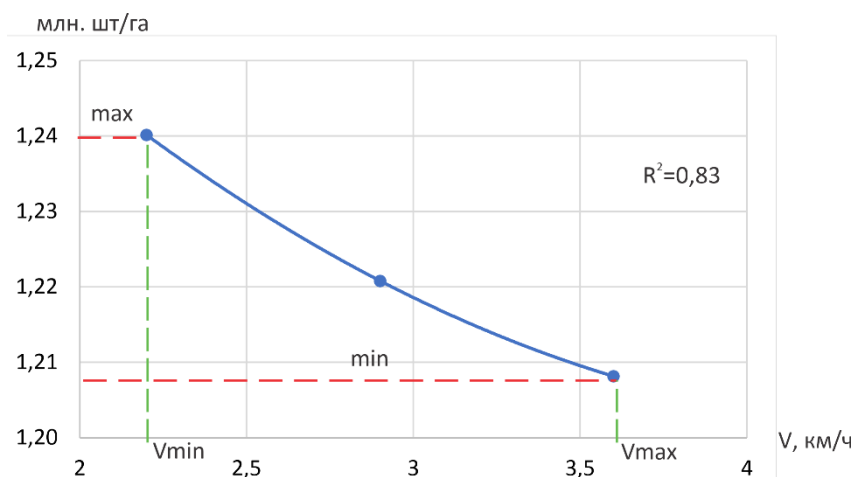


Рис. 8. Графическая зависимость среднего значения густоты семян от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Fig. 8. Graphic dependence of the average value of seed density on the travelling speed of the sowing unit two-wheel tractor+KM-0.6-0.3

По результатам проведенных экспериментов установлено (таблица 4), что с увеличением скоростного режима от 2,2 до 3,6 км/ч среднее значение глубины поливных борозд уменьшается от 14,19 до 11,67 см. При этом стандартное отклонение и коэффициент вариации увеличиваются от 1,46 до 1,50 см и от 10,29 до 12,87 % соответственно.

На рисунке 9 представлена графическая зависимость среднего значения глубины нарезки поливных борозд от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3, а оптимальный диапазон скорости для выполнения данной технологической операции составляет от 2,38 до 3,46 км/ч.

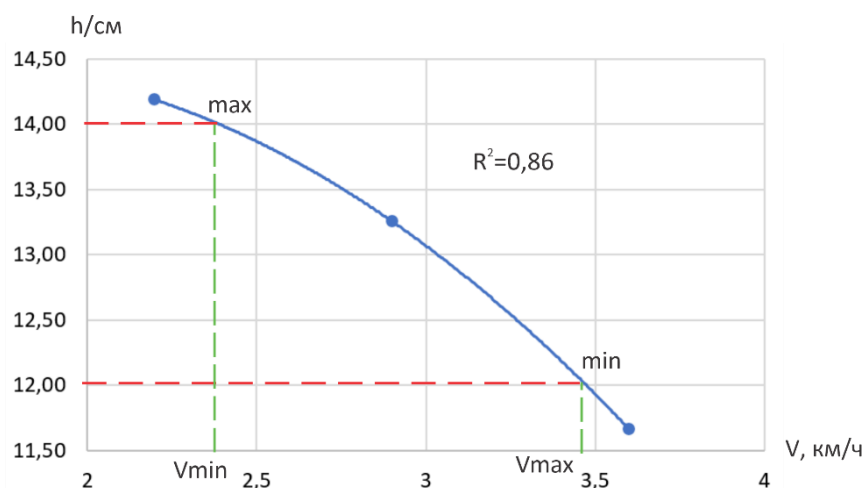


Рис. 9. Графическая зависимость среднего значения глубины нарезки поливных борозд от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Fig. 9. Graphic dependence of the average value of the cutting depth of irrigation furrows on the travelling speed of the sowing unit two-wheel tractor+KM-0.6-0.3

По результатам проведенных экспериментов (таблица 4) установлено что, с увеличением скоростного режима от 2,2 до 3,6 км/ч среднее значение ширины стыкового междурядья увеличивается от 56,95 до 63,25 см. При этом стандартное отклонение и

коэффициент вариации тоже увеличиваются от 4,77 до 6,23 см и от 8,37 до 9,85 % соответственно, что указывает на снижение показателя качества ширины стыкового междурядья и выход показателя за агротехнические нормы.

На рисунке 10 представлена графическая зависимость среднего значения ширины стыкового междурядья от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3, оптимальный диапазон скорости для выполнения данной технологической операции составляет от 2,51 до 3,17 км/ч.

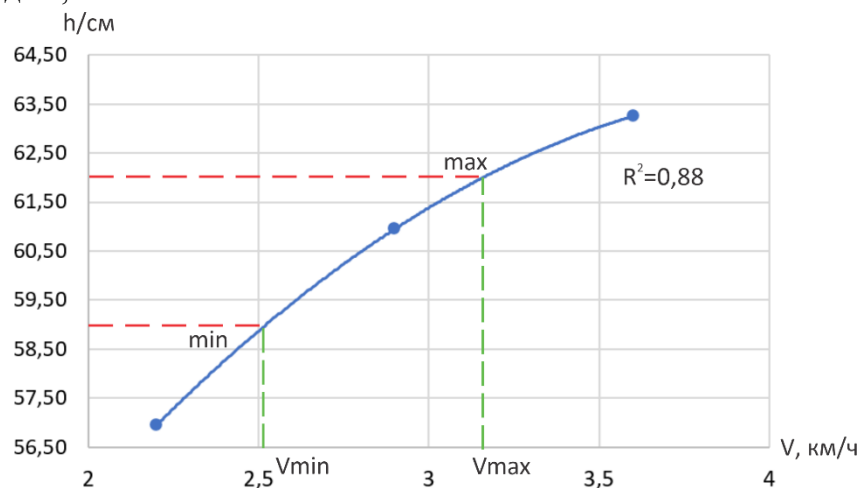


Рис. 10. Графическая зависимость среднего значения ширины стыкового междурядья от скорости движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Fig. 10. Graphic dependence of the average value of the width of the guess row spacing on the travelling speed of the sowing unit two-wheel tractor+КМ-0.6-0.3

На основе установленных из графических зависимостей показателей качества от скорости движения посевного агрегата (рис. 7-10) разработана диаграмма (рис. 11), где определяется оптимальный скоростной режим работы посевного агрегата во время выполнения технологического процесса посева семян репчатого лука для соответствия принятым показателям качества.

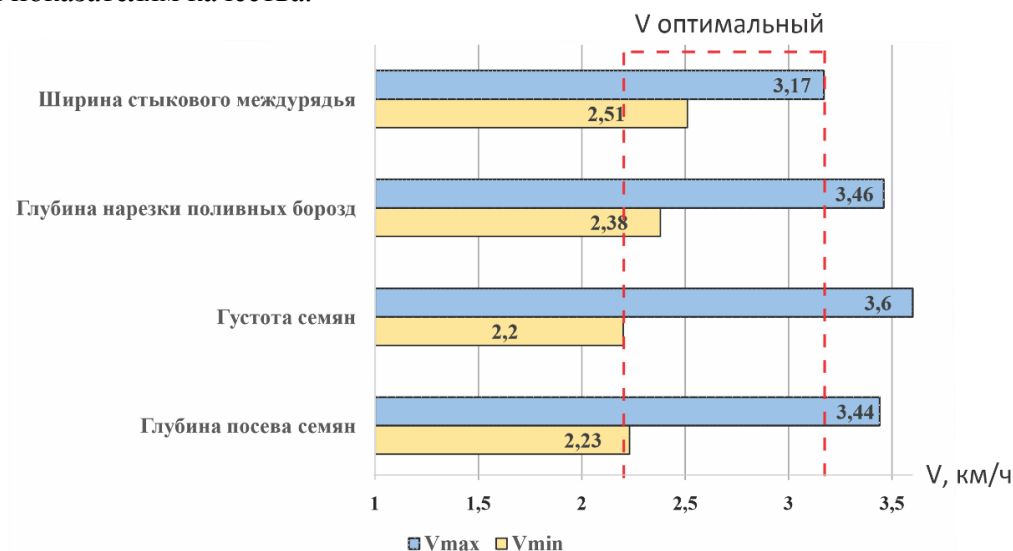


Рис. 11. Диаграмма для выбора оптимального диапазона скорости посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Fig. 11. Diagram for selecting the optimal speed range of the sowing unit two-wheel tractor+КМ-0.6-0.3

Из рисунка 11 следует, что оптимальный диапазон скорости (V_{opt}) для соблюдения принятых показателей качества колеблется в пределах от 2,2 до 3,17 км/ч. Для получения большей производительности можно увеличить скорость движения посевного агрегата до 3,44 км/ч, но в данном случае показатель качества – ширина стыкового междурядья снизится на 8,5%, что является допустимой агротехнической нормой. Из полученных экспериментальных исследований нами принят оптимальный диапазон рабочей скорости посевного агрегата от 2,2 до 3,44 км/ч в условиях Гиссарской долины Республики Таджикистан.

На основе экспериментальных данных выявлены закономерности изменения вероятностно-статистических оценок показателей качества работы посевного агрегата, которые описываются эмпирическими зависимостями, приведёнными в таблице 5.

Таблица 5. Эмпирические зависимости вероятностно-статистических характеристик показателей качества при выполнении технологического процесса посева репчатого лука посевным агрегатом Мотоблок+КМ-0,6-0,3

Table 5. Empirical dependences of probabilistic and statistical characteristics of quality indicators during the technological process of sowing onions with the two-wheel tractor+KM-0.6-0.3 sowing unit

Вероятностно-статистических характеристик показателей качества	Расчётная формула
Среднее значение глубины посева семян, см	$h_r = -0,05V^2 - 0,16V + 2,58$
Среднее значение густоты семян, млн. шт./га	$h_{pc} = -0,015V^2 + 0,108V + 1,405$
Среднее значение глубины поливной борозды, см	$h_b = -0,67V^2 + 2,1V + 12,81$
Среднее значение ширины стыкового междурядья, см	$h_{шм} = -1,73V^2 - 14,56V + 33,31$

На рисунке 12 представлен общий вид поля после появления всходов лука, посеянных посевным агрегатом Мотоблок+КМ-0,6-0,3.



Рис. 12. Общий вид поля после появления всходов лука

Fig. 12. General view of the field after the emergence of onion

Обсуждение. Проведенные исследования подтвердили возможность обеспечения эффективного и качественного функционирования разработанного посевного агрегата,

предназначенного для использования на приусадебных участках и в малых сельскохозяйственных предприятиях.

Результаты экспериментальных исследований позволяют заключить, что скорость движения посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 оказывает существенное влияние на качество посева семян репчатого лука и параметры формирования поливных борозд.

На основе учета и оценки показателей качества процесса посева, таких как глубина заделки и равномерность посева семян, глубина нарезки поливных борозд и ширина стыкового междурядья был обоснован рациональный диапазон рабочих скоростей посевного агрегата в пределах от 0,61 до 0,96 м/с (или от 2,2 до 3,44 км/ч).

Экспериментально установлено основное преимущество разработанного посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 по сравнению с посевными агрегатами, которые широко применяются в производстве, обеспечивающие двух или трёх строчные посевы семян на гребнях. В качестве примера можно привести овощную сеялку, разработанную в Республике Узбекистан, которая обеспечивает высокую эффективность процесса посева семян лука трёхстрочным способом [20]. Преимущество разработанного нами посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 заключается в том, что он обеспечивает широкополосный посев семян лука. Такой способ посева семян в дальнейшем исключает процесс ручного прореживания всходов в сравнении со строчным посевом.

Полученные закономерности изменения вероятностно-статистических характеристик показателей качества процесса посева семян лука, которые описываются эмпирическими зависимостями, в дальнейшем могут быть использованы при обосновании скоростных режимов работы и совершенствовании конструктивно-технологических параметров посевных агрегатов.

Выводы. По результатам проведенных экспериментальных исследований было определено, что повышение эффективности малогабаритных сеялок для посева иелкосемянных культур возможно не только за счет оптимизации конструктивных и технологических параметров, но и за счет оптимизации режимов работы посевного агрегата. Экспериментально были установлен оптимальный режим работы посевного агрегата Мотоблок+КМ-0,6-0,3 при выполнении технологического процесса посева семян репчатого лука в типичных условиях Гиссарской долины Республики Таджикистан, который составил от 2,2 до 3,44 км/ч. В данном скоростном диапазоне достигается не только наибольшее качество выполнения технологического процесса, но и наибольшая производительность посевного агрегата, которая будет составлять 0,32 га/ч. За счет экономии топлива и сокращения вредных выбросов, соблюдения агротехнологии и улучшенного показателя качества выполнения технологического процесса обеспечивается экологичность разработанного посевного агрегата. Соответственно для достижения высоких показателей энергетической, экономической и экологической эффективности следует учитывать оптимальные режимы работы посевного агрегата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брюханов А.Ю., Судаченко В.Н., Эрк А.Ф. Цифровые технологии обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственного производства // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1(98). С. 257-268. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10144>
EDN: ZAQOZN

2. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Обломкова Н.С. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2(99). С. 250-260. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170> EDN: OWKDEB
3. Джаббаров Н.И., Косульников Р.А., Добринов А.В., Комоедов А.В. Сравнительная энерго-экологическая оценка почвообрабатывающих агрегатов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 1(73). С. 251-263. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-29> EDN: ZUGUUZ
4. Лачуга Ю.Ф., Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х. Новые конструкции универсальных рабочих органов почвообрабатывающей и посевной техники // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 4. С. 73-76. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019473-76>
5. Добринов А. В., Джаббаров Н. И., Дементьев А. М. Научные принципы прогнозирования эксплуатационных показателей и расчет конструктивных параметров почвообрабатывающе-посевных агрегатов на стадиях проектирования и эксплуатации // Экология и сельскохозяйственная техника: Матер. 6-й Межд. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 13-14 мая 2009 г.) СПб.: СЗНИИМЭСХ. 2009. Т. 1. С. 72-79. EDN: QEYWYK
6. Джаббаров Н.И., Добринов А.В. Обоснование конструктивных параметров рабочего органа для рыхления почвы и уничтожения сорных растений в органическом земледелии // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 1(72). С. 23-33. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_23 EDN: IOXJZC
7. Джаббаров Н. И., Ахмадов Б. Р. Оценка эффективности работы сельскохозяйственных агрегатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2006. № 10. С. 26-27. EDN: HVTQIN
8. Джаббаров Н. И., Сафаров М., Миракилов Д., Ахмадов Б.Р. Обоснование параметров почвообрабатывающего органа комбинированной машины КМ-2,4 // Кишоварз (Земледелец). 2009. № 2. С. 29-32. EDN: KWWYUIP
9. Сафаров М. Комбинированная машина КМ-2,4 «Зироаткор» для посева зерновых культур на гребнях // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 3(41). С. 56-59. EDN: TUWKJT
10. Джаббаров П.Н. Повышение эффективности технологического процесса посева зерновых культур на гребнях путём обоснования параметров и режимов работы универсальной комбинированной сеялки с трактором класса 1,4. Дис... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАУ. 2013. 120 с. EDN: UYYUXJ
11. Сафаров М., Сафаров Т.М., Джаббаров П.Н. Малогабаритная комбинированная машина для гребневого сева мелкосемянных культур // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2021. № 2(68). С. 61-64. EDN: XXDNGC
12. Ахмадов Б.Р., Ходжиев Б.Б., Рахимов Б. Г. Энергоэффективность комбинированных сельскохозяйственных машин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Матер. межд. науч.-практ. конф. (Воронеж, 06-07 июня 2018 г.) / Под общей ред. В.А. Гулевского. Воронеж: Воронежский ГАУ. 2018. Т. 2. С. 17-20. EDN: YLOXAL
13. Ахмадов Б.Р. Техничко-технологические основы повышения эффективности возделывания сельскохозяйственных культур в повторных посевах. Душанбе: ИНФОРН. 2015. 216 с. EDN: VZNOSD

14. Сафаров М., Джабборов П.Н., Сафаров Т.М. Разработка энергосберегающих технологий возделывания лука репчатого // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2017. № 1(51). С. 62-65. EDN: ZQQQVF
15. Искандаров И.А. Техничко-экономическая оценка эффективности универсальной сеялки для посева пропашных культур // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 1(118). С. 96-107. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-96-106> EDN: DPWLVW
16. Сафаров М., Гафаров А.А., Сафаров Т.М., Джабборов П.Н. Результаты полевых исследований малогабаритной комбинированной сеялки КМ-0,6-0,3 // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2021. № 4(47). С. 106-112. EDN: UXBCNI
17. Ахмадов Б.Р., Ризоев А.Б., Ходжиев Б.Б., Рахимов Б.Г. Осуществление контроля и оценка качества технологических процессов // Кишоварз (Земледелец). 2018. № 1. С. 40-42. EDN: NLUTHG
18. Искандаров И.А., Исматов К.Н., Сафаров М. Повышение эффективности посева семян кукурузы оптимизацией режимов работы малогабаритной комбинированной сеялки ТЗК-2 // Вестник НГИЭИ. 2025. № 7(170). С. 7-22. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-7-7-22> EDN: AERCIK
19. Искандаров И.А. Вероятностно статистическая оценка показателей качества работы агрегата для посева пропашных культур // Вестник Технологического университета Таджикистана. 2023. № 3(54). С. 43-54. EDN: AYMVSU
20. Ибрагимов А.А., Караханов А.К., Абдурахманов А.А., Эшдавлатов А.Э., Утениязов П.А., Хаджиев А.А. Результаты исследований новой сеялки для высева семян лука // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 4. С. 12-16. EDN: OFFZJQ

REFERENCES

1. Briukhanov A.Yu., Sudachenko V.N., Erk A.F. Digital technologies of ensuring environmental compatibility of agricultural production. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2019;1 (98):257-268. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10144> EDN: ZAQOZN
2. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Indicators of negative environmental impact in agri-food production. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies, machines and equipment for mechanised crop and livestock production. 2019;2(99):250-260. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10170> EDN: OWKDEB
3. Dzhabborov N.I., Kosulnikov R.A., Dobrinov A.V., Komoedov A.D. Comparative energy-ecological assessment of soil tillage machines. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education. 2024;1(73):251-263. (In Russ.) <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-01-29> EDN: ZUGUUZ
4. Lachuga Yu. F., Akhalaya B. Kh., Shogenov Yu. Kh. New designs of universal working bodies of tillage and seeding equipment. Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka = Russian Agricultural Science. 2019; 4: 73-76. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019473-76>
5. Dobrinov A. V., Dzhabborov N. I., Dementyev A. M. Performance forecast principles and general calculation algorithm of design factors of integrated tilling and sowing units. In: Ecology and Agricultural Machinery: Proc. 6th Int. Sci. Prac. Conf. (Saint Petersburg, May 13-14 2009).

Saint Petersburg: SZNIIMESH. 2009;1:72-79. (In Russ.) EDN: QEYWYK

6. Jabborov N. I., Dobrinov A. V. Validation of the design parameters of the tillage tool developed for soil loosening and clean weeding in organic farming. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University. 2022;15-1(72):23-33. (In Russ.) https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_23 EDN: IOXJZC

7. Jabborov N. I., Akhmadov B. R. Evaluation of the efficiency of agricultural units. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2006;10:26-27. (In Russ.) EDN: HVTQIN

8. Jabborov N. I., Safarov M., Mirakilov D., Akhmadov B. R. Basis of parameters of the working organ of combined machine KM-2.4 for soil cultivating. Zemledelets = Peasant. 2009;2:29-32. (In Russ.) EDN: KWWYUIP

9. Safarov M. Multifunction machine KM-2,4 “Ziroatkor” for bed-planting of cereals. Doklady Tadjikskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk = Reports of the Tajik Academy of Agricultural Sciences. 2014;3(41):56-59. (In Russ.) EDN: TUWKJT

10. Jabborov P.N. Increasing the efficiency of the technological process of sowing grain crops on ridges by substantiating the parameters and operating modes of a universal combined seeder with a class 1.4 tractor. Diss ... Cand. Sci. (Engineering). Saint Petersburg: Saint Petersburg State Agrarian University. 2013. 120 p. (In Russ.) EDN: UYYYYXJ

11. Safarov M., Safarov T.M., Jabborov P.N. Small combined machine for ridge seeding of small-seed crops. Doklady Tadjikskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk = Reports of the Tajik Academy of Agricultural Sciences. 2021; 2 (68): 61-64. (In Russ.) EDN: XXDNGC

12. Akhmedov B.R., Khodjiev B.B., Rakhimov B.G. Energy efficiency of combined agricultural machines. In: Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Voronezh, June 6-7, 2018). V.A. Gulevsky (ed.). Voronezh: Voronezh State Agrarian University. 2018;2:17-20. (In Russ.) EDN: YLOXAL

13. Akhmadov B.R. Technical and technological foundations for increasing the efficiency of agricultural crop cultivation in repeated sowings. Dushanbe: INFORN. 2015. 216 p. (In Russ.) EDN: VZNOSD

14. Safarov M., Jabborov P.N., Safarov T.M. Development of energy-saving technologies for onion cultivation. Doklady Tadjikskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk = Reports of the Tajik Academy of Agricultural Sciences. 2017;1 (51): 62-65. (In Russ.) EDN: ZQQQVF

15. Iskandarov I.A. Technical and economic assessment of effectiveness of all-crop drill for row crops sowing. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2024;1 (118):96-107. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-96-106> EDN: DPWLVW

16. Safarov M., Gafarov A.A., Safarov T.M., Jabborov P.N. Results of field studies of the small universal seeder KM-0.6-0.3. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Tadjikistana = Bulletin of the Technological University of Tajikistan. 2021; 4 (47):106-112. (In Russ.) EDN: UXBCNI

17. Ahmedov B.R., Rizoev A.B., Hajiyeu B.B., Rakhimov B.G. Monitoring and evaluation of the quality of technological processes. Zemledelets = Peasant. 2018;1:40-42. (In Russ.) EDN: NLUTHG

18. Iskandarov I.A., Ismatov K.N., Safarov M. Increasing the efficiency of sowing corn seeds by optimizing the operating modes of the small-sized combined seeder TZK-2. Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. 2025; 7(170):

7-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-7-7-22> EDN: AERCIK

19. Iskandarov I.A. Probabilistic and statistical evaluation of the quality indicators of the unit for sowing rowed crops. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Tadjikistana = Bulletin of the Technological University of Tajikistan. 2023; 3 (54): 43-54. (In Russ.) EDN: AYMVSV

20. Ibragimov A.A., Karakhanov A.K., Abdurakhmanov A.A., Eshdavlatov A.E., Uteniyazov P.A., Khadzhiev A.A. Research results of a new onion seed drill. Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies. 2020; 14 (4):12-16. (In Eng.) EDN: OFFZJQ

Об авторах	About the authors
Искандаров Ислон Анварович , канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела технической диагностики, ремонта и эксплуатации машин Научного центра инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук. ул. Дусти 7, пгт. Шарора, г. Гиссар, 735022, Республика Таджикистан. islomiskandarov@gmail.com +(992) 918 69 69 20	Islom A. Iskandarov , Candidate of Technical Sciences, senior researcher, Department of Technical Diagnostics, Repair and Operation of Machines, Scientific Center of Innovation Technologies and Mechanization of Agriculture, The Tajik Academy of Agricultural Sciences Dusti Str.7, Sharora Settl., Hissar, 735022, Republic of Tajikistan. islomiskandarov@gmail.com +(992) 918 69 69 20
Сафаров Тохир Мамаджонович , магистр техники и технологии, докторант Научного центра инновационных технологий и механизации сельского хозяйства Таджикской академии сельскохозяйственных наук. ул. Дусти 7, пгт. Шарора, г. Гиссар, 735022, Республика Таджикистан. tohirjon.s-1993@mail.ru +(992) 908 08 08 69	Tohir M. Safarov , Master of Engineering and Technology, Doctoral student of the Scientific Center of Innovation Technologies and Mechanization of Agriculture, The Tajik Academy of Agricultural Sciences Dusti Str. 7, Sharora Settl., Hissar, 735022, Republic of Tajikistan. tohirjon.s-1993@mail.ru +(992) 908 08 08 69
Заявленный вклад авторов Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.	Authors' contribution All authors made an equivalent contribution to the preparation of the manuscript.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest and they bear equal responsibility for plagiarism.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 03.10.2025	Received: 03.10.2025
Одобрена после рецензирования: 27.01.2026	Approved after reviewing: 27.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИКАТЫВАЮЩИХ КАТКОВ ДИСКОВЫХ БОРОН

Михаил Александрович Терёхин✉
АО «Радиозавод», г. Пенза, Россия

m.a.terekhin@rf58.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1619-9627>

Аннотация.

В статье представлены результаты анализа конструктивных особенностей и технологического назначения прикатывающих катков современных дисковых почвообрабатывающих агрегатов. Актуальность исследования обусловлена растущими требованиями к качеству поверхностной и предпосевной обработки почвы и необходимостью адаптации сельскохозяйственных машин к специфическим особенностям почвенно-климатических условий различных регионов России. Отмечается, что отечественные производители дисковых борон, такие как ОАО «Белагромаш-Сервис имени В.М. Рязанова», ООО «БДМ-Агро», ГК «Радогост-Маш» и другие, в основном комплектуют свою технику универсальными, но не всегда оптимальными для конкретных условий планчатыми и спиральными шлейф-катками. Ведущие же зарубежные фирмы, такие как Kverneland, Lemken, Amazone, Pöttinger и Horsch, наоборот предлагают для своих моделей широкий спектр опционных катков, демонстрируя принципиально иной подход к производству и реализации почвообрабатывающей техники. В качестве объекта для детального изучения выбран модельный ряд дисковых борон Pöttinger Terradisc, для которого предлагается 9 различных конфигураций прикатывающих катков. Методика исследований основана на техническом анализе конструкций катков, сравнении их геометрических параметров, значения рабочего удельного давления на почву и рекомендаций производителя по применению в различных агротехнических условиях. В результате для каждого типа прикатывающего катка определены оптимальные условия эксплуатации, преимущества и технические ограничения к использованию. Полученные данные представлены в сводной таблице, наглядно демонстрирующей специализацию каждого из рассмотренных типов катков по наиболее важным параметрам, таким как уплотнение почвы, измельчение почвенных комков, возможность работы по пересушенным, переувлажненным и каменистым почвам и др. Сделан вывод, что возможность выбора конфигурации прикатывающего катка позволяет фермеру скомплектовать дисковый агрегат, оптимально адаптированный к задачам конкретного хозяйства. На основании проведенного анализа предлагается отечественным производителям рассмотреть возможность расширения номенклатуры опционных катков для повышения конкурентоспособности своей продукции на внутреннем рынке и более полного удовлетворения потребностей фермеров.

Ключевые слова: борона дисковая, каток прикатывающий, Terradisc, качество обработки, универсальность, уплотнение, измельчение

Для цитирования: Терёхин М.А. Анализ конструктивных особенностей прикатывающих катков дисковых борон // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1(126) С. 129-145. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-129-144>

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF DISC HARROW ROLLERS

Mikhail A. Terekhin✉

Radiozavod, Penza, Russia

m.a.terekhin@rf58.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1619-9627>

Abstract. The article presents the analysis results of the design features and functional application of packer rollers within modern disc tillage units. The study addresses the increasing requirements for the quality of surface and pre-sowing tillage. It responds to the need to adapt agricultural machinery for specific soil and climatic conditions of various regions in Russia. The study notes that Russian manufacturers of disc harrows (Belagromash-Service, BDM-Agro, Radogost-Mash, and others) mainly equip their machinery with universal slatted/spiral tine rollers, which may not be optimal for specific field conditions. In contrast, leading foreign companies like Kverneland, Lemken, Amazone, Pöttinger, and Horsch offer multiple optional roller configurations for their models. These companies demonstrate a markedly different approach to the production and sale of soil tillage equipment. The object of our detailed study was the Pöttinger Terradisc disc harrow model range with nine different configurations of packer rollers. The study methodology was a technical analysis of roller designs, comparison of their geometry, the values of specific working pressure on soil, and the manufacturer's recommendations for roller use in various agro-environments. The study determined the optimal operating conditions, advantages, and technical limitations for each type of packer roller. The data obtained are presented in a comparative table showing roller specialization by function – soil compaction, clod crushing, performance on stony/waterlogged/over-dried soils, etc. The study concluded that if a farmer had a choice of packer roller configuration, he could assemble a disc unit best suited to the tasks of a particular farm. Based on the analysis, the study proposed that local manufacturers consider expanding the range of optional rollers to improve the competitiveness of their products in the domestic market and better serve farmers' diverse needs.

Keywords: disc harrow, disc tiller, packer roller, Terradisc, tillage quality, versatility, compaction, crumbling

For citation: Terekhin M.A. Analysis of the design features of disc harrow rollers. AgroEcoEngineering. 2026;1(126):129-145. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-129-144>

Введение. Дисковые бороны в настоящее время являются неотъемлемой частью парка почвообрабатывающих машин фермерских хозяйств и агрохолдингов. Они предназначены для поверхностной и предпосевной обработки почвы, подавления сорняков, измельчения и заделки в почву растительных остатков, включая стерню толстостебельных культур. Высокие эксплуатационные и качественные показатели работы делают дисковые агрегаты незаменимыми и в линейке машин механизированных технологий возделывания зерновых культур по классической и минимальной технологиям [1].

Эффективность технологического процесса предпосевной обработки почвы дисковыми агрегатами в значительной степени определяется конструкцией устанавливаемого в задней части машины пассивного прикатывающего катка, который

обеспечивает интенсивное измельчение почвенных комков, выравнивание поверхности поля и обратное уплотнение верхнего слоя почвы. В современных почвообрабатывающих машинах применяется большое количество конфигураций прикатывающих и почвоуплотнительных катков, основными из которых являются спиральные шлейф-катки, планчатые, трубчатые, кольчато-шпоровые, уплотнительные кольцевые с U и V-профилем колец и др. [2]. Конструктивное исполнение катка главным образом оказывает влияние на такие качественные показатели работы агрегата, как глыбистость, гребнистость, выровненность поверхности, степень уплотнения почвы и др. Кроме качественных показателей обработки почвы конфигурация катка влияет на склонность налипания почвы на его поверхность, что определяет возможность работы агрегата по почвам высокой влажности, несущую способность, определяющую возможность использования катка в качестве опорного устройства агрегата для регулировки глубины обработки почвы дисковыми рабочими органами, а также удельное сопротивление машины.

Исследование рынка дисковых почвообрабатывающих машин производства российских компаний ОАО «Белагромаш-Сервис имени В.М. Рязанова» [3], ООО «БДМ-Агро», АО «Производственная компания «Ярославич»», «Solar Fields», ООО «Агро», ГК «Радогост-Маш», ООО «Агромеханика», АО «Белинсксельмаш» и др. позволило выявить их одну особенность – в конструкциях дисковых борон, независимо от ширины захвата, способа агрегатирования, количества рядов дисковых рабочих органов и способа их установки на раме агрегата применяются преимущественно два типа прикатывающих катков – спиральный шлейф-каток и планчатый каток [4]. Анализ конструкций дисковых борон моделей БД-3,2х2П, БДП-4х4М (рис. 1), БДМ-4х4ПМ, БДМ-4,5х3П (рис. 2) и их аналогов показывает, что производители сделали осознанный выбор в пользу наиболее универсальных конструкций прикатывающих катков, рассчитанных на применение в различных агротехнических условиях [5].

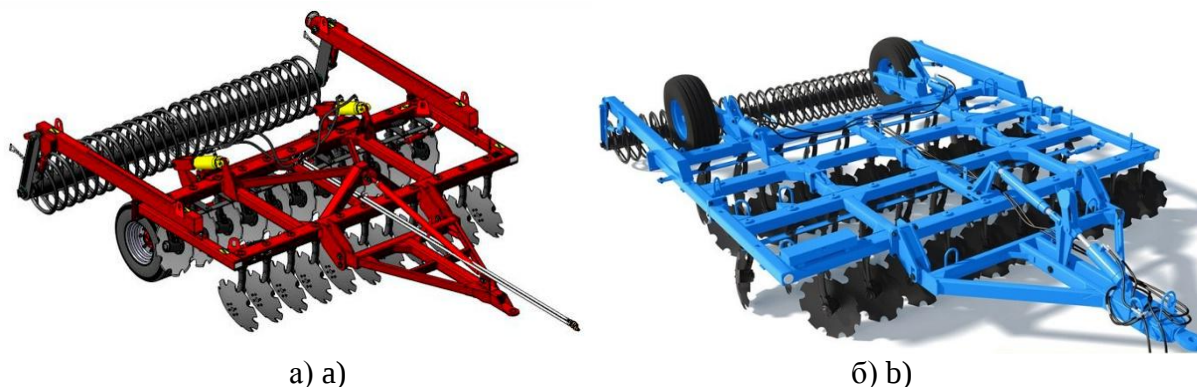


Рис. 1. Общий вид дисковых борон отечественного производства, оснащенных спиральным шлейф-катком:

a) – БД-3,2х2П; б) – БДП-4х4М

Fig. 1. General view of domestically produced disc harrows equipped with a spiral tine roller:

a) – BD-3,2x2P; b) – BDP-4x4M

Данное техническое решение, на наш взгляд, обусловлено стремлением производителей к повышению степени унификации производимых изделий и снижению себестоимости их производства.

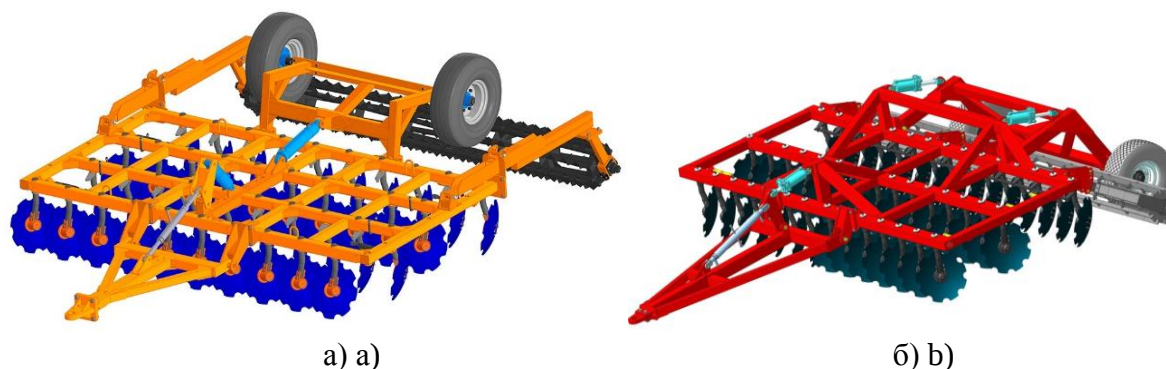


Рис. 2. Общий вид дисковых борон отечественного производства, оснащенных планчатым катком:

а) – БДМ-4х4ПМ; б) – БДМ-4,5х3П

Fig. 2. General view of domestically produced disc harrows equipped with a slatted roller:

a) – BDM-4x4PM; b) – BDM-4,5x3P

Однако, как показывает опыт, универсальные конструкции рабочих органов всегда являются компромиссом. Это относится и к конструкциям планчатых и спиральных шлейф-катков, применение которых в специфических условиях, например при обработке тяжелых пересушенных, чрезмерно липких, переувлажненных почв и т.д. не будет оптимальным^{17, 18, 19}.

Совершенно иной подход к производству и продвижению своей продукции демонстрируют ведущие зарубежные производители сельскохозяйственной техники, такие как Kverneland, Amazone, Lemken, Horsch, Pöttinger²⁰, Kuhn, Bednar²¹, Farmet²² и др. Анализ конструкций дисковых борон производства стран Западной Европы говорит о том, что производители демонстрируют гибкость и предлагают оснащение каждого из агрегатов несколькими вариантами прикатывающих катков. Так, например, агрегаты Lemken Rubin^{23, 24} опционально могут оснащаться 11 вариантами катков, обеспечивающих оптимальные показатели качества обработки почвы в зависимости от типа почвы и ее физико-механических характеристик, Amazone Catros – 5 вариантами катков [6, 7], Kverneland Qualidisc – 6 вариантами катков, Horsch Joker²⁵ – 7 вариантами, включая комбинированный каток, в конструкцию которого интегрирована пружинная борона [8]. Такой же целевой

¹⁷ Результаты испытания дисковых борон и дискаторов ФГБУ «Северо-Кавказская МИС» за 2011...2022 годы [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://skmis.ru/test/test_result/teh_ek_pokasateli_p_o_mashin.html (дата обращения 20.01.2026)

¹⁸ Протокол периодических испытаний бороны дисковой БДМ-3х4П: протокол № 07-128-2015 (5020822). Новокубанск: Кубанская МИС. 2015. 31 с. URL: https://kubmis.ru/wp-content/uploads/2021/03/borona_diskovaya_bdm-3h4.pdf

¹⁹ Протокол испытаний бороны дисковой БДП-4х3М: протокол № 01-29-12 (2020062). Пospelиха: Алтайская МИС. 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://agrotechnika-yug.ru/wp-content/uploads/2024/08/protokol-priemochnyh-ispytaniy-borona-diskovaya-dana-bdp-3%C3%974_compressed.pdf (дата обращения 20.01.2026)

²⁰ Короткобазовые прицепные складные дисковые бороны TERRADISC [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.pottinger.at/ru_ru/produkte/detail/disc/terrardisc-k# (дата обращения 21.01.2026)

²¹ Disc Cultivators Swifterdisc XN, XO_F, XO_PROFI, XE, XE_PROFI, XE_MEGA. A fast and high quality stubble tillage solution. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.bednar.com/files/uploads/prospekty/en/swifterdisc_prospekt-2023_en_web.pdf (дата обращения 21.01.2026)

²² Operating manual Farmet Softer 4 P/4,5 PS/5 PS/6 PS. Jiřínková, Česká Skalice, CZ. 2012. 27 p.

²³ Operating Instructions Compact Disc Harrow Rubin 9 U + KU / EN. LEMKEN GmbH & Co. KG. 2011. 102 p.

²⁴ Ersatzteilliste Parts list Kurzscheibeneggen Rubin 9/600 KÜA. LEMKEN GmbH & Co. KG. 221 p.

²⁵ Инструкция по эксплуатации Joker 3-6 CT, Art.: 80741503. HORSCH Maschinen GmbH. 2014. 40 p.

подход к комплектованию катками реализован в дисковых боронах Pöttinger Terradisc²⁶ – покупателю предлагается на выбор 9 различных по функциональному назначению конфигураций катков [9]. Столь широкая номенклатура сменных/опциональных рабочих органов позволяет конечному потребителю выбрать почвообрабатывающий агрегат, максимально адаптированный к его конкретным задачам и условиям работы [10].

Ввиду такого разнообразия к подходам комплектования дисковых агрегатов прикатывающими катками между отечественными и зарубежными производителями, российские фермеры, имеющие в своем пользовании поля со специфическими по характеристикам почвами, вынуждены либо жертвовать качественными показателями их обработки, выполняя дискование агрегатами с универсальными планчатыми или спиральными шлейф-катками, либо обращаться к технике западного производства, выбирая конфигурацию модели дисковой бороны с узкоспециализированными прикатывающими катками, наиболее подходящими к их агротехническим задачам.

Цель работы – анализ конструктивных особенностей и технологического назначения прикатывающих катков дисковых почвообрабатывающих агрегатов. Для достижения поставленной цели необходимо провести детальный анализ прикатывающих катков дисковых борон, изучить функциональное назначение и определить рекомендуемые производителем условия для работы каждого типа катков, систематизировать полученные данные для более удобного сравнения их эксплуатационных особенностей и характеристик.

Материалы и методы. Методика исследований основана на техническом анализе конструктивных особенностей прикатывающих катков, устанавливаемых на дисковых боронах модельного ряда Terradisc производства фирмы Pöttinger. Анализ включает сравнение геометрических параметров катков, их удельного давления на почву, а также рекомендаций производителя по их применению в различных условиях.

Объект исследования: прикатывающие катки дисковых почвообрабатывающих агрегатов Terradisc.

Предмет исследования: конструктивные особенности, технические параметры, функциональное назначение и область применения прикатывающих катков дисковых почвообрабатывающих агрегатов.

Проведено сравнение 9 конфигураций прикатывающих катков дисковых борон Terradisc, а именно одинарного и tandemного трубчатых катков, режуще-кольцевого с V-профилем колец и режуще-прикатывающего катков, уплотняющих катков с отдельными резиновыми кольцами, с U-профилем колец, сегментно-конусных уплотняющих катков «Conoroll» в одинарном и tandemном исполнениях, а также маятниково-роторного катка.

Результаты исследований. При анализе модельного ряда дисковых борон Terradisc (рис. 3) было установлено, что данные агрегаты на выбор могут комплектоваться 9 типами прикатывающих катков, существенно отличающихся по конструкции, назначению и рекомендуемым условиям работы [9].

²⁶ Operating manual Disc harrow TERRADISC 8001 T / Machine No.: +...01001, 9740.en-G3 3QY.0. POTTINGER Landtechnik GmbH. 166 p.

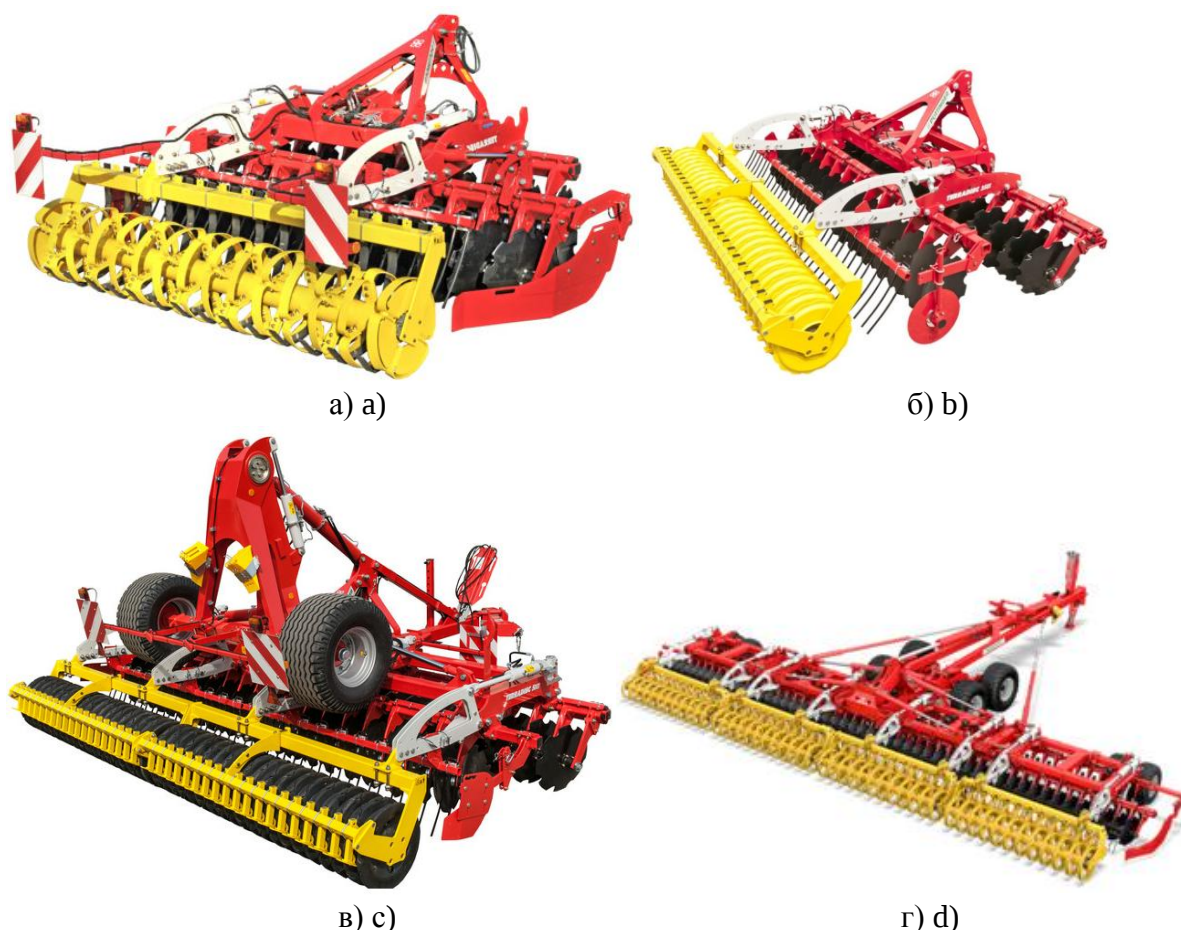


Рис. 3. Общий вид некоторых моделей дисковых борон Terradisc:

а) – модель 3001 в конфигурации с уплотняющим сегментно-конусным катком в одинарном исполнении; б) – модель 4001K в конфигурации с режуще-прикатывающим катком; в) – модель 5001T в конфигурации с уплотняющим катком с отдельными резиновыми кольцами; г) – модель 8001T в конфигурации с tandemным уплотняющим катком с U-профилем колец

Fig. 3. General view of some Terradisc disc harrow models:

a) – model 3001 in configuration with a single segment-cone compaction roller; b) – model 4001K in configuration with a cutting-pressing roller; c) – model 5001T in configuration with a compaction roller with individual rubber rings; d) – model 8001T in configuration with a tandem compaction roller with U-profile rings

Трубчатые катки являются наиболее простыми по конструкции среди всех катков, но при этом они достаточно универсальны. По своей конструкции они наиболее близки к планчатым каткам, устанавливаемым на агрегатах отечественного производства [4]. Производителями они рекомендуются для работы по всем типам почв, однако имеется ограничение на применение на почвах повышенной влажности. Трубчатый каток в одинарном исполнении состоит из рамы 1 (рис. 4а), на которой в подшипниковых опорах 2 с возможностью свободного вращения установлен сам каток, состоящий из ступиц 3, промежуточных колец 4 и трубчатых стержней 5. Каток диаметром 660 мм имеет 12 стержней диаметром 25 мм. Трубчатый каток в tandemном исполнении состоит из пары катков, установленных на кронштейнах 6 (рис. 4в), причем передний каток диаметром 540 мм имеет 11 стержней, а задний каток диаметром 420 мм – 9 стержней. Трубчатый каток в одинарном исполнении лучше адаптирован для работы на каменистых почвах, а каток

тандемного исполнения в свою очередь обеспечивает лучшее крошение почвенных комков. Схемы воздействия одинарного и тандемного трубчатых катков на почву представлены на рис. 4б и рис. 4г соответственно.

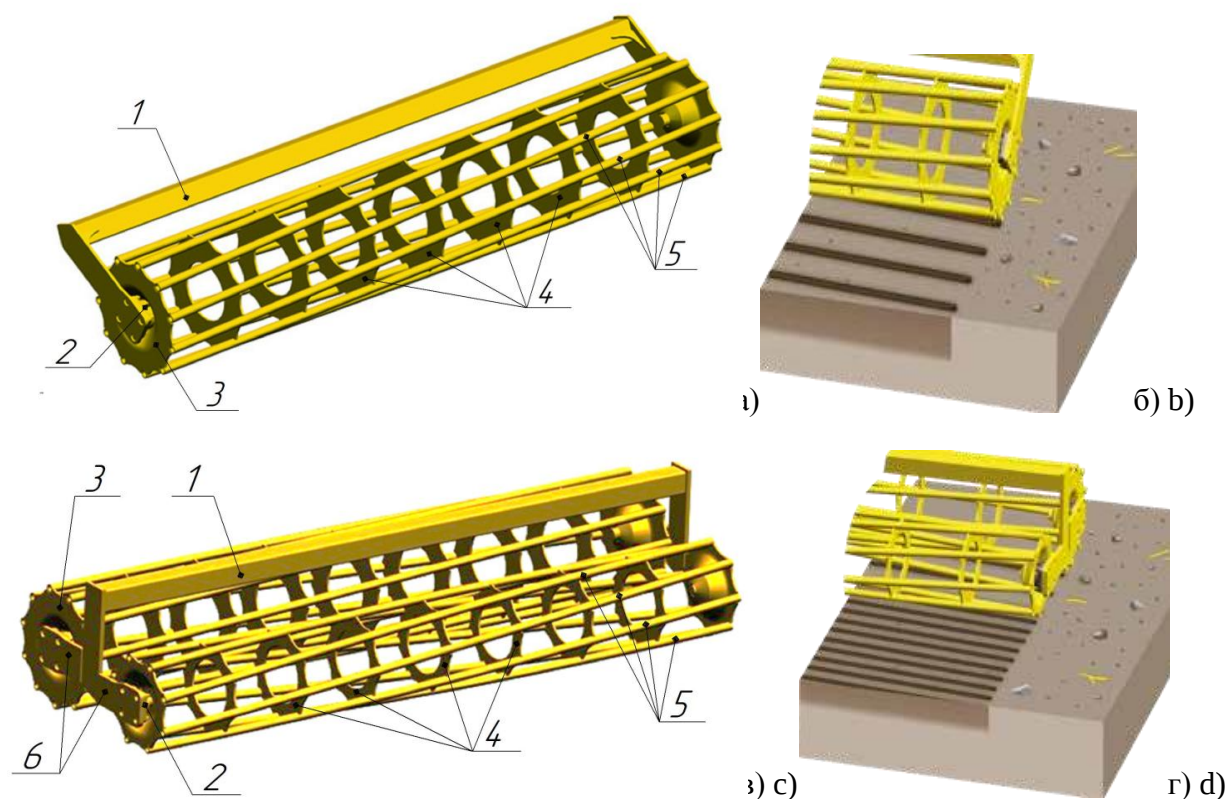


Рис. 4. Общее устройство трубчатого катка в одинарном (а) и тандемном (в) исполнениях и схемы их воздействия на почву (б, г):

1 – рама катка; 2 – узел подшипниковый; 3 – ступица; 4 – кольцо промежуточное;
5 – стержень трубчатый; 6 – кронштейн

Fig. 4. General design of the tubular roller in single (a) and tandem (c) versions and diagrams of their soil interaction (b, d):

1 – roller frame; 2 – bearing assembly; 3 – hub; 4 – intermediate ring;
5 – tubular rod; 6 – bracket

Режуще-кольцевой каток с V-профилем колец рекомендуется производителем для обработки тяжелых пересушенных почв [11]. Такой каток имеет диаметр 540 мм и состоит из оси 3 (рис. 5а), к которой с равным шагом прикреплены отдельные кольца 4. Каток монтируется на раме 1 в самоустанавливающихся подшипниковых узлах 2. К раме 1 посредством регулируемых кронштейнов 7 крепится брус 5, на котором установлены режущие ножи 6, предназначенные для измельчения комьев почвы, застрявших в полостях между кольцами 4. Малая площадь контакта с почвой колец V-профиля в сочетании со значительным значением удельного давления и наличием режущих ножей гарантирует измельчение почвенных комков большого размера и высокой твердости и обеспечивает полосовое уплотнение почвы (рис. 5б) после прохода дисковой бороны.

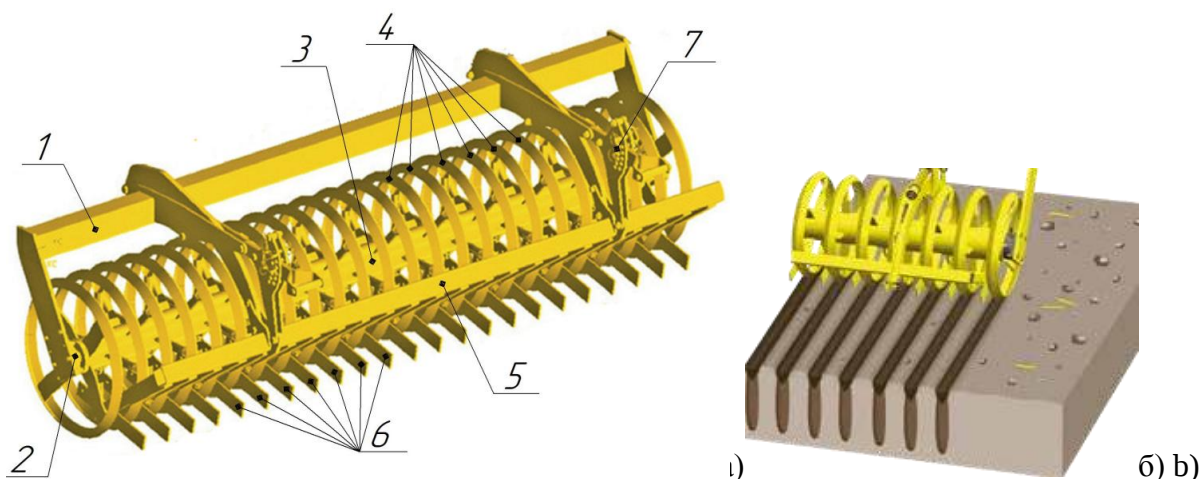


Рис. 5. Общее устройство режуще-кольцевого катка с V-профилем колец дисковой бороны Terradisc (а) и схема его воздействия на почву (б):

1 – рама катка; 2 – узел подшипниковый; 3 – ось; 4 – кольцо V-профиля;
5 – брус; 6 – нож режущий; 7 – кронштейн регулируемый

Fig. 5. General design of the cutting-ring roller with V-profile rings for the Terradisc disc harrows (a) and diagram of its soil interaction (b):

1 – roller frame; 2 – bearing assembly; 3 – axle; 4 – V-profile ring;
5 – beam; 6 – cutting knife; 7 – adjustable bracket

Близкое к рассмотренному выше катку назначение имеет режуще-прикатывающий каток, состоящий из рамы 1 (рис. 6а), на которой смонтирована батарея режущих дисков 2 диаметром 550 мм, причем на один погонный метр катка приходится 8 режущих колец 2. К раме 1 жестко крепится брус 3, на котором размещены чистики 4, обеспечивающие очистку междисковых зазоров от налипшей почвы и застрявших комков почвы. Этот каток является наиболее универсальным среди всех катков линейки агрегатов Terradisc, так как рекомендован для использования по всем типам почв, включая каменистые почвы и почвы с высоким содержанием пожнивных остатков. Он обеспечивает высокие показатели качества крошения почвы, производит полосовое уплотнение, что сохраняет воздухопроницаемость почвы и гарантирует хорошие условия для впитывания воды от выпадении осадков [12].

Уплотняющий каток с отдельными резиновыми кольцами имеет аналогичное устройство (рис. 6в), отличается от рассмотренной выше конструкции материалом, из которого изготовлены уплотняющие кольца 5, и профилем этих колец. Ввиду большей ширины профиля по сравнению с режуще-прикатывающим катком и диаметру 590 мм, уплотняющий каток с отдельными резиновыми кольцами за счет большей площади контакта с почвой оказывает меньшее удельное давление на почву, а значит обеспечивает лучшую несущую способность. Благодаря этому свойству он нашел наиболее широкое применение в конструкции тяжелых прицепных дисковых борон с отдельным колесным шасси моделей 5001Т, 6001Т и 8001Т, и обеспечивает данным тяжелым машинам дополнительную опору на почву и способствует более стабильной глубине обработки почвы их дисковыми рабочими органами. Схемы воздействия рассмотренных типов катков на почву представлены на рис. 6б и рис. 6г.

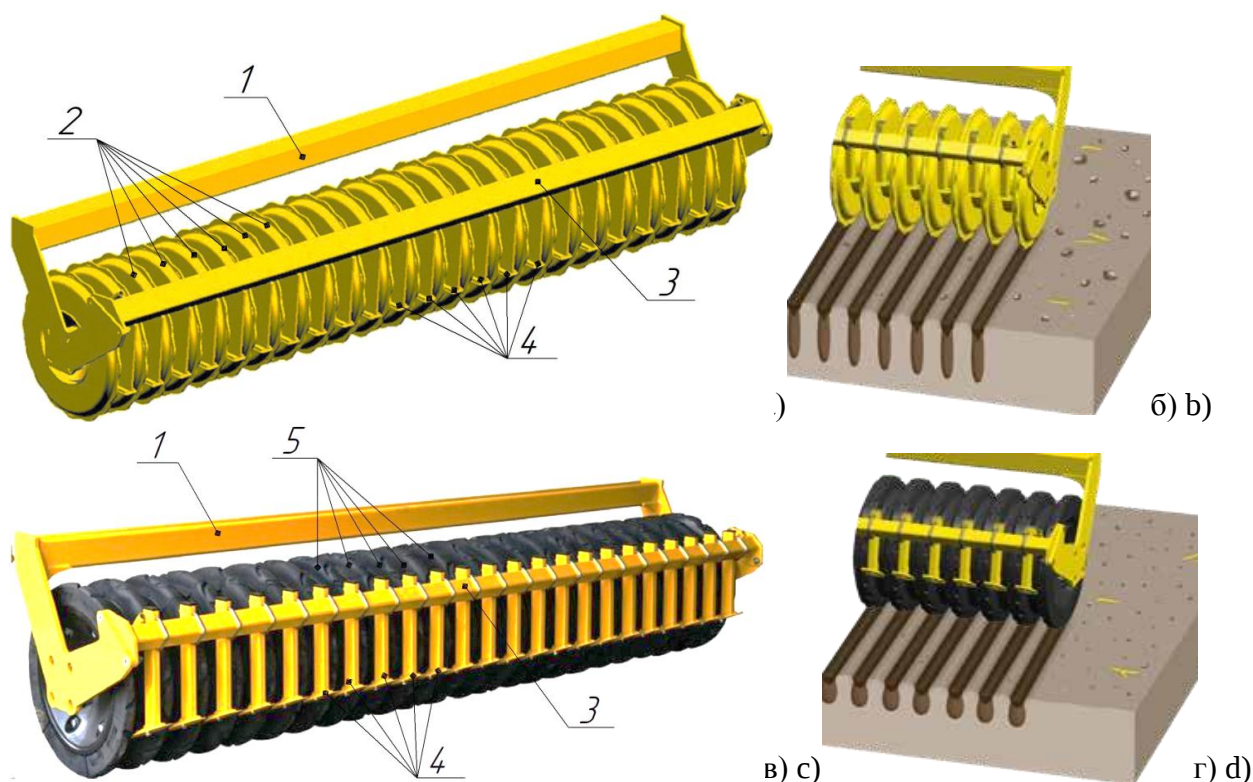


Рис. 6. Общее устройство режуще-прикатывающего катка (а), уплотняющего катка с отдельными резиновыми кольцами (в) дисковых борон Terradisc и схемы их воздействия на почву (б, г):

1 – рама катка; 2 – диск режущий; 3 – брус; 4 – чистик; 5 – кольцо резиновое

Fig. 6. General design of the cutting-pressing roller (a), compaction roller with individual rubber rings (c) for the Terradisc disc harrows and diagrams of their soil interaction (b, d):

1 – roller frame; 2 – cutting disc; 3 – beam; 4 – cleaner/scrapper; 5 – rubber ring

Сегментно-конусные тандемные «Tandem Conoroll» являются самыми инновационными в линейке агрегатов Terradisc. Такой каток содержит в своей конструкции раму 1 (рис. 7), на которой в подшипниковых узлах 2 установлены передний и задний катки, состоящие из центральной полой оси 3, к кронштейнам которой прикручены сегменты 4. Особенность сегментов состоит в том, что четыре скрученных сегмента образуют коническое кольцо диаметром 540 мм, большее основание которого повернуто поочередно вправо и влево. Передний и задний катки установлены на раме 1 таким образом, что сегментные кольца заднего катка расположены между кольцами катка переднего ряда. Стоит отметить, что крайние сегментные кольца переднего и заднего катков закрыты заглушками 5, защищающими подшипниковые узлы 2 от негативного воздействия почвы.

При перекапывании по обработанной почве конические сегменты уплотняют ее, образуя на поверхности поля борозды с переменным углублением правой и левой сторон (рис. 7 б, 7в), что способствует быстрому впитыванию дождевой воды, предотвращая эрозию почвы. Конструкция конических колец, составленных из сегментов, выполненных из листовой пружинной стали толщиной 8 мм, обеспечивает незначительные упругие деформации рабочих поверхностей при перекапывании по почве, что положительным образом сказывается на способности такого катка к самоочистке от налипшей почвы [13]. Сегментно-конусные одинарные катки «Conoroll» и тандемные «Tandem Conoroll» отличаются между собой наличием чистиков, осуществляющих очистку межкольцевых зазоров от камней (для одинарного исполнения они предусмотрены) и интенсивностью

воздействия конических колец на почву, так как количество конических сегментных колец на катке в тандемном исполнении в два раза больше, а удельное давление катка на почву больше только на 40%.

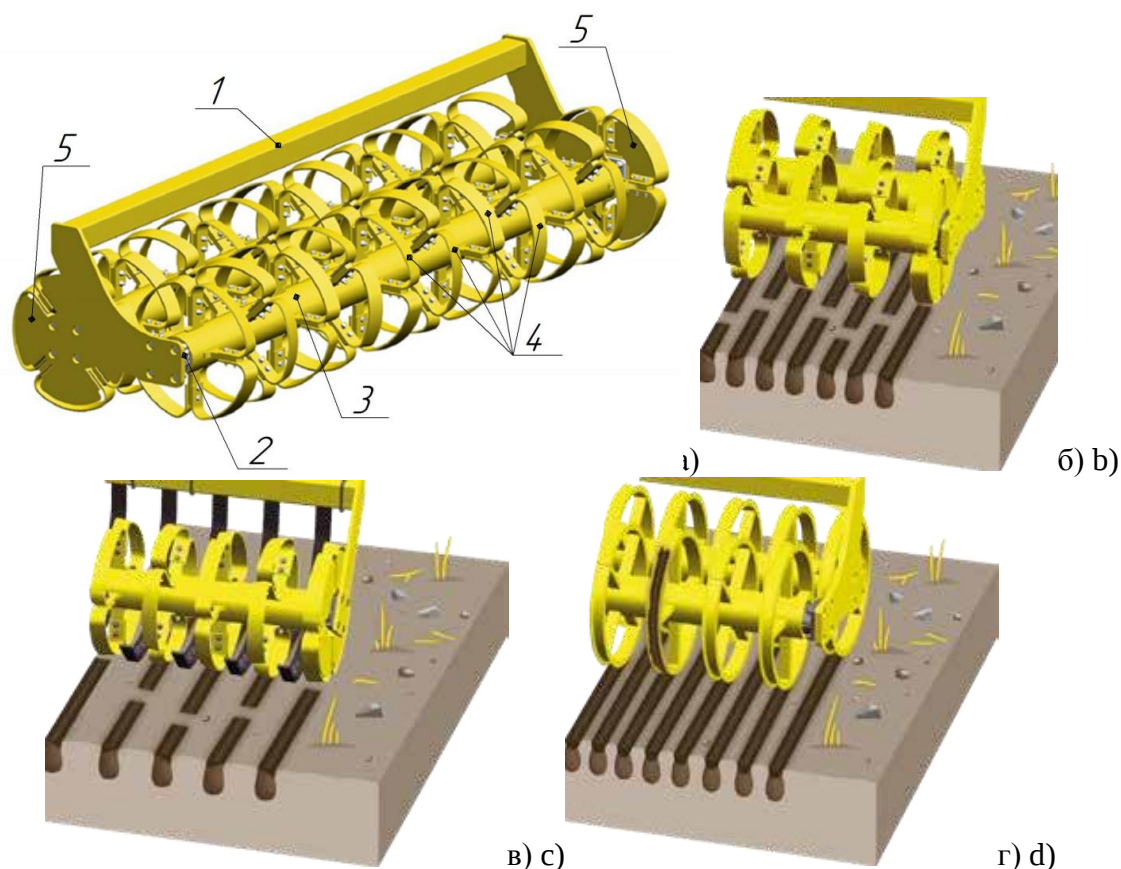


Рис. 7. Общее устройство тандемного сегментно-конусного катка «Tandem Conoroll» (а) и схемы воздействия на почву катков «Tandem Conoroll» (б), «Conoroll» (в) и тандемного уплотняющего катка с U-профилем колец (г):

1 – рама катка; 2 – узел подшипниковый; 3 – ось центральная;
4 – сегмент конический; 5 – заглушка

Fig. 7. General design of the tandem segment-cone roller “Tandem Conoroll” (a) and diagrams of soil interaction for the “Tandem Conoroll” (b), “Conoroll” (c) rollers and the tandem compaction roller with U-profile rings (d):

1 – roller frame; 2 – bearing assembly; 3 – central axle;
4 – conical segment; 5 – end cap

В отличие от конических сегментных колец, которые склонны к самоочистке от налипшей почвы, тандемный уплотняющий каток с U-профилем колец, схема воздействия на почву которого представлена на рис. 7г, наоборот, при работе во влажных условиях заполняется почвой. Это сделано умышленно, так как заполненный влажной липкой почвой U-профиль кольца обеспечивает более мягкое полосовое уплотнение за счет контакта «почва-почва» по сравнению с контактом «сталь-почва». Стоит отметить, что из-за более высокого коэффициента трения качения в паре «почва-почва» диаметр катка увеличен до 600 мм, чтобы обеспечить агрегату меньшее тяговое сопротивление. Степень уплотнения почвы таким катком соизмерима с уплотнением катком с отдельными резиновыми кольцами, обеспечивающим контакт «резина-почва». При работе в сухих условиях тандемный уплотняющий каток с U-профилем колец превосходно измельчает почвенные комья и

выравнивает поверхность почвы за счет малой площади контакта с почвой колец U-профиля в сочетании со значительным значением удельного давления [14].

Заключительным типом катка, предлагаемым производителем Pöttinger для установки на дисковые бороны линейки Terradisc, является маятниково-роторный каток. Он состоит из рамы 1 (рис. 8а), на которой шарнирно смонтированы балансиры 2 маятникового типа, к которым в свою очередь через подшипниковые опоры крепятся передний 3 и задний 4 роторы, выполненные в виде пустотелого цилиндра с острыми длинными зубьями 5. Передний 3 и задний 4 роторы установлены на балансирах 2 таким образом, что зубья 5 заднего ротора размещаются между зубьями переднего ротора. Ввиду высокого риска быть травмированным об острые длинные зубья 5 как во время работы, так и во время настройки, технического обслуживания и хранения дисковой бороны, в конструкции маятниково-роторного катка предусмотрено защитное ограждение 6.

Роторы 3 и 4 имеют условный диаметр по вершинам зубьев, равный 545 мм, при этом длина зубьев составляет 120 мм. При перекатывании по поверхности почвы маятниково-роторный каток очень интенсивно перемешивает почву, разрыхляя ее, при этом пожнивные остатки, находящиеся в почве, подхватываются зубьями и выносятся на поверхность (рис. 8б), защищая почву от пересыхания и ветровой эрозии. Кроме этой особенности рассматриваемый каток обладает еще одной, не менее значимой. За счет маятниковой конструкции балансиры 2 обеспечивают катку возможность копирования поперечного рельефа поверхности поля, что гарантирует одинаковую интенсивность обработки почвы зубьями переднего и заднего роторов.

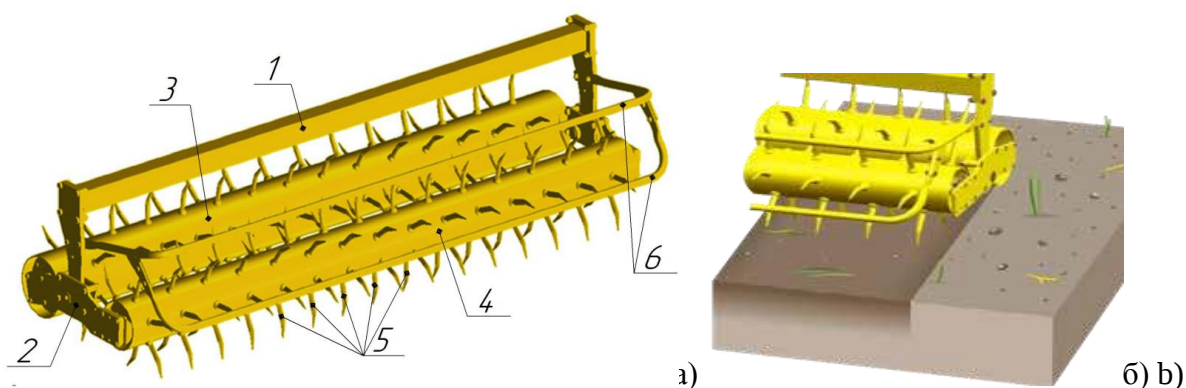


Рис. 8. Общее устройство tandemного маятниково-роторного катка (а) и схема его воздействия на почву (б):

1 – рама катка; 2 – балансир маятниковый; 3 – ротор передний;

4 – ротор задний; 5 – зуб; 6 – ограждение защитное

Fig. 8. General design of the tandem pendulum-rotor roller (a) and diagram of its soil interaction (b):

1 – roller frame; 2 – pendulum-type balance beam; 3 – front rotor;

4 – rear rotor; 5 – tooth; 6 – protective guard

На основании проведенного анализа конструктивных особенностей прикатывающих катков современных дисковых почвообрабатывающих агрегатов Terradisc, нами сделан вывод, что данным производителем сельскохозяйственной техники разработана широкая номенклатура сменных рабочих органов, что позволяет конечному потребителю в лице фермера осуществить выбор именно той модификации дисковой бороны, который будет наиболее адаптирован к его конкретным условиям и задачам. Прикатывающие катки в зависимости от конструкции и исполнения имеют и различные технические параметры, такие как диаметр и удельное давление на почву, а также и различное функциональное

назначение – рыхление верхнего слоя почвы, измельчение почвенных комков, полосовое обратное уплотнение и т.д. Также стоит отметить, что проведенный обзор не выявил возможность оснащения агрегатов линейки Terradisc прикатывающими планчатыми или спиральными шлейф-катками, которые у российских производителей дисковых борон наоборот получили самое широкое распространение.

Обсуждение. Технические параметры рассмотренных прикатывающих катков, а также оценка эффективности их работы по таким параметрам, как уплотнение почвы, измельчение почвенных комков, возможность работы по влажной или сухой почве, возможность применения на каменистой почве и несущая способность представлены в таблице. Стоит отметить, что разрабатываемые и исследуемые перспективные конструкции специализированных катков почвообрабатывающих агрегатов [12,15-18] могут значительно отличаться от рассмотренных прикатывающих катков как по конструктивному исполнению и назначению, так и по своим техническим параметрам.

Таблица. Сравнительные характеристики прикатывающих катков дисковых борон Terradisc
Table. Comparative characteristics of packing rollers of Terradisc disc harrows

Тип катка	Параметр и его значение								
	Диаметр	Удельное давление	Наличие	Уплотнение почвы	Работа по переувлажненной почве	Работа по пересушенной почве	Работа по каменистым	Измельчение почвенных	Несущая способность
Одинарный трубчатый	660	1100	нет	о	о	++	+	+	+
Тандемный трубчатый	540/420	1700	нет	о	о	++	о	++	++
Режущее-кольцевой с V-профилем колец	540	1400	да	+	о	++	-	++	+
Режущее-прикатывающий	550	2000	да	++	++	++	++	++	++
Уплотняющий с отдельными резиновыми кольцами	590	1900	да	++	о	++	о	++	++
Сегментно-Конусный «Conoroll»	540	1500	да	+	++	++	++	++	+
Сегментно-конусный «Tandem Conoroll»	540/540	2300	нет	++	+	++	++	++	++
Тандемный уплотняющий с U-профилем колец	600	2200	нет	++	+	++	+	+	++
Маятниково-роторный	545/545	1300	нет	-	о	+	-	++	+

Примечание: в таблице знак «++» означает «идеально подходит»; «+» – хорошо подходит; «о» – ограниченно подходит; «–» – не подходит. В столбце «Диаметр катка, мм» для tandemных катков указаны через знак дроби диаметр переднего/заднего катков.

Выводы. Рассмотренные прикатывающие катки дисковых борон Terradisc отличаются высоким разнообразием конструктивных особенностей, габаритно-массовыми характеристиками, и, как следствие, функциональным назначением. Такое разнообразие конструкций позволяет отнести катки дисковых борон Terradisc к разряду специализированных, рассчитанных на применение в конкретных почвенно-климатических условиях. Столь широкий выбор вариантов катков, предлагаемый производителем для одной линейки машин, является средством глобальной стратегии продаж фирмы Röttinger, направленной на адаптацию базовой модели почвообрабатывающей машины к значительно отличающимся агротехническим условиям различных стран и их отдельных регионов. На наш взгляд отечественным производителям дисковых почвообрабатывающих орудий целесообразно рассмотреть возможность расширения номенклатуры предлагаемых опционных прикатывающих катков для агрегатов своего производства, т.к. это значительно повысит их конкурентоспособность на внутреннем рынке почвообрабатывающей техники за счет возможности фермеров точно подбирать модификацию дискового агрегата под конкретные, зачастую специфические условия своих хозяйств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Илькив Н. Дисковая борона. Традиции и инновации земледелия // АгроФорум. 2021. № 7. С. 30-34. EDN: KQDJBJ
2. Припоров Е.В. Анализ дисковых агрегатов для поверхностной обработки почвы // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 5(15). С. 81-84. EDN: VJKEBJ
3. Рязанов В.М. Машины европейского уровня // Техника и оборудование для села. 2010. № 7. С. 12-13. EDN: MWGPXV
4. Терехин М.А., Яшин А.В., Хорев П.Н. Анализ конструкций катков почвообрабатывающих машин // Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства продукции растениеводства и животноводства: сб. ст. X Межд. науч.-практ. конф. (Пенза, 30-31 мая 2025 г.) Пенза: Пензенский ГАУ. 2025. С. 263-267. EDN: RCUTJP
5. Петровец В.Р., Шаповалов В.В. Исследование отечественных и зарубежных конструкций дисково-катковых почвообрабатывающих агрегатов // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2011. № 2. С. 128-134. EDN: ZSVMGR
6. Башкирев А.П., Коношин И.В., Булавинцев Р.А., Пулавцев И.Е. Особенности эксплуатации широкозахватной дисковой бороны Catros 7500 // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 8. С. 201-206. EDN: VQHNXY
7. Бухманн В.Е., Милюткин В.А., Толпекин С.А. Комплектация комбинированных почвообрабатывающих машин, на базе дисковых борон, прикатывающими катками // Техническое обеспечение технологий производства сельскохозяйственной продукции: сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. (Курган, 14 июня 2018 г.) / под общ. ред. С.Ф. Сухановой. Курган: Курганская ГСХА. 2018. С. 78-82. EDN: VAFPDN
8. Максutow Р.И., Яшин А.В., Хорев П.Н., Полывяный Ю.В. Анализ конструктивных особенностей дисковой бороны Joker 4 СТ // Региональные проблемы устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях цифровой трансформации: сб. ст. II Межд. науч.-

практ. конф. (Пенза, 28-29 апр. 2025 г.) Пенза: Пензенский ГАУ, 2025. С. 160-165. EDN: YFPRQHO

9. Фишер К. Универсальные «ромашки» // Новое сельское хозяйство. 2013. № 4. С. 98-101. EDN: QI WVUH

10. Алукаева Л.Э. Стратегия выхода иностранных компаний на российский рынок сельскохозяйственной техники (на примере «Pöttinger») // Маркетинговые стратегии компаний на рынках развитых и развивающихся стран: коллективная монография. М.: РУДН. 2013. С. 221-223. EDN: TGYA OV

11. Babitsky L.F., Moskalevich V.Yu., Ismailov Ya. N. Experimental results of the ring-cutting tillage roller // Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Saratov, 20-24 October 2021). London: IOP Publishing. 2022, 012083. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012083> EDN: TGNUPR

12. Соболевский И.В., Куклин В.А., Калафатов И.И., Голиков И.В., Исмаилов Я.Н. Обоснование параметров модернизированного планчатого почворежущего катка комбинированного агрегата // Таврический вестник аграрной науки. 2024. № 1(37). С. 149-157. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10930842> EDN: QWPICK

13. Kozachenko O., Aliiev E., Sedykh K. Results of investigation of the spring shank disc harrow performance // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2021. Vol. 83 (4). P. 123-140. EDN: QQSEAH

14. Демчук Е.В., Кем А.А., Мяло О.В., Мальцева Е.И. Конструктивные особенности дисковых борон «Ростсельмаш» // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2023. № 3(34). EDN: OJLFVP

15. Андержанова Н.Н., Юнусов Г.С., Майоров А.В. Параметры и режимы работы малогабаритного почвообрабатывающего агрегата с планчато-спиральным катком // Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2023. Т. 9. № 3(35). С. 255-263. <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-3-255-263> EDN: ACJXJD

16. Камбулов С.И., Пархоменко Г.Г., Семенихина Ю.А., Божко И.В. Использование мульчирующих катков в конструкции комбинированных почвообрабатывающих агрегатов // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 3(23). С. 113-121. <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-3-23-113-121>. EDN: VPMXAP

17. Андреев В.Л., Демшин С.Л., Ильичев В.В., Черемисинов Д.А., Юнусов Г.С. Многофункциональный почвообрабатывающий агрегат со сменными рабочими органами // Вестник НГИЭИ. 2018. № 11(90). С. 87-102. EDN: YQDNRR

18. Лепешкин Н.Д., Клыбик В.К., Мижурин В.В. К обоснованию типа катковых рабочих органов почвообрабатывающего агрегата для влагонакопления и влагозадержания на склоновых землях // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. Т. 55. Минск: Белорусская наука. 2022. С. 121-127. EDN: SIOICB

REFERENCES

1. Ilkiv N. Disk harrow. Traditions and innovations of arable agriculture. AgroForum = Agricultural Forum. 2021;7:30-34. (In Russ.) EDN: KQDJBJ

2. Priporov E.V. Analysis of disk units for surface tillage. Innovatsii v sel'skom khozyaistve = Innovations in Agriculture. 2015;5(15):81-84. (In Russ.) EDN: VJKEBJ

3. Ryazanov V.M. European class machines. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area. 2010;7:12-13. (In Russ.) EDN: MWGPXV
4. Terekhin M.A., Yashin A.V., Khorev P.N. Analysis of roller designs of soil cultivation machines. In: Resource-saving Technologies and Technical Means for the Production of Crop and Livestock Products. Proc. X Int. Sci. Prac. Conf. (Penza, May 30-31, 2025) Penza: Penza State Agricultural University. 2025: 263-267. (In Russ.) EDN: RCUTJP
5. Petrovets V.R., Shapovalov V.V. Investigation of domestic and foreign designs of disk-roller tillage units. Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy. 2011; 2:128-134. (In Russ.) EDN: ZSVMGR
6. Bashkirev A.P., Konoshin I.V., Bulavintsev R.A., Pupavtsev I.E. Operating features of the Catros 7500 wide-angle disc harrow. Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skoxozyajstvennoj akademii = Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy. 2018;8:201-206. (In Russ.) EDN: VQHNXY
7. Buxmann V.E., Milyutkin V.A., Tolpekin S.A. Complete set of combined tillage machines based on disc harrows with rolling rollers. In: Technical Support of Agricultural Production Technologies. Proc. II All-Russian Sci. Prac. Conf. (Kurgan, June 14, 2018). S.F. Sukhanov (ed.). Kurgan: Kurgan State Agricultural Academy. 2018:78-82. (In Russ.) EDN: VAFPDN
8. Maksutov R.I., Yashin A.V., Khorev P.N., Polyvany Yu.V. Analysis of design features of Joker 4 CT disc harrow. In: Regional Problems of Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex in the Context of Digital Transformation. Proc. II Int. Sci. Prac. Conf. (Penza, April 28-29, 2025) Penza: Penza State Agrarian University. 2025: 160-165. (In Russ.) EDN: YFPQHO
9. Fischer K. Universal “daisies”. Novoe sel'skoe khozyaistvo = New Agriculture. 2013;4:98-101. (In Russ.) EDN: QIWVUH
10. Alukayeva L.E. The strategy of entry of foreign companies into the Russian agricultural machinery market (using the example of Pöttinger). In: Marketing Strategies of Companies in the Markets of Developed and Developing Countries: a collective monograph. Moscow: RUDN. 201; 221-223. (In Russ.) EDN: TGYAOV
11. Babitsky L.F., Moskalevich V.Yu., Ismailov Ya. N. Experimental results of the ring-cutting tillage roller. In: Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Saratov, 20-24 October 2021). London: IOP Publishing. 2022, 012083. (In Eng.) <https://doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012083> EDN: TGNUPR
12. Sobolevsky I.V., Kuklin V.A., Kalafatov I.I., Golikov I.V., Ismailov Ya.N. Justification of the parameters of the upgraded planar soil-cutting roller of the combined unit. Tavricheskii vestnik agrarnoi nauki = Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2024;1(37):149-157. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.10930842> EDN: QWPICK
13. Kozachenko O., Aliiev E., Sedykh K. Results of investigation of the spring shank disc harrow performance. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2021;83 (4): 123-140. (In Eng.) EDN: QQSEAH
14. Demchuk E.V., Kem A.A., Myalo O.V., Maltseva E.I. Design features of Rostselmash disc harrows. Elektronnyi nauchno-metodicheskii zhurnal Omskogo GAU = Electronic Scientific and Methodological Journal of Omsk State Agrarian University. 2023;3(34). (In Russ.) EDN: OJLFVP
15. Anderzhanova N.N., Yunusov G.S., Mayorov A.V. Parameters and operating modes of a small-sized tillage unit with a slat-spiral roller. Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sel'skokhozyaistvennye nauki. Ekonomicheskie nauki = Vestnik of Mari State University.

Chapter: Agriculture. Economics. 2023;9-3(35):255-263. (In Russ.) <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2023-9-3-255-263> EDN: ACJXJD

16. Kambulov S.I., Parkhomenko G.G., Semenikhina Yu.A., Bozhko I.V. Use of mulching rollers designed for a combined tillage unit. Tavrisheskii vestnik agrarnoi nauki = Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2020;3(23):113-121. (In Russ.) <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-3-23-113-121>. EDN: VPMXAP

17. Andreev V.L., Dyomshin S.L., Ilyichev V.V., Cheremisinov D.A., Yunusov G.S. Multifunctional soil-cultivating unit with replaceable working bodies. Vestnik NGIEI = Bulletin of Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. 2018;11(90):87-102. (In Russ.) EDN: YQDNRR

18. Lepeshkin N.D., Klybik V.K., Mizhurin V.V. To justification of the type of roller working bodies of the tillage unit for moisture retention and water accumulation on slope lands. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstv. temat. sb. = Mechanization and Electrification of Agriculture: Interdepartmental Thematic Collection. Minsk: Belarusian Science. 2022; 55:121-127. (In Russ.) EDN: SIOICB

Об авторе:	About the author:
Терёхин Михаил Александрович канд. техн. наук, ведущий инженер конструкторского отделения по гражданской продукции АО «Радиозавод» 440039, г. Пенза, ул. Байдукова, д. 1, Россия m.a.terekhin@rf58.ru	Mikhail A. Terekhin Candidate of Technical Sciences, Leading Engineer of the Design Department for Civil Products of JSC Radiozavod 440039, Penza, Baidukova Str., 1, Russia m.a.terekhin@rf58.ru
Заявленный вклад авторов М.А. Терёхин – формулирование основных направлений исследования, цели и задач, анализ литературных источников для постановки цели, формальный анализ, проведение исследований, визуализация, создание черновика рукописи, окончательная версия (доработка) рукописи и ее редактирование, формулирование общих выводов.	Author contribution M. A. Terekhin - formulating the main directions of the research, goals and objectives, analyzing literary sources to set the goal, formal analysis, conducting research, visualization, creating a draft manuscript, the final version (revision) of the manuscript and its editing, formulating general conclusions.
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов в отношении публикации этой статьи	Conflict of interest The author declares no conflict of interest regarding the publication of this paper
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации.	The author has read and agreed to the manuscript version for publication.
Статья поступила в редакцию: 15.01.2026	Received: 15.01.2026
Одобрена после рецензирования: 29.01.2026	Approved after reviewing: 29.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026

РАЗДЕЛ 3. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 631.86

DOI 10.24412/2713-2641-2026-1126-145-154

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Александр Юрьевич Брюханов¹, Александр Сергеевич Романов², Павел Викторович Белов³

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

¹sznii@yandex.ru, [https:// orcid.org/0000-0003-4963-3821](https://orcid.org/0000-0003-4963-3821)

²alarm.romanoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6604-5735>

³steelaxiom@gmail.com

Аннотация. Одной из наиболее актуальных проблем на сегодняшний день является переработка органических отходов, которые образуются в сельскохозяйственном производстве, лесопарковом хозяйстве, предприятиях по хранению и переработки фруктов и овощей и т.д. Среди известных способов переработки органических отходов наиболее эффективной технологией является биоферментация, которая предъявляет серьезные требования к параметрам исходного сырья: влажности, соотношения углерода к азоту, плотности, кислотности, воздухопроницаемости. Для достижения рекомендуемых значений данных параметров необходимо создавать смесь, состоящую из различных по физико-механическим свойствам и составу компонентов, ввиду чего возникает необходимость равномерного распределения компонентов смеси между собой. Добиться этого можно путем разработки и применения оборудования по смешиванию компонентов смеси. Цель исследования – подготовить теоретическое обоснование для расчета конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов. В результате ранее проведенного анализа технологий и технических средств для смешивания компонентов сыпучих смесей была предложена схема экспериментального образца ленточного двуправленного одновального стационарного смесителя горизонтального типа. Для обеспечения непрерывной работы лабораторной биоферментационной установки подобраны параметры смесителя органических отходов. Рассчитаны параметры внутреннего и внешнего шнеков: скорость осевого перемещения материала внешним и внутренним шнеками 0,2 м/с; шаг навивки внешнего и внутреннего шнеков 0,4 м; подача шнеков 30 т/ч; угол наклона винтовой линии внешнего шнека 12°; угол наклона винтовой линии внутреннего шнека 18°. Необходимая мощность электродвигателя для привода вала составила не менее 4 кВт. Окончательный выбор конструктивно-технологических параметров смесителя планируется сделать после проведения экспериментальных исследований процесса смешивания органических отходов. По результатам исследований можно выявить рациональные параметры и режимы работы смесителя. При этом критериями оптимизации будут коэффициент неоднородности смеси и удельная энергоемкость процесса смешивания.

Ключевые слова: экологическая безопасность, технологии переработки, биоферментация, органические отходы, смешивание, методика расчета

Для цитирования: Брюханов А.Ю., Романов А.С., Белов П.В. Теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 1(126) С. 145-154. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-145-154>

Research article

Universal Decimal Code 631.86

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF AN ORGANIC WASTE MIXER

Aleksandr Yu. Briukhanov¹, Alexander S. Romanov², Pavel V. Belov³

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) –branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

¹sznii@yandex.ru, [https:// orcid.org/0000-0003-4963-3821](https://orcid.org/0000-0003-4963-3821)

²alarm.romanoff@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6604-5735>

³steelaxiom@gmail.com

Abstract. One of the most pressing challenges today is to process the organic waste generated in agriculture, aesthetic forestry, and fruit and vegetable storage and processing industries. Among known methods of organic waste processing, fermentation is considered the most effective. However, this technology imposes strict requirements for the initial material parameters, including moisture content, carbon-to-nitrogen ratio, density, acidity, and air permeability. Achieving the recommended values requires creating a homogeneous mixture of components with diverse physical, mechanical, and compositional properties – a process that demands specialized equipment. This study aims to justify in theory the calculation of design and operational parameters for an organic waste mixer. Based on an analysis of existing technologies and equipment for bulk mixture blending, we propose a prototype of a belt stationary, horizontal, single-shaft mixer with bi-directional mixing capability. The mixer parameters were selected to ensure continuous operation of a laboratory-scale fermenter. Key calculated parameters for the internal and external screws include: an axial material transfer speed of 0.2 m/s for both screws; a helix pitch of 0.4 m; a feed capacity of 30 t/h; helix angles of 12° for the outer screw and 18° for the inner screw; and a required motor power of 4 kW to drive the shaft. Final design and operational parameters will be refined following experimental validation. The results enable the identification of optimal parameters and operating modes for the mixer. Optimization will be based on two criteria: the mixture heterogeneity coefficient and the specific energy consumption of the mixing process.

Key words: environmental safety, processing technologies, fermentation, organic waste, mixing, calculation methods

For citation: Briukhanov A. Yu., Romanov A.S., Belov P.V. Theoretical substantiation of the design and technological parameters of an organic waste mixer. *AgroEcoEngineering*. 2026;1(126):145-154. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-1126-145-154>

Введение. Актуальной проблемой на сегодняшний день является переработка органических отходов, которые образуются в сельскохозяйственном производстве, лесопарковом хозяйстве, предприятиях по хранению и переработки фруктов и овощей и т.д. Ежегодно в Ленинградской области только от отраслей птицеводства и лесопаркового хозяйства, учреждений общепита и овощебаз образуется более 2 млн. тонн органических отходов. При этом, за исключением куриного помета, органическая масса направляется на полигоны ТБО и ТКО, создавая большую нагрузку на окружающую среду. С учетом долгосрочной перспективы развития природоохранного регулирования, предусмотрен постепенный ввод запрета на вывоз органических отходов на полигоны. Необходимо будет создавать систему, инфраструктуру и технико-технологическое обеспечение для переработки органических отходов в полезные продукты и вовлечение их в хозяйственный оборот согласно принципам экономики замкнутого цикла [1-3].

К наиболее эффективным методам переработки органических отходов относится биоферментация с получением высокоэффективных органических удобрений и плодородных грунтов. Для реализации этого метода имеется ряд технологий, обеспечивающих протекание процесса биоферментации с помощью различного оборудования и специализированных объектов [2-4]. Однако существуют базовые требования, которые необходимо соблюдать при любом технологическом варианте реализации процесса биоферментации. В первую очередь к ним относятся параметры исходного сырья [5-6]: влажность, соотношение углерода к азоту, плотность, кислотность, воздухопроницаемость. Основные требования к смеси заключаются в параметрах влажности (50-70%) и соотношения углерода к азоту (15/1-25/1). Для достижения этих параметров необходимо создать смесь, состоящую из компонентов с различными физико-механическими свойствами и составом. Особенностью переработки методом биоферментации является принудительное аэрирование смеси с целью создания оптимальных условий для жизнедеятельности микроорганизмов в смеси, которые непосредственно влияют на ход процесса биоферментации. Чтобы обеспечить равномерный саморазогрев смеси и уменьшить количество анаэробных зон в ней, необходимо равномерно распределить компоненты смеси между собой и обеспечить оптимальные значения вышеприведенных параметров. Этого можно достичь, используя специальное оборудование для подготовки и смешивания компонентов смеси. Таким образом, смешивание органических отходов является важным подготовительным этапом их переработки методом биоферментации [7].

Ранее проводились исследования, направленные на повышение качества процесса смешивания за счет его интенсификации путем определения рациональных значений угла наклона перемешивающих элементов [8], путем применения различных форм рабочих камер, а также уникальной двухкамерной системы, включающей в себя смесительную камеру и отдельную разгрузочную камеру [9]. Были обоснованы параметры смесителя с тремя ленточными шнеками для смешивания кормов [10].

Особенностью смеси органических отходов для биоферментации является то, что отдельные компоненты органических отходов могут иметь большой диапазон физико-химических показателей, особенно по влажности и плотности, что накладывает ряд ограничений по выбору обоснованных другими исследователями параметров смесителей, а также должно учитываться при обосновании конструктивных особенностей оборудования для подготовки смеси с необходимыми для биоферментации параметрами.

Цель работы – подготовить теоретическое обоснование для расчета конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов.

Материалы и методы. В результате проведенного анализа технологий и технических средств для смешивания компонентов сыпучих смесей была предложена концепция ленточного смесителя, позволяющего смешивать различные виды материалов и являющегося наименее энергозатратным по сравнению с аналогами [7-11]. Для смешивания органических отходов с последующей их переработкой в биоферментаторе разработана 3D-модель экспериментального образца ленточного двунаправленного одновального стационарного смесителя горизонтального типа (рис. 1), состоящего из рамы 1, мотор-редуктора 2, вала со шнеками 3, бункера 4, крышки 5, задвижки 6.

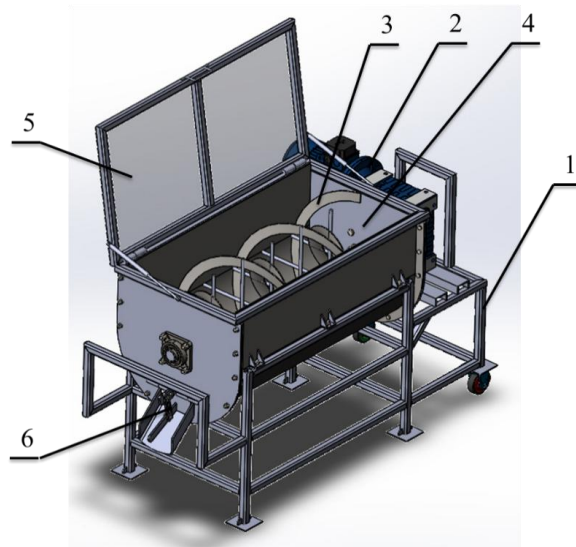


Рис. 1. 3D-модель экспериментального образца ленточного двунаправленного одновального стационарного смесителя горизонтального типа:

1 – рама; 2 – мотор-редуктор; 3 – вал со шнеками; 4 – корпус; 5 – крышка; 6 – задвижка

Fig.1. 3D model of a prototype of a belt horizontal bi-directional single-shaft stationary mixer:

1 – frame; 2 – gear motor; 3 – shaft with screws; 4 – body; 5 – lid; 6 – gate valve

Принцип действия данного смесителя основан на разнонаправленной навивке спиральных лент наружного и внутреннего шнека. При вращении вала создаются разнонаправленные потоки, что обеспечивает равномерное смешение компонентов смеси (рис. 2)²⁷.

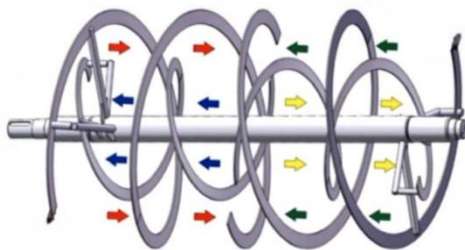


Рис. 2. Вал смесителя с разнонаправленными лентами

Fig. 2. Mixer shaft with multidirectional belts

²⁷Обеззараживатель сыпучих компонентов SMUF [Электронный ресурс]. URL: <https://satom.ru/p/1341066171-obezzarazhivatel-sypuchih-komponentov-smuf/> (дата обращения 23.01.2026)

Для теоретического обоснования расчета конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов за основу были приняты методики [10] с учетом данных, полученных в результате анализа литературных источников и рекомендаций производителей смесителей. Основной задачей теоретического расчета является определение ширины разнонаправленных лент, обеспечивающих соблюдение баланса между конструктивными параметрами шнеков: шаг винта, угол наклона винтовой линии, беря во внимание одинаковую подачу разнонаправленных внутреннего и внешнего шнеков смеси.

Результаты. В качестве исходных данных было принято, что расчет будет вестись для обеспечения непрерывной работы лабораторной биоферментационной установки, требующей ежесуточной загрузки $0,3 \text{ м}^3$ смеси органических отходов [7].

Масса смешиваемой смеси, кг:

$$M = V \cdot \rho \quad (1)$$

где $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ – плотность смеси.

Производительность смесителя, т/ч:

$$q = 0,06 \cdot \frac{M}{t} \cdot \gamma_1 \quad (2)$$

где $t = 15$ мин – время рабочего цикла смешивания, включающего в себя загрузку, смешивание, выгрузку;

$\gamma_1 = 0,75$ – коэффициент загрузки смесителя.

Проведем расчет наружного и внутреннего шнеков смесителя.

Угловая скорость вала винта ω , с^{-1} :

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (3)$$

где $n = 30$ об/мин – частота вращения вала винта.

Скорость осевого перемещения материала внешним шнеком v , м/с:

$$v_1 = \frac{sn}{60} \quad (4)$$

где $s_1 = 0,2$ м – шаг винта внешнего шнека.

Определим подачу шнека смесителя Q , т/ч:

$$Q = 900\pi v(D^2 - d^2)\psi\rho c_0 \quad (5)$$

где d – диаметр внутренней кромки шнека, м;

ψ – коэффициент заполнения межвиткового пространства;

c_0 – коэффициент, учитывающий просачивание материала между корпусом, материалом и винтовой поверхностью.

Коэффициент заполнения межвиткового пространства, зависящий от числа оборотов n и угла наклона шнека β ;

$$\psi = (1 - 0,0006 \cdot n) \cdot (1 - 0,0005 \cdot \beta) \quad (6)$$

Подача внутреннего шнека смесителя будет равна подаче внешнего шнека смесителя для равномерного смешивания материала. Данное условие обеспечивается двумя способами: разным шагом навивки внутреннего и внешнего шнеков, который зависит от скорости осевого перемещения материала, либо разной шириной лент навивки внутреннего и внешнего шнеков при одинаковом шаге навивки.

Скорость осевого перемещения материала внутренним шнеком v_2 определяется по формуле 5.

Шаг винта внутреннего шнека s_2 , м:

$$s_2 = \frac{60v_2}{n} \quad (7)$$

Угол поворота слоя материала в сторону вращения шнека:

$$\phi' = \arctg(f_2 \cdot \tg(\alpha + \rho_1)) \quad (8)$$

где f_2 – коэффициент трения материала о стальную поверхность корпуса при движении;

α – угол подъема винтовой нитки шнека по наружной кромке;

ρ_1 – угол трения материала по стальной поверхности шнека в движении.

Угол наклона винтовой линии:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{s}{\pi D}\right) \quad (9)$$

Угол трения материала по стальной поверхности шнека в движении:

$$\rho_1 = \arctg f_1 \quad (10)$$

где f_1 – коэффициент трения материала о стальную поверхность шнека при движении;

Мощность на валу шнека N_0 , необходимая для работы смесителя, затрачивается на:

- преодоление сил инерции, возникающих при изменении скорости движения материала N_1 :

$$N_1 = \frac{Q \cdot v^2}{270 \cdot g} \quad (11)$$

где $g=9,8$ м/с – ускорение свободного падения

- преодоление силы трения материала о внутреннюю поверхность смесителя N_2 :

$$N_2 = \frac{F_k \cdot v}{750} = \frac{f_2 \cdot \left(\frac{G \cdot \omega_2^2 \cdot D_0}{2 \cdot g} + G \cdot \cos \beta \cdot \cos \phi' \right) \cdot v}{750} \quad (12)$$

где G – вес материала, Н; ω_2 – угловая скорость смешиваемого материала, с⁻¹; D_0 – диаметр окружности, проходящей через центр давления груза на поверхность шнека, м.

- преодоление силы трения материала о винтовую поверхность шнека и перемещение материала вдоль оси винта N_3 :

$$N_3 = \frac{(\omega - \omega_2)}{1500} (G \cdot \sin \beta \cdot \tg(\alpha_0 + \rho_1) \cdot D_0 + F_k \cdot \sin \theta \cdot \tg(\alpha_0 + \rho_1) \cdot D) \quad (13)$$

$$\alpha_0 = \arctg\left(\frac{s}{\pi D_0}\right)$$

где β – угол наклона оси шнека к горизонту, град; θ – угол подъема винтовой линии, по которой движется материальная точка, град; α_0 – угол подъема винтовой линии, проходящей через центр давления материала на поверхность шнека, град.

Мощность на валу для каждого шнека:

$$N_0 = \frac{(N_1 + N_2 + N_3) \cdot k_0}{\eta_n} \quad (14)$$

где k_0 – коэффициент, учитывающий защемление и дробление груза; η_n – к.п.д. подшипников вала шнека.

Общая мощность на валу шнека:

$$N_{ш} = N_{01} + N_{02} \quad (15)$$

где N_{01} , N_{02} – мощность, необходимая на привод внешнего и внутреннего шнека соответственно.

Мощность электродвигателя:

$$N = \frac{K \cdot N_{ш}}{\eta} \quad (16)$$

где: $K=1,3$ – коэффициент запаса мощности;

$\eta=0,8$ – КПД привода.

Обсуждение. Расчет проводился в программе Excel. По результатам расчета получили следующие данные, представленные в таблице.

Таблица. Результаты расчетов конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов

Table. Calculation results of design and technological parameters of an organic waste mixer

Параметр	Значение
Масса смешиваемой смеси	195 кг
Производительность смесителя	0,6 т/ч
Угловая скорость вала винта ω	3,14 с ⁻¹
Скорость осевого перемещения материала внешним шнеком v_1	0,2 м/с
Скорость осевого перемещения материала внутренним шнеком v_2	0,2 м/с
Подача шнека смесителя Q	30 т/ч
Шаг винта внешнего шнека S_1	0,4 м
Шаг винта внутреннего шнека S_2	0,4 м
Угол наклона винтовой линии внешнего шнека α_1	12°
Угол наклона винтовой линии внутреннего шнека α_2	18°
Мощность электродвигателя N	4 кВт

По результатам расчета конструктивно-технологических параметров смесителя органических отходов были выявлены значения ширины ленты (ширина ленты внешнего шнека от 3 до 5 см при ширине ленты внутреннего шнека от 5 до 9 см), при которых соблюдался баланс между конструктивными параметрами шнеков (шаг винта, угол наклона винтовой линии), принимая во внимание одинаковую подачу смеси разнонаправленными внутренним и внешним шнеками.

Окончательный выбор конструктивно-технологических параметров можно сделать, проведя экспериментальные исследования процесса смешивания органических отходов. По результатам исследований можно выявить оптимальные параметры и режимы работы смесителя. Критериями оптимизации будут являться коэффициент неоднородности смеси и удельная энергоемкость процесса смешивания.

Выводы. Таким образом, по предварительно выбранным исходным данным для обеспечения непрерывной работы лабораторной биоферментационной установки, подобраны параметры смесителя органических отходов. Рассчитаны параметры внутреннего и внешнего шнеков: скорость осевого перемещения материала внешним v_1 и внутренним v_2 шнеками 0,2 м/с; шаг навивки внешнего S_1 и внутреннего S_2 шнеков 0,4 м; подача шнеков 30 т/ч; угол наклона винтовой линии внешнего шнека $\alpha_1=12^\circ$; угол наклона винтовой линии внутреннего шнека $\alpha_2=18^\circ$. С учетом сил инерции, возникающих при изменении скорости движения материала, сил трения материала о внутреннюю поверхность смесителя и о винтовую поверхность шнека рассчитана необходимая мощность электродвигателя для привода вала N , которая составила 4 кВт. Выявлены значения ширины ленты (ширина ленты внешнего шнека от 3 до 5 см при ширине ленты внутреннего шнека от 5 до 9 см), при которых соблюдается

баланс между конструктивными параметрами шнеков. Окончательный выбор конструктивно-технологических параметров можно сделать, проведя экспериментальные исследования процесса смешивания органических отходов. По результатам исследований можно выявить рациональные параметры и режимы работы смесителя. Критериями оптимизации будут являться коэффициент неоднородности смеси и удельная энергоёмкость процесса смешивания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романов А.С., Васильев Э.В. Анализ интенсивных технологий переработки побочных продуктов животноводства с внедрением альтернативных источников энергии // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 4(48). С. 90-97. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-90> EDN: TZJNNS
2. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Анализ технологий переработки отходов животноводства в различных природно-климатических условиях России // АгроЭкоИнженерия. 2023. № 3(116). С. 110-124. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>
3. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Уваров Р.А. Методы экологически безопасного использования навоза и помета фермерскими хозяйствами в Ленинградской области // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3 (108). С. 128-140 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-128-140>
4. Фисунова Л.В., Вишневская А.В. Анализ возможностей утилизации и переработки сельскохозяйственных отходов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5(97). С. 232-236. EDN: NBLYUV
5. Агапкин А.М., Махотина И.А. Переработка сельскохозяйственных отходов: рынок органических удобрений и производство органических пищевых продуктов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. № 3. С. 212-225. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.221>
6. Шалавина Е.В., Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Уваров Р.А., Валге А.М. Биоферментация органических отходов свиноводческого комплекса в установке барабанного типа // Аграрная наука. 2020. № 6. С. 51-56. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56>
7. Васильев Э.В., Романов А.С., Белов П.В. Анализ технологий и технических средств смешивания органических компонентов для биоферментации // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 2 (123). С. 129-143. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-2123-129-143>
8. Ведищев С.М., Завржнов А.И., Прохоров А.В., Ложкина Е.Б. Обзор и анализ конструкций смесительных устройств // Наука в центральной России. 2022. № 58 (4). С. 91-101. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-91-101>
9. Благоев Д. А., Митрофанов С. В., Панферов Н. С., Мельничук Д. С. Технические особенности кормосмесителей для приготовления полнорационного рациона // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 107–111. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp107-111>
10. Савиных П.А., Турубанов Н.В., Зырянов Д.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров ленточного смесителя // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2015. № 3(19). С. 76-80. EDN: VCGRZN
11. Ульянов В. М., Паршина М. В., Батирова В. А. Производительность двухспирального смесителя концентрированных кормов // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 3(55). С. 46-55. EDN: XNUMTU

REFERENCES

1. Romanov A.S., Vasiliev E.V. Analysis of intensive technologies for processing by-products of animal husbandry with the introduction of alternative energy sources. *Tekhnika i Tekhnologii v Zhivotnovodstve* = Machinery and Technologies in Livestock. 2022; 4(48): 90-97. (In Russ.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-90> EDN: TZJNNS
2. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of technologies for processing animal waste in different natural and climatic conditions of Russia. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2023;3(116):110-124 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2023-3116-110-123>
3. Shalavina E.V., Vasilev E. V., Uvarov R.A. Methods for environmentally safe use of animal/poultry manure on private farms in the Leningrad Region. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2021;3(108):128-140 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-128-140>
4. Fisunova L.V., Vishnevskaya A.V. Analysis of the possibilities of utilization and processing of agricultural waste. *Izvestiya OGAU* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2022;5(97):232-236 (In Russ.) EDN: NBLYUV
5. Agapkin A.M., Makhotina I.A. Agricultural waste processing: organic fertilizer market and organic food production. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2021;(3):212-225. (In Russ.) <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.221>
6. Shalavina E.V., Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Uvarov R.A., Valge A.M. Biofermentation of organic waste from a pig-breeding complex in a drum-type installation *Agrarnaya nauka* = Agrarian Science. 2020;339(6):51-56 (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2020-339-6-51-56>
7. Vasilev E.V. Romanov A.S., Belov P.V. Analysis of technologies, machines and equipment for mixing organic components for fermentation. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2025;2(123):129-143 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-2123-129-143>
8. Vedishchev S.M., Zavrazhnov A.I., Prokhorov A.V., Lozhkina E.B. Overview and analysis of mixing device designs. *Nauka v tsentral'noi Rossii* = Science in the Central Russia. 2022;58(4):91-101. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-91-101>
9. Blagov D.A., Mitrofanov S.V., Panforyov N.S., Mel'nichuk D.S. Technical features of feed mixers for the preparation of a fully mixed diet. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2021;12:107-111 (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp107-111>
10. Savinykh P.A., Turubanov N.V., Zyryanov D.A. Substantiation of the design and technological parameters of the belt mixer. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva* = Bulletin of the All-Russian Research Institute of Mechanization of Animal Husbandry. 2015; 3(19):76-80 (In Russ.) EDN: VCGRZN
11. Ulyanov V.M., Parshina M.V., Batirova V.A. Productivity of a double spiral mixer for concentrated feeds. *Vestnik agrarnoi nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2021;3(55):46-55. (In Russ.) EDN: XNUMTU

Об авторах	About the authors
Брюханов Александр Юрьевич д-р техн. наук, доцент, академик РАН, директор Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства	Aleksandr Yu. Briukhanov DSc (Engineering), Assistant Professor, Full Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production

(ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3 sznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821	(IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia sznii@yandex.ru ORCID: 0000-0003-4963-3821
Романов Александр Сергеевич младший научный сотрудник, отдел анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3 alarm.romanoff@yandex.ru ORCID: 0009-0004-6604-5735	Alexander S. Romanov junior researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia alarm.romanoff@yandex.ru ORCID: 0009-0004-6604-5735
Белов Павел Викторович аспирант, отдел анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3 steelaxiom@gmail.com	Pavel V. Belov post-graduate student, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia steelaxiom@gmail.com
Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность.	Authors' contribution All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The authors declare no conflict of interest regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрил окончательный вариант рукописи к публикации	The authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 03.10.2025	Received: 03.10.2025
Одобрена после рецензирования: 21.01.2026	Approved after reviewing: 21.01.2026
Принята к публикации: 03.02.2026	Accepted for publication: 03.02.2026