

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Павлюшин В.А. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем – необходимое условие для устойчивого растениеводства.....	5
Симонов Г.А., Тяпугин Е.А., Никифоров В.Е., Старковский Б.Н., Симонов А.Г. Разработка механизированного технологического процесса получения посадочного материала кипрея узколистного.....	26
Бызов В.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Литвяк В.В. Технология производства сушеного топинамбура.....	38
Рахимов И.Р., Ялалетдинов Д.А., Сулейманов А.И., Васько А.А. Теоретическое обоснование длины прицепного устройства чизельного орудия с подачей в рабочие органы пульсирующего сжатого воздуха.....	53
Тарасова С.В., Ожегов Н.М. Экспериментальное исследование способа стабилизации движения машинно-тракторного агрегата на базе БЕЛАРУС-952.3 с КРН-5,6В.....	66

РАЗДЕЛ 2. ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ В АПК

Кондратьева О.В. Методологические основы систематизации цифровых технологий в сельском хозяйстве.....	76
Рожков Е.А., Джалагония С.Г. Применение оптико-электронных методов контроля и управления микроклиматом теплицы.....	89
Сафиуллин Р.Н., Пеплер А.Э., Гасс И.А., Караваев Н.А. Структурная модель системы контроля и прогнозирования технического состояния транспортных средств в режиме реального времени.....	102
Гутман В.Н., Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Повышение энергетической безопасности Республики Беларусь на основе комплексного развития и интеграции возобновляемых источников энергии.....	116
Слинько О.В. Опыт кластеризации производства органической продукции.....	136

РАЗДЕЛ 3. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Михайленко И.И., Мещеряков О.Д., Литвинов А.И. Аугментация датасетов в машинном обучении при решении задач животноводства.....	145
Хлопунов Н.Д., Васильев Э.В. Анализ технологий и технических средств рекуперации тепловой энергии вытяжного воздуха при аэробной переработке твердого навоза в биоферментационной установке барабанного типа.....	154

CONTENTS

SECTION 1. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN CROP GROWING

Pavlyushin V.A. Phytosanitary safety of agroecosystems is a necessary condition for sustainable crop production.....	5
Simonov G.A., Tyapugin E.A., Nikiforov V.E., Starkovsky B.N., Simonov A.G. Development of a mechanized technological process for obtaining planting material for fireweed.....	26
Byzov V.A., Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Litvyak V.V. Technology for producing dried Jerusalem artichoke.....	38
Rakhimov I.R., Yalaletdinov D.A., Suleimanov A.I., Vas'ko A.A. Theoretical justification of the trailing device length of a chisel implement with pulsating compressed air supply to the working elements.....	53
Tarasova S. V., Ozhegov N. M. Experimental study of a method for stabilizing the movement of a BELARUS-952.3 tractor and KRN-5.6V cultivator unit.....	66

SECTION 2. DIGITAL SYSTEMS, ENERGY EFFICIENCY AND ECOLOGY IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX.....

Kondratieva O.V. Methodological basis for systematization of digital technologies in agriculture.....	76
Rozhkov E.A., Jalagonia S. G. Implementation of optoelectronic technologies for greenhouse environment monitoring and control.....	89
Safiullin R.N., Pepler A.E., Gass I.A., Karavaev N.A. Structural model of a system for monitoring and prediction of vehicle operational status in real time.....	102
Gutman V.N., Plaksin I.E., Trifanov A.V. Improving the energy security of the Republic of Belarus on the basis of comprehensive development and integration of renewable energy sources.....	116
Slinko O.V. Experience in organic production clusters.....	136

SECTION 3. ECOLOGY AND TECHNOLOGY IN LIVESTOCK FARMING

Mikhailenko I.I., Meshcheryakov O.D., Litvinov A.I. Datasets augmentation in machine learning for solving dairy farming problems.....	145
Khlopunov N.D. , Vasilev E.V. Analysis of technologies and equipment for recovering the thermal energy of exhaust air in aerobic digestion of solid manure in a drum fermenter.....	154

РАЗДЕЛ 1. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

Аналитическая статья

УДК 632.913/911.4/.95:631.95

DOI 10.24412/2713-2641-2026-2127-5-25

ФИТОСАНИТАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АГРОЭКОСИСТЕМ – НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАСТЕНИЕВОДСТВА

Владимир Алексеевич Павлюшин

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений (ВИЗР), Санкт-Петербург, Россия

vpavlyushin@vizr.spb.ru; ORCID: 0000-0002-4727-8750

Аннотация. В научно-производственных опытах на полевом исследовательском стационаре в Белгородской области ФГБНУ ВИЗР – ООО «Агробиотехнология» и на опытных полях бывшего ФГБНУ СибНИИЗХим (ныне Сибирский ФНЦ агробиотехнологий РАН; лесостепь Приобья) в 2021-2023 гг. осуществлена оценка защитных биопрепаратов против возбудителей болезней в системах химической, интегрированной и биологической защиты на пшенице, ячмене, сое и кукурузе. Набор биопрепаратов на основе антагонистов состоял из стернифага, СП, 80 г/га; витаплана, СП, 20 г/г; трихоцина, СП, 20 г/т и алирина-Б, Ж, 3 л/га. В варианте интегрированной защиты озимой пшеницы в условиях Белгородской области стернифаг эффективно снижал фитопатогенную инфекцию на растительных остатках в почве. Препарат на основе гриба *Trichoderma harzianum*, витаплан (основа – 2 штамма *Bacillus subtilis*) снижал внутрисеменную и поверхностную инфекцию на семенах озимой пшеницы, а также корневые гнили. Биопрепарат алирин-Б (основа – отселектированный штамм *B.subtilis*) эффективен против септориоза и пиренофороза. На стадии колошения пшеницы витаплан поражал мучнистую росу. Сравнительная оценка пестицидной нагрузки по сельскохозяйственным культурам выглядела так: в варианте химической защиты на озимой пшенице нагрузка составила 0,937 кг д.в. химических препаратов/га; на сое – 2,340 кг д.в./га; на ячмене яровом – 0,545 кг д.в./га; на кукурузе – 4,610 кг д.в./га. В случае интегрированной защиты, где фунгициды были заменены защитными биопрепаратами, картина изменилась: на озимой пшенице пестицидная нагрузка понизилась до 0,645 кг д.в./га; на ячмене яровом понижение составило 0,381 кг д.в./га; на сое – 2,190 кг д.в./га; на кукурузе – 4,28 кг д.в./га. В варианте «биологическая защита» использовались только защитные биопрепараты против болезней, а фитофаги поражались химическими пестицидами: на озимой пшенице пестицидная нагрузка составила 0,217 защитными биопрепаратами; на ячмене яровом – 0,167 кг д.в./га; на сое – 2,135 кг д.в./га; на кукурузе – 4,05 кг д.в. химических препаратов/га. Таким образом, в системах интегрированной и биологической защиты происходит значительное снижение пестицидной химической защиты соответственно на 30-70% в случае озимой пшеницы и 7-12% на кукурузе. В целом биоресурсная часть, включающая устойчивые сорта, ассортимент средств защиты (2200, в том числе 55 защитных биопрепаратов), накопленные материалы по пестицидной нагрузке, публикации по обозначенной теме, – указывает на дальнейшее развитие концепции фитосанитарной оптимизации агроэкосистем, а также новой парадигмы,

нацеленной на долговременную регуляцию вредоносных объектов, создание новых зональных систем интегрированной защиты, модернизацию систем химической и биологической защиты сельскохозяйственных культур. Обозначены параметры решения узловых технологических задач в растениеводстве, а именно гарантированная прибавка урожая хорошего качества и достижение достаточного уровня экологической безопасности в агроэкосистемах.

Ключевые слова: новая парадигма защиты растений, зональные системы интегрированной защиты сельскохозяйственных культур, пестицидная нагрузка, полевой исследовательский стационар

Для цитирования: Павлюшин В.А. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем – необходимое условие для устойчивого растениеводства // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2 (126). С. 5-26 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-5-25>

Scientific review

Universal Decimal Code 632.913/.911.4/.95:631.95

PHYTOSANITARY SAFETY OF AGROECOSYSTEMS AS A NECESSARY CONDITION FOR SUSTAINABLE CROP PRODUCTION

Vladimir A. Pavlyushin

All-Russian Research Institute of Plant Protection (VIZR), Saint Petersburg, Russia
vapavlyushin@vizr.spb.ru; ORCID: 0000-0002-4727-8750

Abstract. Phytosanitary safety of agroecosystems is a key prerequisite for sustainable crop production under current environmental and climatic challenges. In 2021–2023, field experiments were conducted in the Belgorod Region (European Russia) and in the forest-steppe zone of Western Siberia to evaluate biological plant protection products within chemical, integrated, and biological protection systems for winter wheat, spring barley, soybean, and maize. The study aimed to assess the effectiveness of antagonist-based biological products and their contribution to reducing pesticide load while maintaining crop health. The biological products tested included Sternifag (80 g/ha), Vitaplan (20 g/t), Trichocin (20 g/t), and Alirin-B (3 L/ha), formulated with antagonistic microorganisms such as *Trichoderma harzianum* and *Bacillus subtilis*. In the integrated protection system for winter wheat, Sternifag significantly reduced phytopathogenic infection on plant residues in soil. Vitaplan effectively suppressed seed-borne and surface infections and reduced root rot incidence. Alirin-B demonstrated high efficacy against *Septoria* leaf blotch and *Pyrenophora* leaf spot, while Vitaplan also reduced powdery mildew development at the heading stage. A comparative assessment of pesticide load demonstrated substantial differences among protection systems. Under conventional chemical protection, pesticide load reached 0.937 kg active ingredient (a.i.)/ha for winter wheat, 0.545 kg a.i./ha for spring barley, 2.340 kg a.i./ha for soybean, and 4.610 kg a.i./ha for maize. In the integrated system, where chemical fungicides were partially replaced by biological products, pesticide load decreased to 0.645 kg a.i./ha for winter wheat and 0.381 kg a.i./ha for barley, while reductions for soybean and maize were more moderate (2.190 and 4.28 kg a.i./ha, respectively). In the biological protection variant, where diseases were controlled using biological products and insect pests were controlled with chemicals, the pesticide load was further

reduced, particularly in cereals (0.217 kg a.i./ha for winter wheat and 0.167 kg a.i./ha for barley). Overall, integrated and biological protection systems reduced chemical pesticide input by 30-70% in winter wheat and by 7-12% in maize, confirming their environmental and agronomic advantages. These findings support the concept of phytosanitary optimization of agroecosystems, aimed at long-term regulation of harmful organisms, reduction of chemical pressure, and improvement of ecological sustainability. The broader bioresource framework includes resistant crop varieties, an extensive range of plant protection products (over 2,200 registered products, including 55 biological formulations), and accumulated data on pesticide load dynamics. Future development should focus on scientific and technological phytosanitary forecasting, zonal adaptation of integrated and biological systems, climate-related risk monitoring (desertification, water deficit, temperature sums), and investigation of intraspecific variability of highly harmful pests and pathogens, including their genetic determinants. Special attention should also be given to soil phytosanitary status, suppressiveness dynamics, and the introduction of microbial antagonists. Accelerated breeding of climate-adapted, genetically resistant varieties and the development of multifunctional biological products remain strategic priorities. Economic and environmental assessment of zonal plant protection systems, particularly under increasing resistance of weeds, pests, and pathogens, is essential to ensure stable yield increases and ecological safety in agroecosystems.

Key words: new paradigm of plant protection, zonal systems of integrated crop protection, pesticide load, field research stations

For citation: Pavlyushin V.A. Phytosanitary safety of agroecosystems is a necessary condition for sustainable crop production. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 5-26 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-5-25>

Введение. Значимость фитосанитарного блока в сельском хозяйстве общеизвестна, но в последние годы она приобретает еще большее значение для растениеводства нашей страны из-за ускорения действия глобальных причин. Следует выделить наиболее значимые факторы: изменение климата, систем землепользования, дефицита органики в почвах [1, 2]. В РФ проблемы защиты растений обострились из-за экономического кризиса и имеют продолжающийся системный характер. Обозначились социально-экономические вызовы: из-за сорных растений, болезней, вредителей, действие которых усугубляется дефицитом минерального питания, недобор урожая, в отдельных регионах, зерновых, овощных и плодовых достиг угрожающих величин (30-40%) [3, 4].

Важнейшая особенность для научного обеспечения, равно как и для производственной службы защиты растений, состоит в том, что необходимо действовать в условиях последствий фитосанитарной дестабилизации в 90-х годах, о чем свидетельствуют материалы Всероссийских съездов по защите растений (1995, 2005, 2013, 2019 гг.). На повестке дня стоит вопрос об усилении процессов биологизации в фитосанитарных мероприятиях и масштабирования фитосанитарных обработок в агроэкосистемах [5, 6, 7]. Модернизированные зональные системы защиты будут малозатратными благодаря использованию биоценотической регуляции (биопрепараты, повышение супрессивности почв, комплексная устойчивость сортов и малотоксичные природоподобные действующие вещества), с учетом фитосанитарного проектирования агроэкосистем и полномасштабного применения средств защиты растений (СЗР). Всё это способствует снижению техногенного загрязнения, гарантированной прибавке урожая и снижению потерь в случае биологической опасности сельскохозяйственным угодьям (рис. 1).

- Недобор урожая из-за сорняков, болезней и фитофагов в зерновом эквиваленте составляет более 30 млн. тонн ежегодно, т.е. потеря более 350 млрд. рублей. Особо опасных видов более 40 (потеря урожая более 30%), экономически значимых 77 (недобор урожая до 30%).
- Фитопатогенные микроорганизмы снижают качество урожая и лежкость при хранении; потери 20-30%.
- Токсинная опасность: фитопатогенные грибы (более 40 видов) загрязняют с.-х. продукцию микотоксинами, опасными для человека и животных.
- Нарушение фитосанитарных технологий приводит к загрязнению почвы, воды и растительной продукции остаточными количествами пестицидов, снижению супрессивности. Экотоксикологическая нагрузка в интенсивном растениеводстве на зерновых, в промышленных садах, на картофеле, сахарной свекле достигает 17 кг д.в./га.
- Фитосанитарный и экотоксикологический мониторинг – незаменимый элемент в эффективности защитных мероприятий.
- Разработка новых зональных систем интегрированной защиты с.-х. культур, уровень систем машин и полевых приборов на всех этапах выращивания растений.

Рис. 1. Фитосанитарная безопасность агроэкосистем – необходимое условие для устойчивого растениеводства (основные проблемы)

Fig. 1. Phytosanitary safety of agroecosystems is a necessary condition for sustainable crop production (main problems)

Цель. Фитосанитарная оптимизация агроэкосистем с учетом особенностей новой парадигмы защиты растений, а также готовность новых систем интегрированной защиты сельскохозяйственных культур, эффективность научного обеспечения фитосанитарии.

Основная часть. В последние годы, начиная с 2015 года, в регионах товарного производства зерна (Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская, Белгородская, Воронежская области и др.) сборы урожая значительно повысились, что радует, но фитосанитарная обстановка остается сложной. Обозначенная положительная тенденция определяется новыми системами землепользования, формированием достаточного ассортимента средств защиты растений, характеризующегося наличием в его составе группы экологически малоопасных препаратов, в том числе и новых защитных биопрепаратов, а также разнообразием препаративных форм, появлением новых сортов с генетической устойчивостью [8-9, 10]. В целом по стране площадь фитосанитарных обработок по данным Россельхозцентра достигла внушительных величин 86-105 млн. га в пересчете на однократную обработку. В результате по отдельным особо опасным вредоносным объектам (бурая ржавчина пшеницы, головневые болезни зерновых, кукурузный мотылек) отчетливо проявляется депрессивное размножение. Очевидно, заметно сказывается накопленный технологический потенциал времен Россельхозакадемии. Однако, в 2025 году произошло снижение площадей, где осуществлялись фитосанитарные мероприятия; элементы стагнации коснулись и использования минеральных удобрений.

В ряде регионов продолжается проявление фитосанитарной дестабилизации применительно к группе особо опасных сорных растений (бодяк, осот, пырей и др.), вредных видов саранчовых, клопу вредной черепашке [11-15], фузариозов, отдельных видов карантинных объектов (мраморный клоп, бактериальный ожог плодовых и др.). Особая угроза таится в накоплении микотоксинов в зерне при поражении пшеницы, ячменя, ржи и других культур инфекцией.

Многолетний дефицит органики в почвах кардинально снижает супрессивность почвы. Так, по данным филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по Краснодарскому краю происходит угрожающее накопление патогенной микрофлоры, возбудителей гнилей, листовых пятнистостей, ежегодно фиксируется около 45 видов фитопатогенов [2]. Поскольку особо опасные виды могут приводить к потерям урожая свыше 30%, а опасные – до 30%, то целесообразно вернуться к вопросу официального утверждения перечней обозначенных групп фитосанитарных объектов. ВИЗР предложил такой список, включающий 43 вида сорняков, возбудителей болезней и фитофагов.

Безусловно, фитосанитарные риски зависят от систем землепользования:

-в экстенсивном растениеводстве с пониженным уровнем урожайности гарантированная защита урожая труднодостижима, а экологическая безопасность некардинальная, токсинная опасность высокая;

-в интенсивном растениеводстве прибавка урожая существенна; доля сохраненного урожая на зерновых увеличивается на 30-35%, на картофеле – на 60-70%. Однако возрастают риски пестицидного загрязнения по причине многократных обработок. Так, в интенсивных технологиях возделывания картофеля, сахарной свеклы, зерновых, промышленных садов количество обработок за сезон достигает 10-15 и более, что приводит к нарастанию экотоксикологической нагрузки на 1 га в пределах до 10-17 кг/га и появлению резистентных популяций [16]. То есть возникает проблема экологической безопасности в агроэкосистемах.

В органическом земледелии пока много деклараций, нормативная база недостаточная, сертификация не развита, а фитосанитарные риски высокие, то есть определяющие. Достижение стабилизации возможно только в условиях системных мер по управлению динамикой численности вредоносного состава и формирования эффективного паразитоценоза. В закрытом грунте активно используются средства биологической защиты овощных и декоративных культур (всего защитных биопрепаратов 55) [17]. Требуются новые системы биозащиты на основе управления динамикой численности вредных и полезных видов в теплицах. Таким образом, фитосанитарная безопасность – необходимое условие для устойчивого растениеводства (рис. 1).

Усиленная государственная поддержка сельского хозяйства позволяет говорить об улучшении фитосанитарной обстановки в течение 2020-2025 годов в части регионов. Это также связано с реализацией отраслевой научно-технической программы ОНТП РАСХН (2011-2015 гг.). В научном обеспечении защиты растений было приоритетным осуществление фитосанитарного оздоровления агроэкосистем, под которым понимается совокупность фитосанитарных, генетических, агротехнических и экономических мероприятий, направленных на срочную ликвидацию перенасыщения вредоносным составом агробиоценозов. Резко обозначилась трансформация экосистем по причине заброшенных земель, которые превратились в многолетние резерваты для сорняков, возбудителей болезней и фитофагов [11]. Усилиями ВИЗР, ВНИИФ, ФНЦ ВНИИБЗР, фирм-производителей средств защиты растений (АО Август, АО Щелково-Агрохим, Инновационного центра защиты растений и др.) выполнены объемные работы по формированию современного ассортимента средств защиты растений, насчитывающего 2200 препаратов и регламентов их применения [18-21], в том числе компании «Агробιοтехнология», которые совместно с ВИЗР разработали и провели государственные испытания 12 новых защитных биопрепаратов.

Новая парадигма защиты растений. Всё выше обозначенное подчеркивает многофакторность фитосанитарного блока и необходимость в усилении научного обеспечения и создания новых защитных технологий. Повышенные требования к защите растений на фоне нарастания техногенного загрязнения окружающей среды (рис. 2) акцентируют наше внимание на более полную реализацию концепции фитосанитарной оптимизации агроэкосистем, то есть имеется в виду, прежде всего, севооборотную площадь.

- Достижение оптимального видового и внутривидового биоразнообразия в агроценозах.
- Ослабление стрессовых трансформаций агроэкосистем.
- Оптимизация технологий возделывания сельскохозяйственных культур.
- Снижение селективного действия средств защиты растений на популяции вредных организмов.
- Рациональное соотношение химической, биологической и иммуногенетической защиты растений.
- Дистанционный мониторинг с учетом пространственной неоднородности распределения вредных объектов на участках поля.
- Роботизация и автоматизация технологических процессов по защите растений в системах точного земледелия.
- Мониторинг экологических последствий на агроэкосистемы и фитосанитарных рисков, в том числе супрессивность почв.
- Фитосанитарное проектирование агроэкосистем.
- Генетически устойчивые сорта к доминантным вредоносным объектам.

Рис. 2. Особенности новой парадигмы защиты растений
Fig. 2. Features of the new paradigm of plant protection

Ведущими учеными ВИЗР (К.В. Новожилов, Н.А. Вилкова, Г.И. Сухорученко и др.) с учетом многофакторности и разнообразия фитосанитарных объектов (более 450 видов), на фоне многолетней фитосанитарной дестабилизации в 90-е годы, предложены новые подходы в фитосанитарии как совокупность современных концепций по основным направлениям и базирующиеся на принципах управления динамикой численности [22, 23]. Основополагающей позицией новой парадигмы послужили представления об агробиоценозах как антропогенных монодоминантных системах, отличающихся от природных экосистем обеднением видового разнообразия биотрофов, укороченными цепями питания, особенностями взаимодействия между продуцентом и консументами, низкими динамическими свойствами, кардинальным изменением ядра доминантных видов консументов, особенностями отклика на экзогенные воздействия, в том числе и на антропогенное воздействие [24, 11]. Важно добиться долговременной регуляции численности вредителей, сорняков и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур без потери уровня плодородия почвы, что связано с ее супрессивностью. Технологические аспекты реализации указаны на рисунке 3 [6].



Примечание: агроэкосистема – совокупность сельскохозяйственных культур, вредоносного состава, паразитоценозов и других видов на земельной севооборотной площади.

ХСЗР – химическая система защиты растений

Рис. 3. Основные элементы технологий фитосанитарной оптимизации агроэкосистем
Fig. 3. Basic elements of technologies for phytosanitary optimization of agroecosystems

Современное интенсивное растениеводство характеризуется высокой стоимостью урожая, и его гарантированная защита становится ключевой задачей; в затронутой части преобладает доля минеральных удобрений. Одновременно растут требования экологической безопасности, что особенно значимо на фоне нарастания фитосанитарных рисков, вызванных глобализацией и изменениями климата [18, 19]. Так, в условиях Ленинградской области выявлено повреждение зерна озимой тритикале растительоядными клопами до 5%, что коррелировало с высокими дозами азотных удобрений [15].

Выше обозначенное необходимо учесть и реализовать при создании новых зональных систем интегрированной защиты сельскохозяйственных культур.

Новая парадигма предусматривает фитосанитарное проектирование агроэкосистем в границах севооборотной площади, под которым понимается оптимизация размещения сельскохозяйственных культур и их сортов с учетом их генетических признаков и локализации очагов особо опасных вредных видов и мест их зимовки, уровня супрессивности почв, разграничения полей близкородственных культур, розы ветров, соседства природных ценозов и лесополос. Более полный перечень элементов проектирования с учетом дистанционного зондирования сельскохозяйственных угодий представлен на рисунке 4.



Примечание: центральное значение в проектировании агроэкосистем имеет средообразующая роль сорта и его фотосинтетические показатели.

Рис. 4. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование
Fig. 4. Phytosanitary designing of agroecosystems and remote sensing

Биоресурсная часть перехода на новую парадигму обозначена в значительной мере разработками, выполненными в головной организации Всероссийском институте защиты растений (ВИЗР, Санкт-Петербург). Так, в течение 2021-2025 годов были разработаны регламенты применения и изучена биологическая эффективность более 80 пестицидов против опасных и особо опасных вредоносных объектов на посевах рапса, сои и других культурах. В целом ассортимент пестицидов насчитывает более 2200 препаратов, перечень действующих веществ приближается к 250, количество защитных биопрепаратов 55, эффективных для защиты растений от возбудителей болезней, вредителей. ВИЗР и Инновационный центр совместно с другими фирмами и НИИ в течение длительного времени успешно осуществляют работы по государственным испытаниям пестицидов. Для Северо-Западного региона и Центральной Черноземной зоны РФ предложены новые зональные системы защиты озимой ржи и пшеницы, тритикале, ячменя, рапса, картофеля и сои. Системы защиты прошли научно-производственную апробацию, утверждены Ученым советом ФГБНУ ВИЗР и опубликованы; разработаны и изданы «Рекомендации по оценке действия пестицидов на хищных и паразитических членистоногих, выпускаемых в защищенном грунте». В 2021 году опубликованы методические указания по контролю остаточных количеств пестицидов в пищевых продуктах, сельскохозяйственном сырье и в окружающей среде.

В течение обозначенного выше периода (2021-2025 гг.) пестицидная нагрузка была в интервале 0,14-0,17 кг д.в./га.

В современных условиях на фоне участвовавших инвазий значительно возрастает роль наземного и дистанционного мониторинга [25], сочетающего приемы классической и молекулярной диагностики, а также экотоксикологического мониторинга за персистентностью остатков пестицидов. Для получения объемной фитосанитарной информации о состоянии агроэкосистем необходимо учитывать около 600 показателей, что требует компьютерного моделирования и создания больших баз данных. Есть необходимость в расширении ассортимента малотоксичных инсектицидов, в том числе биопрепаратов, и активизации популяций энтомофагов. Применительно к саранчовым и клопам вредной черепашке целесообразно создавать искусственные инфекционные очаги в местах зимовки. В теплицах против интенсивно размножающихся видов насекомых-вредителей целесообразно создавать постоянно действующий паразитоценоз (комплекс энтомофагов и биопрепаратов). В отношении кукурузного мотылька и колорадского жука срабатывает генетическая защита сортов. Таким образом, новая парадигма в фитосанитарии фокусируется на управлении динамикой численности вредных объектов за счет технологической совокупности всех приемов и средств в новых системах защиты.

Гарантированная защита урожая и достижение экологической безопасности в агроэкосистемах определяется остатками пестицидов и уровнем систем защиты растений, а именно химической, интегрированной и биологической. Безусловно, средообразующий эффект в высшей степени определяется генетически устойчивыми сортами. На сегодняшний день их число представлено большей частью на зерновых (пшеница, ячмень и др.), картофеле, подсолнечнике.

В таблице 1 дана сравнительная оценка пестицидной нагрузки в зависимости от сельскохозяйственных культур, максимальная на кукурузе – 4,6 кг/га. Многолетнее преобладание химической защиты растений, что обеспечивало необходимый минимальный экономический эффект, по причине отсутствия достаточного охвата площадей сельскохозяйственных культур из-за нехватки биотехнологических производств и недостаточности ассортимента защитных биопрепаратов и видов массово разводимых энтомофагов, объясняет малый удельный вес биологической защиты.

Таблица 1. Сравнительная оценка пестицидной нагрузки в системах защиты (кг д.в. хим. пестицидов/га)

Table 1. Comparative assessment of pesticide load in protection systems (kg active ingredient of chemical pesticides/ha)

Культура	Биологическая защита	Интегрированная защита	Химическая защита
Пшеница	0,217 кг (↓77%)	0,645 кг (↓31%)	0,937
Ячмень яровой	0,167 кг (↓69%)	0,381 кг (↓30%)	0,545
Соя	2,135 кг (↓11%)	2,190 кг (↓6%)	2,340
Кукуруза	4,05 кг (↓12%)	4,28 кг (↓7%)	4,610

Примечание: 2021 г., полевой исследовательский стационар ВИЗР – ООО

«Агробиотехнология», Белгородская НИЛ ФГБНУ ВИЗР

Знак (↓77%) означает процент снижения д.в. химических пестицидов, в данном варианте в системе биологической защиты пшеницы

В последние десятилетия (2005-2020 гг.) в Белгородской области была принята и успешно реализовывалась программа биологизации, охватывающая всё региональное растениеводство, было сделана ставка и на снижение объема применения химических пестицидов. Строго соблюдались севообороты, выделялись значительные участки под

сидераты, практиковалось залужение, достаточно вносилась органика и компосты, чему способствовало массовое разведение крупного рогатого скота, свиней, высевались селекционные сорта пшеницы, ячменя, сои и кукурузы. Академик Жученко А.А. в своих работах постоянно обращал внимание на оптимальное сочетание растениеводства и животноводства, что поддерживало успешное конструирование агроэкосистем, плодородие почв и высокие урожаи [26]. Упомянутая программа биологизации в Белгородской области явилась основанием для организации полевого исследовательского стационара ВИЗР и ООО НИЦ «Агробιοтехнология». В 2015 году на заседании областного правительства под председательством губернатора Савченко Е.С. было принято решение о выделении 192 га земли в Шебекинском районе, где были развернуты НИР по полевым испытаниям 12 защитных биопрепаратов (Алирин, Гамаир, Стернифаг, Витаплан, Трихоцин и др.). Получены объемные материалы по включению биопрепаратов, которые успешно прошли государственные испытания, в системы биологической, химической и интегрированной защиты основных сельскохозяйственных культур (таблицы 1, 2).

Таблица 2. Интегрированная защита озимой пшеницы
Table 2. Integrated protection of winter wheat

Фаза растений	Препарат, норма расхода	Действующее вещество, штамм-продуцент	Вредоносные объекты
Внесение в почву	Стернифаг, СП, 80 г/га	<i>Trichoderma harzianum</i>	Фитопатогены на растительных остатках в почве
Обработка семян	Траст, ВСК, 0,3 л/га	тиабендазол + тебуконазол	Внутрисеменная и поверхностная инфекция, ранневсходовые вредители, корневые и прикорневые гнили
	Тиара, КС, 0,6 л/га	тиаметоксам	
	Витаплан, СП, 20 г/т	<i>Bacillus subtilis</i>	
	Трихоцин, СП, 20 г/т	<i>Trichoderma harzianum</i>	
	Биолипостим, 0,3 л/т	биополимеры	
	Гумистим, Ж, 2 л/т	гуминовые кислоты	
Кущение (весна)	Алирин-Б, Ж, 3 л/га	<i>Bacillus subtilis</i>	Септориоз, пиренофороз
	Биолипостим, 0,3 л/га	биополимеры	
Выход в трубку	Балерина, СЭ, 0,4 л/га	2,4 Д; Флорасулам	Однолетние сорняки и ряд многолетних
Колошение – налив зерна	Витаплан, СП, 40 г/га	<i>Bacillus subtilis</i>	Мучнистая роса, злаковая тля, хлебный клопик, пшеница и др.
	Трихоцин, СП, 40 г/га	<i>Trichoderma harzianum</i>	
	Инпут, КЭ, 0,8 л/га	протиконазол + спирокарсамин	
	Шарпей, МЭ, 0,2 л/га	циперметрин, 250	

Примечание: 2020-2023 гг., Белгородская обл., полевой исследовательский стационар ВИЗР – ООО НИЦ «Агробιοтехнология»

СП – смачивающийся порошок; ВСК – водно-суспензионный концентрат; КС – концентрат суспензии; Ж – жидкость; СЭ – суспензионная эмульсия; КЭ – концентрат эмульсии; МЭ – микроэмульсия.

Важно подчеркнуть тот факт, что многолетнее преобладание химической защиты растений кроме защиты урожая привело к возникновению и усложнению негативных процессов. Так, произошло загрязнение и подкисление почв, особенно в регионах товарного производства зерна Краснодарского края [2], появились 45 резистентных популяций у

экономически значимых фитосанитарных объектов [16], перечень действующих веществ пестицидов достиг 230 д.в., ассортимент более 2200 препаратов. Всё обозначенное является суммарной причиной негативной трансформации почв, в том числе отсутствие органических удобрений, что ингибирует размножение микробов-антагонистов и снижает уровень супрессивности. Нарастивание кратности обработок химическими пестицидами, особенно в интенсивном растениеводстве, для сохранения высоких урожаев ведет в тупик, в первую очередь в части достижения достаточной экологической безопасности в экосистемах.

Накоплены сведения и новые материалы по значимости иммунитета растений в отношении особо опасных возбудителей болезней и фитофагов [13]. Так, выявлена генетическая детерминация устойчивости к стеблевой ржавчине у сортов озимой пшеницы, идентифицированы гены устойчивости [8, 27, 28]. Получены новые данные по признаку вирулентности, определен расовый состав и эффективные гены устойчивости у гриба *Puccinia graminis f. sp. tritici* с яровой и озимой пшеницы.

В генотипах 54-х новых сортов мягкой пшеницы выявлены эффективные гены ювенильный устойчивости к возбудителю бурой ржавчины; отдельные сорта обнаружили ювенильную и полевую устойчивость к различным расам возбудителя – всё это обозначило новые перспективы в генетической защите пшеницы и соответствует реализации и переходу на новую парадигму в защите растений.

Как уже было подчеркнуто ранее, особое значение в научно-производственном аспекте отводится разработке зональных систем интегрированной защиты сельскохозяйственных культур. Так, ФГБНУ ВИЗР в последние годы предложены новые зональные системы защиты по таким сельскохозяйственным культурам как озимая рожь и пшеница, тритикале, ячмень, рапс, картофель и соя. Системы защиты успешно прошли научно-производственную апробацию, утверждены Ученым советом ФГБНУ ВИЗР и опубликованы. Системы защиты в первую очередь адаптированы к защите от особо опасных фитосанитарных объектов, перечень последних насчитывает 43 вида [10]. В технологическом аспекте зональные системы интегрированной защиты растений являются узловыми в научном обеспечении фитосанитарии, прежде всего в реализации концепции фитосанитарной оптимизации агроэкосистем, то есть с охватом всей севооборотной площади, и, безусловно, в развитии новой парадигмы, где делается ставка на многолетнюю биоценотическую стабилизацию посевов. На полевом исследовательском стационаре в Белгородской области (табл. 1, 2) получены материалы по сравнительной оценке трех систем, в том числе и интегрированной, на ряде сельскохозяйственных культур, по показателю пестицидной нагрузки на 1 га. Так, по озимой пшенице нагрузка (кг д.в. химических пестицидов/га) в случае химической защиты самая высокая – 0,937, а в вариантах интегрированной и биологической соответственно 0,645 и 0,217, что определяет снижение нагрузки на 31% и 77%. В таблице 2 представлена структура защиты на озимой пшенице, где с учетом фаз развития защищаемой культуры обозначены средства защиты, действующие вещества, штаммы-продуценты и вредоносные объекты. Здесь указаны 4 защитных биопрепарата (Стернифаг, Витаплан, Трихоцин и Алирин-Б), которые успешно прошли государственные испытания и налажено их производство; биополимеры и гуминовые кислоты обеспечивают прибавку урожая в 5-10% [29].

В целом данная система интегрированной защиты озимой пшеницы характеризуется следующими показателями эффективности: средняя урожайность 65,4 ц/га, снижение химической нагрузки на 1 га на 30%, рентабельность 368%. Важно подчеркнуть:

максимальная рентабельность достигнута в варианте «биологизированная защита» и составила 513%, а средняя урожайность – 63,0 ц/га, в контроле – 50,6 ц/га. В отношении других сельскохозяйственных культур (ячмень яровой, соя, кукуруза) показатели различаются в силу особенностей технологий возделывания и различного состава доминантных фитосанитарных объектов. Но положительный тренд сохраняется [20]. Эффективно зарекомендовали себя адаптированные к Белгородскому региону и включенные в программу биологизации такие сорта озимой пшеницы как Гром, Безостая 100, Скипетр, Алексеевич, которые отличались высокой урожайностью, устойчивостью к основным фитопатогенам и другим показателям – всё это доказывает важнейшую средообразующую роль сорта в реализации концепции и новой парадигмы в защите растений.

Научное обеспечение защиты растений

На современном этапе развития сельскохозяйственного производства важно проанализировать структуру и развитие научного обеспечения защиты растений, которое формировалось фрагментарно и сопровождалось периодами стагнации и прогресса. Это связано с рядом причин, а именно: с уровнем финансирования научных направлений, наличием научных школ и ресурсной базы (кадры, оборудование и накопленный технологический потенциал). В этой связи поучительна 95-летняя история ФГБНУ ВИЗР. На этапе становления, начиная с 1929 года, в институте под влиянием известных биологических научных школ Санкт-Петербурга и Москвы сформировался сильный состав ученых, благодаря которым были образованы лаборатории по ряду направлений. Энтомологические исследования развивались с участием академика Е.Н. Павловского, чл.-корр. Г.Я. Бей-Биенко, профессоров А.В. Знаменского, И.В. Васильева, Н.Ф. Мейера, Л.С. Зимина и др. Особое значение и существенную роль в развитии ВИЗР сыграл факультет защиты растений Ленинградского сельскохозяйственного института (ныне это Санкт-Петербургский государственный аграрный университет): одна треть действующего персонала ВИЗР – выпускники факультета, востребованность агрономов по защите растений подтверждена функционированием производственной службы защиты растений и спросом в научном обеспечении фитосанитарии, что подчеркивает необходимость восстановления факультета защиты растений.

Профессорско-преподавательский состав, в бытность факультета защиты растений ЛСХИ, отличался высочайшим уровнем профессионализма, что отражалось в качестве выпускников по специальности «Агроном по защите растений». Безусловно, надолго в памяти остались лекции профессоров Н.Г. Берим, Н.В. Бондаренко, А.Ф. Глущенко, С.М. Пospelова, П.Н. Головина и других преподавателей, что было крайне важным для студентов и аспирантов факультета. Работы профессора Н.Н. Богданова-Катькова послужили основой для создания систем интегрированной защиты сельскохозяйственных культур.

В фитопатологии и микологии огромный вклад внесли профессора А.А. Ячевский, Н.А. Наумов, К.М. Степанов, М.С. Дунин, М.К. Хохряков и др. Лаборатория микробиометода ВИЗР функционировала под руководством проф. В.П. Пospelова. Создание новых машин для защиты растений осуществлялось сотрудниками лаборатории под руководством проф. И.П. Яценко.

В науке велика роль научных школ, функционирование каждой из них гарантирует успешное развитие конкретного направления. Особенно это важно, когда одновременно реализуются десятки научных программ и проектов, требуется разделение труда и координация НИР. На сегодняшний день в ВИЗР функционируют 9 научных школ,

охватывающих основную проблематику фитосанитарии, период их действия длительный [30].

Академик М.М. Левитин с коллегами (Ф.Б. Ганнибал, Е.И. Гулятьева, Ю.В. Зеленева и др.) успешно продвинули исследования в области микологии и фитопатологии. Выполнены оригинальные исследования по токсигенным микромицетам и бурой ржавчине пшеницы. Школа получила официальную государственную регистрацию. Следует отметить многолетнее сотрудничество с ведущими учеными БИН, МГУ и ВНИИФ.

Усилиями академика В.И. Долженко, профессора Г.И. Сухорученко (выпускников ЛСХИ) и сотрудников (Л.Д. Гришечкина, А.Б. Лаптев и др.) продолжены НИР в области химической защиты растений – формирование ассортимента СЗР, выявление резистентности у насекомых, регламенты применения пестицидов, противосаранчовые мероприятия. Профессионально поставлена координация регистрационных испытаний с участием ФНЦ ВНИИБЗР, ФГБНУ ВНИИФ, АО «Щелково Агрохим», АО «Август» и других организаций.

Под руководством академика Афанасенко О.С. (выпускница ЛСХИ) успешно развивается научная школа по иммунитету растений к болезням, получены оригинальные данные по генетике паразито-хозяинных взаимоотношений, картированию генов устойчивости зерновых и механизмам изменчивости фитопатогенных грибов. Это послужило основанием для участия ВИЗР в комплексной генетической программе, утвержденной Правительством РФ в 2019 году. Активно развивается сотрудничество с ВИР, ИЦиГ, КНИИСХ и другими организациями.

Доказательством функционирования 9 научных школ ВИЗР служит достаточно высокий уровень публикационной активности. За период 2014-2024 гг. опубликовано 37 монографий, 1076 статей в журналах Web of Science и 3300 статей в РИНЦ, получено 26 патентов РФ, а институт отнесен к I категории (профиль «генератор новых знаний»).

Наши научные школы продолжают сотрудничество с ведущими учеными АФИ, ЗИН, ВНИИСХМ, МГУ, ИСиЭЖ, ТСХА, СПбГАУ. Эти контакты как раз повлияли на становление современных концепций по направлениям фитосанитарии. Позвольте остановиться на некоторых из них.

Как известно, химическая защита охватывает весь набор фитосанитарных объектов, в основе пестицидов более 230 действующих веществ, разнообразие препаративных форм насчитывает 18 вариантов. Естественно, концепции защиты растений от сорняков, насекомых, возбудителей болезней и пр. различаются. Мы хотели бы коснуться концепции развития работ в части энтомотоксикологии. Здесь огромный вклад академика К.В. Новожилова (выпускник ЛСХИ, 1951 г.) и его коллег. В историческом аспекте выделяются несколько этапов.

В 30-40 годы прошлого века при отсутствии ассортимента СЗР и огромных потерях урожая от особо опасных фитофагов (свекловичный долгоносик, саранчовые, филлоксеры и др.) делалась ставка на препараты мышьяка, фтористые соединения, т.е. на кишечные инсектициды с острой токсикологией.

В 50-е годы, когда обострилась проблема гарантированной защиты посевов от саранчовых, вредной черепашки в фокусе исследований оказались хлор- и фосфорорганические соединения, а именно ДДТ и ГХЦГ. Этому способствовала сильная Казанская школа химиков во главе с академиками А. Е. и Б. А. Арбузовыми. В 1932 г. они впервые в мире получили чистый тетраэтилпирофосфат, а также потом в Германии (1940-1941 гг.) была создана серия контактных фос-препаратов (шрадан, тиофос, метафос и др.).

Токсикологическая опасность в агроэкосистемах имела соподчиненное значение, а защита урожая зерновых состоялась.

Однако, нарастание пестицидных загрязнений в урожае и окружающей среде поставило на повестку дня, не снижая гарантированную защиту урожая, уменьшить негативное воздействие химических средств в агробиоценозах, что возможно в рамках интегрированной защиты сельскохозяйственных культур. В энмотоксикологии это привело к наращиванию исследований по поиску селективных препаратов, выявлению физиологической и экологической избирательности, более широкому скринингу действующих веществ, к созданию комбинированных препаратов со снижением дозировок, что приводило к щадящим условиям для полезных видов. Удалось разработать компьютерные имитационные модели поведения пестицидов (их деградации). Важной вехой послужило определение механизмов образования резистентности у насекомых (сейчас их более 45 популяций).

Таким образом, химический блок, оставаясь определяющим в гарантированной защите сельскохозяйственных культур, в рамках модернизации концепции последовательно решал вопросы по показателям биологической эффективности и экологической безопасности, естественно в рамках существующего набора действующих веществ.

ВИЗР с 30-х годов развивал работы в области биологической защиты растений на базе энтомопатогенов, микробов-антагонистов и энтомофагов. Учеными В.А. Павлюшиным, И.И. Новиковой, Н.А. Беляковой, И.В. Бойковой, Л.Г. Даниловым и другими создано 25 средств биозащиты.

Современная концепция выглядит в виде набора ряда правил (мониторинг паразитоценоза, упреждающие обработки, технологическая совместимость средств биозащиты), необходимых для успешной реализации системы биозащиты в теплицах. Она хорошо вписывается в современный биотехнологический тренд.

Однако, исходя из закономерностей биоценотического регулирования, биозащита имеет ограничения. Последние должны сниматься массовой интродукцией энтомофагов и защитных биопрепаратов.

Концептуальный подход в иммунитете сельскохозяйственных культур к болезням и вредителям сфокусирован на генетике хозяино-паразитных взаимоотношений, выявлении генов устойчивости к возбудителям болезней и использовании ДНК-технологий для отбора доноров устойчивости.

Предложена схема исследований природы устойчивости пшеницы к хлебным клопам. Делается ставка на блокирование пищевых связей путем ингибиторов протеаз клопов, в первую очередь вредной черепашки.

Совокупность концептуальных подходов и накопленный потенциал научных школ позволяет предложить и уточнить концепцию фитосанитарной оптимизации агроэкосистем в рамках требований интегрированной защиты (рис. 3).

Особенность: фрагментарно накопленных материалов достаточно, технологически завершенных элементов не хватает, и самое главное – нет технологической интеграции составляющих элементов. Нужны инновационные площадки в виде полигонов и высокий уровень координации работ. Обозначенные подходы фитосанитарной оптимизации агроэкосистем не противоречат новой парадигме и требуют четкого разделения труда и расчета ресурсной базы.

Дело в том, что сейчас наблюдается бум, когда за проблемы защиты растений берется значительное количество НИУ и университетов, у которых недостаточно накопленного опыта в фитосанитарии. В этом есть плюсы, поскольку усиливается ресурсная часть. Однако, чтобы приступить к разработке технологических элементов обозначенной парадигмы (где ставки на управление динамикой численности), следует выделить приоритеты и прорывные направления. Так, в краткой форме можно выделить 7 наукоемких прорывных направлений, по которым есть существенные заделы и ясна инновационная часть (фитосанитарное проектирование, геномные технологии, картирование и супрессивность почв, природоподобные препараты, защитные биопрепараты, массовое разведение энтомофагов).

Выше обозначенное крайне важно реализовать, ибо практика уже демонстрирует опережающие моменты. Например, декларации об органическом земледелии и принятие соответствующего федерального закона. Важно понимать, что в органическом земледелии очень много фитосанитарных рисков, которые можно снижать путем создания биотехнологических приемов и средств, в том числе и селекцией комплексно устойчивых сортов.

Повышенная наукоемкость характерна при создании новых систем интегрированной защиты сельскохозяйственных культур в интенсивном растениеводстве (рис. 2), что позволит решить две узловые технологические задачи:

- гарантированную защиту урожая высокого качества,
- достижение достаточного уровня экологической безопасности в агроэкосистемах.

Наращиванием кратности только химических обработок обозначенные задачи не решить. Дело в том, что сутевая часть этих задач находится в противоречии, а именно: химическая защита основана на временных летальных эффектах, а экологическая безопасность – на пролонгированной биоценотической регуляции. Целесообразно выделить наиболее значимые приоритетные направления:

- мониторинг и прогноз изменений климата, значимых для защиты растений (опустынивание, дефицит влаги, суммы эффективных температур и др.);
- внутривидовая изменчивость особо опасных вредителей и возбудителей болезней; наиболее значимые расы, штаммы, их генетическая детерминация;
- особенности современной фитосанитарии почв в зональном разрезе (токсичные почвы, динамика супрессивности, максимальная интродукция микробов-антагонистов);
- создание новых полифункциональных защитных биопрепаратов и других средств биозащиты.

Заключение. Учитывая неоднородность по объемам, площадям, пестицидной нагрузке применительно к фитосанитарным мероприятиям в регионах товарного производства зерна, картофеля, промышленных яблоневых садах, на посевах масличных культур, сои с регионами в Нечерноземной зоне, на Северо-Западе РФ и других местах, мы имеем дело и фиксируем фитосанитарную турбулентность. Ежегодная площадь обработок (85-105 млн га), которая дается по показателям однократного применения пестицидов, поверхностно отражает суть и качество в части гарантированной прибавки урожая и экологической безопасности в агроэкосистемах.

Научное обеспечение защиты растений складывается удовлетворительно, на примере ВИЗР, где функционирует 9 научных школ, достигнут высокий уровень публикационной активности, что указывает на гарантированное сохранение накопленных

научных материалов. Так, начиная с 2014 года опубликовано 37 монографий, в журналах Web of Science вышли в свет 1076 статей и 3300 публикаций в РИНЦ, получено 26 патентов РФ, а институт отнесен к I категории (профиль «генератор новых знаний»).

Однако, в научном обеспечении защиты растений требуется корректировка таких наиболее значимых тем для государственных заданий как: 1) научно-технологический фитосанитарный прогноз, разработка новых систем интегрированной и биологической защиты применительно к зонам; 2) мониторинг и прогноз изменений климата, значимых для защиты растений (опустынивание, дефицит воды, суммы эффективных температур); 3) внутривидовая изменчивость особо опасных вредителей и возбудителей болезней, наиболее вредоносные расы, штаммы и др., их генетическая детерминация; 4) особенности современной фитосанитарии почв в зональном разрезе (токсичные почвы, динамика супрессивности, максимальная интродукция микробов-антагонистов). По-прежнему актуальна ускоренная селекция генетически устойчивых сортов, адаптированных к изменению климата; создание новых полифункциональных защитных биопрепаратов; экономическая и экологическая оценка зональных систем с учетом резистентных популяций сорных растений, фитофагов и возбудителей болезней сельскохозяйственных культур, всего 45. Обозначился более остро социальный запрос на технологическую завершенность, в первую очередь для интенсивного растениеводства и закрытого грунта. Необходимы новые зональные системы интегрированной защиты сельскохозяйственных культур, обеспечивающие прибавку урожая хорошего качества без потери плодородия. Существующая практика сопровождается отрицательными последствиями: многолетняя нехватка органики в почвах приводит к снижению супрессивности и накоплению фитопатогенов, а неконтролируемая кратность обработок – к накоплению пестицидов в почве, в растительной продукции и в окружающей среде. Уровень научного обеспечения должен быть повышен и соответствовать обозначенным проблемам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павлюшин В.А. Изменение климата и фитосанитарное состояние агроценозов // Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России / под ред. академиков Россельхозакадемии А.Л. Иванова и В.И. Кирюшина. М.: Россельхозакадемия. 2009. Раздел 1.9. С. 101-106. URL: https://www.cnsheb.ru/Vexhib/rsh/09_13589.pdf
2. Сасова Н.А. Важная задача современности – оздоровление почв в биоценозах севооборота // Защита и карантин растений. 2025. № 3. С. 5-7. https://doi.org/10.47528/1026-8634_2025_3_5
3. Павлюшин В.А., Танский В.И. Дестабилизация фитосанитарного состояния земледелия и пути ее преодоления // Вестник защиты растений. 2006. № 1. С. 8-15. EDN: KUATWX
4. Павлюшин В.А. Биологическая защита растений и повышение конкурентоспособности растениеводческой продукции в интенсивном растениеводстве, закрытом грунте и органическом земледелии // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 4(125). С. 4-22. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-4125-4-22>
5. Павлюшин В.А., Ганнибал Ф.Б. За гарантированную защиту урожая и достижение экологической безопасности в агроэкосистемах // Защита и карантин растений. 2019. № 10. С. 3-10. EDN: NRZBCO

6. Павлюшин В.А., Новикова И.И., Бойкова И.В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем; теория и практика: обзор // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55 (3). С. 421-438. EDN: FEAOFP
7. Архипов М.В., Данилова Т.А., Павлюшин В.А., Синицина С.И., Пасынкова Е.Н., Тюкалов Ю.А. Пути и возможности фитосанитарной оптимизации агроэкосистем Северо-Западного региона России // Вестник защиты растений. 2017. № 2 (92). С. 5-14. EDN: ZFHRBT
8. Павлюшин В.А., Афанасенко О.С., Вилкова Н.А. Современные проблемы иммунитета растений к вредным организмам // Современные проблемы иммунитета растений к вредным организмам. Матер. Второй межд. конф. СПб.: ВИЗР. 2008. С. 8-9. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13794627_11323525.pdf
9. Колесников Л.Е., Колесников Е.К., Павлюшин В.А., Чернов С.В., Колесникова Ю.Р. Фенотипическое проявление устойчивости пшеницы к бурой ржавчине // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. №1. С. 38-46. <https://doi.org/10.31857/82500262722010070>
10. Павлюшин В.А., Долженко В.И., Шпанев А.М., Лаптев А.Б., Гончаров Н.Р., Лысов А.К. и др. Интегрированная защита озимой пшеницы // Приложение к журналу «Защита и карантин растений». 2015. № 5. С. 37(1)-71(36). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24883762_16573617.pdf
11. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Нефедова Л.И. Функционирование агробиоценозов и типы их отклика на антропогенные воздействия // Вестник защиты растений. 2016. № 4(90). С. 5-18. EDN: XWYYAL
12. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Нефедова Л.И. Вредная черепашка: распространение, вредность, методы контроля // Приложение к журналу «Защита и карантин растений». 2010. № 1. С. 53-84. EDN: UHCCVN
13. Павлюшин В.А., Вилкова Н.А., Сухорученко Г.И., Нефедова Л.И., Фасулати С.Р. Фитосанитарная дестабилизация агроэкосистем: монография. СПб.: Родные просторы. 2013. 184 с. EDN: UAZOAZ
14. Леднев Г.Р., Левченко М.В., Крюков В.Ю., Митьковец П.В., Ярославцева О.Н., Успанов А.М., Павлюшин В.А. Состояние и перспективы использования микоинсектицидов для контроля численности саранчовых // Защита и карантин растений. 2012. № 6. С. 18-20. EDN: OXWBYZ
15. Шпанев А.М., Капусткина А.В. Поврежденность зерна озимой тритикале растительными клопами в Ленинградской области // Вестник защиты растений. 2025. № 108(3). С. 190-196. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2025-108-3-16833>
16. Павлюшин В.А., Сухорученко Г.И., Вилкова Н.А. Резистентность вредных членистоногих к пестицидам и меры ее преодоления // Приложение журнала Защита и карантин растений. 2013. № 5. С. 62-92. EDN: WGQONT
17. Павлюшин В.А., Тютерев С.Л., Попова Э.В., Новикова И.И., Быкова Г.А., Домнина Н.С. Новые комплексные биопрепараты для защиты овощных культур от грибных и бактериальных болезней // Биотехнология. 2010. № 4. С. 69-80. EDN: OIIERD
18. Власенко Н.Г., Павлюшин В.А., Теплякова О.И., Кулагин О.В., Морозов Д.О. Эффективность защиты яровой пшеницы биопрепаратами и фунгицидами в лесостепи Приобья: I Первые результаты в экстремальных погодных условиях // Вестник защиты растений. 2021. № 104(4). С. 202-212. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-4-15029>

19. Власенко Н.Г., Павлюшин В.А., Теплякова О.И., Кулагин О.В., Морозов Д.О. Эффективность защиты яровой пшеницы биопрепаратами и фунгицидами в лесостепи Приобья: II Особенности действия в условиях недостатка влаги // Вестник защиты растений. 2022. № 105 (4). С. 181-192. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2022-105-4-15357>
20. Морозов Д.О., Павлюшин В.А., Букреев В.В., Леднев Г.Р. Биологическое обоснование использования полифункциональных биопрепаратов против болезней ярового ячменя и сои Центрально-Черноземного региона // Сб. тезисов докладов V Всеросс. конгресса по защите растений (Санкт-Петербург, 16-19 апреля 2024 г.). СПб.: ВИЗР. 2024. С. 277. EDN: GXPRLG
21. Новикова И.И., Попова Э.В., Бойкова И.В., Павлюшин В.А., Тютюрев С.Л. Роль интродуцированных микробов-антагонистов фитопатогенных микромицетов в повышении супрессивности почвы // Защита и карантин растений. 2016. № 8. С. 35-43. EDN: WGXIPIF
22. Павлюшин В.А., Белякова Н.А., Фролов А.Н. Новая парадигма защиты растений: важнейшие аспекты реализации // Сб. тезисов докладов, XVI съезд русского энтомологического общества РЭО, МГУ. 2022. С. 117.
23. Белякова Н.А., Павлюшин В.А. Концепция развития биологической защиты растений // Материалы III Всероссийского съезда по защите растений. 2013. Т. II. С. 7-10.
24. Титова Ю.А., Новикова И.И., Бойкова И.В., Павлюшин В.А., Краснобаева И.Л. Мультибиоконверсионные твердофазные биопрепараты нового поколения на основе *Bacillus subtilis* и *Trichoderma asperellum* повышают эффективность защиты картофеля от фитофтороза // Сельскохозяйственная биология. 2019. №54(5). С. 1002-1013. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.1002rus>
25. Лысов А.К., Павлюшин В.А. Фитосанитарное проектирование агроэкосистем и дистанционное зондирование // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. № 19 (5). С. 101-112. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109>
26. Жученко А.А. Конструирование адаптивных агроэкосистем и агроландшафтов // Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем. Матер. докл. межд. науч.-практ. конф. (Краснодар, 29 сентября – 1 октября 2004 г.). Краснодар: ВНИИБЗР. 2004. Вып. 2. С. 5-31.
27. Афанасенко О.С. Генетическая защита зерновых культур: итоги и перспективы // Защита и карантин растений. 2020. № 9. С. 3-7. EDN: TYQUEV
28. Колесников Л.Е., Павлюшин В.А., Архипов М.В., Прияткин Н.С., Колесникова Ю.Р. Агроэкологическое варьирование продуктивности и устойчивости пшеницы к болезням: элементы и моделирование // Сборник международной конференции АФИ. 2022. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2022.03.06>
29. Морозов Д.О., Коршунов С.А., Любовецкая А.А., Мишуров Н.Л., Коваленко Л.Ю. Современные системы интегрированной защиты с.-х. растений. М.: Росинформагротех. 2019. 92 с.
30. Новожилов К.В., Павлюшин В.А. Научные школы ВИЗР – истоки и развитие // Вестник защиты растений. 2010. № 4. С. 3-21. EDN: MWPBXL

REFERENCES

1. Pavlyushin V.A. Climate change and the phytosanitary state of agroecosystems. In: Global Climate Change and Risk Forecasting in Russian Agriculture (eds. academicians of the

Russian Agricultural Academy A.L. Ivanov and V.I. Kiryushin. Moscow: Russian Agricultural Academy. 2009. Section 1.9: 101-106. (In Russ.) URL: https://www.cnsnb.ru/Vexhib/rsh/09_13589.pdf

2. Sasova N.A. An Important Modern Task: Soil Rehabilitation in Crop Rotation Biocenoses Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine. 2025;3:5-7. (In Russ.) https://doi.org/10.47528/1026-8634_2025_3_5

3. Pavlyushin V.A., Tansky V.I. Destabilization of the phytosanitary state of agriculture and ways to overcome it. Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News. 2006;1:8-15. (In Russ.) EDN: KUATWX

4. Pavlyushin V.A. Biological plant protection and increasing the competitiveness of crop production in intensive crop production, greenhouses, and organic farming. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2025;4(125):4-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-4125-4-22>

5. Pavlyushin V.A., Gannibal F.B. For guaranteed crop protection and environmental safety in agroecosystems. Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine. 2019;10: 3-10 (In Russ.) EDN: NRZBCO

6. Pavlyushin V.A., Novikova I.I., Boikova I.V. Microbiological control in phytosanitary optimization technologies for agroecosystems: research and practice (review) Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya = Agricultural Biology. 2020;55 (3): 421-438. (In Russ.) EDN: FEAOPF

7. Arkhipov M.V., Danilova T.A., Pavlyushin V.A., Sinitsyna S.I., Pasyunkova E.N., Tyukalov Yu.A. Ways and possibilities of phytosanitary optimization of agroecosystems in North-West region of Russia. Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News. 2017;2 (92):5-14. (In Russ.) EDN: ZFHRBT

8. Pavlyushin V.A., Afanasenko O.S., Vilkoval N.A. Modern problems of plant immunity to harmful organisms. In: Modern Problems of Plant Immunity to Harmful Organisms. Proc. 2nd Int. Conf. Saint Petersburg: VIZR. 2008:8-9. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_13794627_11323525.pdf

9. Kolesnikov L.E., Kolesnikov E.K., Pavlyushin V.A., Chernov S.V., Kolesnikova Yu.R. Phenotypic expression of wheat resistance to brown rust: elements and modeling. Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka = Russian Agricultural Science. 2022;1:38-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/82500262722010070>

10. Pavlyushin V.A., Dolzhenko V.I., Shpanev A.M., Laptev A.B., Goncharov N.R., Lysov A.K. et al. Integrated protection of winter wheat. Supplement to Plant Protection and Quarantine Journal. 2015;5:37(1)-71(36). (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24883762_16573617.pdf

11. Pavlyushin V.A., Vilkoval N.A., Sukhoruchenko G.I., Nefedova L.I. Functioning of agrobiocenoses and types of their response to anthropogenic impacts. Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News. 2016; 4(90):5-18. (In Russ.) EDN: XWYYAL

12. Pavlyushin V.A., Vilkoval N.A., Sukhoruchenko G.I., Nefedova L.I. *Eurygaster integriceps*: distribution, harmfulness, control methods. Supplement to Plant Protection and Quarantine Journal. 2010;1:53-84. (In Russ.) EDN: UHCCVH

13. Pavlyushin V.A., Vilkoval N.A., Sukhoruchenko G.I., Nefedova L.I. Phytosanitary Destabilization of Agroecosystems. Saint Petersburg: Rodnye Prostory Publ. 2013. 184 p. (In Russ.) EDN: UAZOAZ

14. Lednev G.R., Levchenko M.V., Kryukov V.Yu., Mitkovets P.V., Yaroslavtseva O.N., Uspanov A.M., Pavlyushin V.A. Present use and prospects of mycopesticides application for controlling locust populations. *Zashchita i karantin rastenii* = Plant Protection and Quarantine. 2012; 6:18-20. (In Russ.) EDN: OXWBYZ
15. Shpanev A.M., Kapustkina A.V. Damage to winter triticales grain by herbivorous bugs in the Leningrad region. *Vestnik zashchity rastenii* = Plant Protection News. 2025;108(3):190-196. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2025-108-3-16833>
16. Pavlyushin V.A., Sukhoruchenko G.I., Vilkova N.A. The harmful arthropod resistance to pesticides and measures of its overcoming. Supplement to Plant Protection and Quarantine Journal. 2013;5:62-92. (In Russ.) EDN: WGQOHT
17. Pavlyushin V.A., Tyuterev S.L., Popova E.V., Novikova I.I., Bykova G.A., Domnina N.S. Novel complex biopreparations for plant protection from fungi- and bacteria-caused diseases. *Biotekhnologiya* = Biotechnology. 2010;4:69-80. (In Russ.) EDN: OIIERD
18. Vlasenko N.G., Pavlyushin V.A., Teplyakova O.I., Kulagin O.V., Morozov D.O. Protection of spring wheat with biopreparations and fungicides in the forest steppe of Priobye: I. First results in extreme weather conditions. *Vestnik zashchity rastenii* = Plant Protection News. 2021;104(4):202-212. (In Russ.) <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-4-15029>
19. Vlasenko N.G., Pavlyushin V.A., Teplyakova O.I., Kulagin O.V., Morozov D.O. Protection of spring wheat with biopreparations and fungicides in the forest steppe of Priobye: II. Activity under conditions of moisture deficiency. *Vestnik zashchity rastenii* = Plant Protection News. 2022;105 (4):181-192. (In Russ.) <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2022-105-4-15357>
20. Morozov D.O., Pavlyushin V.A., Bukreev V.V., and Lednev G.R. Biological justification for the use of multifunctional biopreparations against diseases of spring barley and soybeans in the Central Black Earth Region. In: Collection of Abstracts of V All-Russian Congress on Plant Protection. (Saint Petersburg, April 16-19, 2024). Saint Petersburg: VIZR. 2024: 277. (In Russ.) EDN: GXPRLG
21. Novikova I.I., Popova E.V., Boikova I.V., Pavlyushin V.A., Tyuterev S.L. Role of the introduced microbial antagonists of the phytopathogenic micromycetes in the improvement of the suppressive soils. *Zashchita i karantin rastenii* = Plant Protection and Quarantine. 2016;8:35-43. (In Russ.) EDN: WGXIPIF
22. Pavlyushin V.A., Belyakova N.A., Frolov A.N. The New Paradigm of Plant Protection: The Most Important Aspects of Implementation // Collection of Abstracts of Reports, XVI Congress of the Russian Entomological Society, Moscow State University. 2022. P. 117.
23. Belyakova N.A., Pavlyushin V.A. The Concept of the Development of Biological Plant Protection // Materials of the III All-Russian Congress on Plant Protection. 2013. Vol. II. Pp. 7-10.
24. Titova J.A., Novikova I.I., Boykova I.V., Pavlyushin V.A., Krasnobaeva I.L. Novel solid-phase multibiorecycled biologics based on *Bacillus subtilis* and *Trichoderma asperellum* as effective potato protectants against phytophthora disease. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya* = Agricultural Biology. 2019;54(5):1002-1013. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.1002rus>
25. Lysov A.K., Pavlyushin V.A. Phytosanitary design of agroecosystems and remote sensing. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2022;19 (5): 101-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-5-101-109>

26. Zhuchenko A.A. Designing of adaptive agroecosystems and agrolandscapes. In: Biological Plant Protection as a Basis for Stabilizing Agroecosystems. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Krasnodar, September 29 – October 1 2004). Krasnodar: All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection. 2004;2:5-31. (In Russ.)

27. Afanasenko O.S. Genetic protection of grain crops: results and prospects. Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine. 2020;9:3-7. (In Russ.) EDN: TYQUEV

28. Kolesnikov L.E., Pavlyushin V.A., Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Kolesnikova Yu.R. Agroecological variation of wheat productivity and disease resistance: elements and modeling. Agrofizika = Agrophysica. 2022;3:40-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2022.03.06>

29. Morozov D.O., Korshunov S.A., Lyubovedskaya A.A., Mishurov N.L., Kovalenko L.Yu. Modern systems of integrated protection of agricultural plants: scientific and analytical overview. M.: Rosinformagrotekh. 2019. 92 p. (In Russ.) URL: <https://specagro.ru/sites/default/files/2020-01/Obzor%20Zschita.pdf>

30. Novozhilov K.V., Pavlyushin V.A. Schools of thought in the All-Russian Institute of Plant Protection - sources and development. Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News. 2010;4(3-21). (In Russ.) EDN: MWPBXL

Об авторе	About the author
Павлюшин Владимир Алексеевич академик РАН, д-р биол. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский институт защиты растений (ВИЗР), 196608, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, шоссе Подбельского, 3 info@vizr.spb.ru; vapavlyushin@vizr.spb.ru https://orcid.org/0000-0002-4727-8750	Vladimir A. Pavlyushin Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), 3 Podbelskogo Highway, Pushkin, Saint Petersburg, 196608, Russia info@vizr.spb.ru; vapavlyushin@vizr.spb.ru https://orcid.org/0000-0002-4727-8750
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 interests 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: 05.03.2026	Received: 05.03.2026
Одобрена после рецензирования: 03.04.2026	Approved after reviewing: 03.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2025	Accepted for publication: 15.04.2025

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПОЛУЧЕНИЯ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА КИПРЕЯ УЗКОЛИСТНОГО

Геннадий Александрович Симонов¹, Евгений Александрович Тяпугин^{2✉},
Владислав Евгеньевич Никифоров³, Борис Николаевич Старковский⁴,
Александр Геннадьевич Симонов⁵

^{1, 4} Вологодская молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, Вологда, Россия

² Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии, Краснодар, Россия

³ Вологодский научный центр РАН, СЗНИИМЛПХ, Вологда, Россия

⁵ Университет дружбы народов им. П. Лумумбы, Москва, Россия

¹gennadiy0007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4559-233X>

²tuapuginsergei@mail.ru

³nfrv_123@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1175-2526>

⁴bor.2076@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3251-2214>

⁵alexandersimonov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8497-9564>

Аннотация. Зелёная масса кипрея узколистного (иван-чая) (*Chamaenerion angustifolium*) оказывает благоприятное действие на показатели продуктивности крупного рогатого скота при скормливании, поэтому размножение кипрея узколистного специально на кормовые цели является актуальной задачей. Цель исследования – разработка технологического процесса для получения посадочного материала кипрея узколистного (иван-чая) механизированным способом. Исследования проведены в условиях Европейского Севера Российской Федерации. По результатам работы получен патент на изобретение РФ № 2799600. Ключевые технологические элементы разработки включают пять операций. Первая – скашивание стеблей растения. Вторая – подбор зелёной массы для освобождения места выкопки. Третья – разрезание пласта почвы путём дискования тяжёлой дисковой бороной в продольном и поперечном направлении на глубину залегания основной массы корневищ. В результате мы получаем отрезки корневых отпрысков размером 10-15 см. Четвёртая – выкопка корневых отпрысков модернизированной картофелекопалкой. Модернизация исключает потери отрезков корневых отпрысков сквозь прутки сепарирующего аппарата картофелекопалки. Пятая операция – сбор корневищ кипрея с последующей транспортировкой к месту посадки или хранения. Способ позволяет вести заготовку посадочного материала как в полевых, так и естественных условиях произрастания кипрея узколистного. Применение данной разработки позволит обеспечить хозяйства посадочным материалом этого растения для его широкого возделывания в культуре. Данная разработка способствует укреплению кормовой базы животных за счёт внедрения кипрея узколистного (иван-чая) в культуру.

Ключевые слова: кипрей узколистный, кормовая культура, посадочный материал, способ, технология.

Для цитирования: Симонов Г.А., Тяпугин Е.А., Никифоров В.Е., Старковский Б.Н., Симонов А.Г. Разработка механизированного технологического процесса получения посадочного материала кипрея узколистного // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 26-38 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-26-37>

Research article

Universal Decimal Code: 631.3; 631.17; 633.2:582

DEVELOPMENT OF A MECHANIZED TECHNOLOGICAL PROCESS FOR OBTAINING PLANTING MATERIAL FOR FIREWEED

Gennady A. Simonov¹, Evgeny A. Tyapugin^{2✉}, Vladislav E. Nikiforov³, Boris N. Starkovsky⁴, Alexander G. Simonov⁵

^{1,4} Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russia

² Krasnodar Scientific Center for Animal Science and Veterinary Medicine, Krasnodar, Russia

³ Vologodskiy Scientific Center of Russian Academy of Sciences, SZNIIMLP, Vologda, Russia

⁵ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

¹ gennadiy0007@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4559-233X>

² tuapuginsergei@mail.ru

³ nfrv_123@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1175-2526>

⁴ bor.2076@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3251-2214>

⁵ alexandersimonov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8497-9564>

Abstract. Fresh forage from fireweed (*Chamaenerion angustifolium*, commonly known as willow herb) improves cattle productivity. Therefore, propagation of this plant specifically for feed purposes holds significant agricultural value. The study aimed to develop a technology for producing the fireweed planting stock by a mechanized method. The study was conducted in northern European Russia. The resulting technology protected by Patent for Invention No. 2799600 (RU) comprises five sequential steps: (1) cutting plant stems; (2) removing biomass to clear the area; (3) cross-harrowing the soil with a heavy disc harrow to cut rhizomes into 10 to 15 cm segments at their primary growth depth; (4) excavating the rhizome segments using a modified potato harvesting machine designed to prevent loss through the grate bars; and (5) collecting and transporting the planting material to the field or storage. By this method the fireweed planting material can be produced both in cultivated fields and natural habitats. Its adoption will allow farmers to initiate large-scale fireweed cultivation through artificial propagation thereby diversifying and strengthening animal feed base as it introduces fireweed into crop rotation systems.

Keywords: fireweed, forage crop, planting material, method, technology

For citation: Simonov G.A., Tyapugin E.A., Nikiforov V.E., Starkovsky B.N., Simonov A.G. Development of a mechanized technological process for obtaining planting material for fireweed. AgroEcoEngineering. 2026; 2(127): 26-38 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-26-37>

Введение. Кипрей узколистый размножается семенами и вегетативно. Однако в условиях Северо-Западного региона за короткий вегетативный период растений практически не собрать семена и такой способ размножения в условиях производства трудно осуществим. Однако кипрей образует хорошо развитые корневые отпрыски, из которых прорастают почки и они способны формировать новые растения. Эту особенность имеют и отрезки корневых отпрысков с почками.

На сегодняшний день отсутствуют предложения по технологии получения посадочного материала кипрея узколистого механизированным способом. Успешным решением этой проблемы может стать интенсификация процесса возделывания кипрея узколистого (иван-чая) в условиях культуры.

При заготовке объёмистые корма должны иметь высокую питательную и энергетическую ценность не менее 10 МДж обменной энергии (ОЭ) с содержанием 12-14% сырого протеина. Чтобы получить хороший сбор качественных кормов, необходимо применять современные и эффективные технологии возделывания многолетних трав.

Для повышения продуктивности животноводства необходимо учитывать потенциал кормовой базы с использованием природных ресурсов. Широкий набор кормов из трав позволяет правильно и в полной мере сбалансировать рационы животных. Особенно это касается молочных коров, когда необходимо обеспечить высокую продуктивность скота, поскольку использование разнообразных кормов позволяет составить наиболее качественный рацион по питательным, биологически активным и минеральным веществам [1-4].

Использование современных инновационных технологий в кормопроизводстве обеспечивает дополнительный производственный эффект для отрасли животноводства. Повсеместно произрастающий в Северо-Западном регионе страны, как дикорос, кипрей узколистый при его культивировании способен снизить затраты на получение высокопитательной зелёной массы и занять достойное место в сырьевом зелёном конвейере [5]. Это растение обладает комплексом ценных хозяйственно-полезных свойств, имеет высокую продуктивность от 20 до 60 т/га зелёной массы, длительно, до 15 лет, произрастает на одном месте, по содержанию протеина не уступает бобовым травам. Кипрей узколистый может успешно использоваться как добавка к традиционным силосным кормовым культурам [6]. Поэтому необходимость его культивирования очевидна.

Культивирование иван-чая будет способствовать сохранению естественного агроландшафта, снижению пестицидной нагрузки и рациональному использованию земель сельхозназначения, особенно на удалённых от основных производственных площадок полях [7].

Цель исследований – разработка технологического процесса для получения посадочного материала кипрея узколистого механизированным способом.

Материалы и методы. В нашем опыте материалом исследования служили корневища растений кипрея узколистого (иван-чая) на площадях его произрастания для получения посадочного материала (рисунок). Оценку полученного посадочного материала кипрея узколистого проводили по общепринятым методикам, применяемым в растениеводстве.



Рис. Растения кипрея узколистного 2-го года вегетации на опытном поле Вологодской ГМХА

Fig. Plants of fireweed (*Chamaenerion angustifolium*) of the 2nd vegetation year in the experimental field of the Vologda State Dairy Farming Academy

Результаты исследований. Кипрей узколистный – это универсальное растение, которое в настоящее время внедряется в сельское хозяйство преимущественно как продовольственная и кормовая культура для молочного животноводства. Именно кипрей узколистный находит популярность и получает активное продвижение, поскольку кормовой сбор зелёной массы растения имеет благоприятное действие на продуктивность крупного рогатого скота при наличии биологически активных веществ, витаминов, макро и микроэлементов [6]. Богатый химический состав и широкий спектр фармакологического действия кипрея узколистного указывают на то, что полученный растительный материал вполне является хорошим биологическим сырьевым источником и высоко оценён в качестве кормового растения.

В таблице 1 приведены данные химического состава растительной массы иван-чая (среднее за годы исследований).

Таблица 1. Химический состав растительной массы иван-чая

Table 1. Chemical composition of fireweed plant mass

Фаза развития	Сухое вещ-во, г/кг з.м.	% от сухого вещества					
		Сырая зола	Сырой протеин	Сырой жир	Клетчатка	БЭВ	
						всего	в т.ч. сахар
Цветение	170	8,17	18,3	4,9	19,7	50,3	10,0

Источник: Собственные исследования.

Зелёная масса кипрея узколистного (иван-чая) в фазу цветения содержит в своём составе протеин (18,3%), жир (4,9%), сахар (10%) и другие полезные вещества, необходимые

для питания сельскохозяйственных животных. Так, добавка кипрея узколистного обеспечивает высокое качество силоса из бобовых трав (козлятник, люцерна, клевер) [8 - 13].

Анализ химического состава (табл. 1) показал, что кипрей узколистный имеет значительное количество питательных веществ, необходимых в рационе животных. При использовании кормов важную роль играет баланс рационов по основным питательным веществам с учётом потребности коров и разным уровнем их продуктивности [14].

Нами была проведена сравнительная оценка питательности зелёной массы кипрея узколистного и потребности животных (на примере лактирующей коровы живой массой 550 кг с удоем 21-30 кг в сутки при жирности молока 3,1-4,0%) (табл. 2).

По содержанию основных показателей – обменной энергии, энергетических кормовых единиц, сырого протеина, жира и сахара, кипрей узколистный вполне соответствует нормам потребности в этих элементах. Содержание каротина составляет 214 мг/кг, витамина Е (токоферол) – 213 мг/кг, содержание жира – высокое, из чего можно заключить, что кипрей узколистный обогащает рацион, поддерживает здоровье животных, улучшает вкусовые качества и повышает поедаемость корма [10].

Таблица 2. Содержание питательных веществ кипрея к потребности коров в сухом веществе рациона

Table 2. Ratio of fireweed nutrient content to cows' need in diet dry matter

№ п/п	Наименование показателя	Концентрация энергии и питательность в 1 кг с.в. по нормам	Фактическое содержание в 1 кг с.в. в фазе цветения иван-чая	Обеспеченность, %
1.	Обменная энергия, МДж/кг с.в.	9,8	10,2	105
2.	Энергетические кормовые единицы, ед/кгс.в.	1,04	0,88	84,6
3.	Сырой протеин, г	160	183,2	114
4.	Жир, г	36	49,3	137
5.	Сахар, г	105	100,4	95,6
6.	Крахмал, г	160	20,3	12,7
7.	Клетчатка, г	200	197	98,5
8.	Кальций, г	6,90	9,54	138
9.	Фосфор, г	4,90	6,01	123
10.	Mg, мг	1,90	3,30	174
11.	Zn, мг	65,0	25,7	39,5
12.	Cu, мг	10,0	4,83	48,3
13.	Fe, мг	80,0	152	190
14.	Co, мг	0,8	0,09	11,3
15.	Каротин, мг	45,0	214	475
16.	Витамин Е, мг	40,0	213	534

Важными факторами успешности культивирования кипрея узколистного являются подбор участка, срок и способ посадки. В условиях Нечерноземной зоны России кипрей хорошо растёт на дерново-подзолистых и суглинистых почвах. Поскольку растение является многолетним, его следует размещать на отдельных полях, выведенных из севооборота, под которые были внесены органические удобрения (например, картофель, озимая рожь). Для посадки использовать корневые отпрыски этого растения [15].

Установлено, что для успешного возделывания иван-чая необходимо использовать корневые отпрыски длиной 15 см, высаживая их в осенний период. В условиях Северо-Западного региона России данная технология позволит получать сбор зелёной массы кипрея узколистного не менее 25 тонн с одного гектара без применения удобрений [16-20].

Корневая система кипрея узколистного – поверхностная, хорошо разветвлённая, распространяется в верхнем горизонте почвы на глубине 8-12 см. Корневые отпрыски вырастают длиной 40-50 см, до 1 м и более [16].

В связи с этим процесс их извлечения из почвы затруднён. Кроме того после их выкопки необходима их резка на части длиной по 10-15 см. Ворох извлеченных из почвы спутанных длинных корневищ трудно отсортировать, практически невозможно впоследствии обработать и произвести резку механизированным путем.

Основная задача снижения производственных затрат и увеличения объёмов заготовки при получении посадочного материала кипрея узколистного решается за счёт включения специальной операции резки длинных корней растений непосредственно в почве перед выкопкой. При выкопке осуществляется сбор, облегчается сортировка корневых отрезков. Данный способ позволяет полностью механизировать процесс заготовки посадочного материала кипрея узколистного на культурных плантациях и местах его естественного произрастания [21, 22].

Технологические операции, комплект машин и оборудования для осуществления предлагаемого способа заготовки корневищ представлены в таблице 3.

Таблица 3. Технологический процесс

Table 3. Process flow

№ п/п	Технологические операции	Технические средства
1.	Скашивание зелёной массы	косилки навесные КРН-2 (МТЗ-82)
2.	Сбор зелёной массы	грабли ГВР, (МТЗ-82)
3.	Дискование почвы по стерне	тяжелая борона БДТ-7, (МТЗ-82)
4.	Выкопка корневищ	картофелекопалка КСТ-1.4, УКВ-2, (МТЗ-80)
5.	Сбор, транспортировка посадочного материала, сортировка для хранения	Прицеп ПТС-4, ПТС -2, (МТЗ-80)

В качестве устройства для механического сбора посадочного материала кипрея узколистного возможно применять типовой картофелекопатель, содержащий лемех и

сепарирующий прутковый элеватор с приводом, обеспечивающий подачу полученных корневищ на прутковый элеватор. В предлагаемом способе при заготовке посадочного материала и получения корневых отпрысков на участке предварительно скашиваются стебли кипрея узколистного с последующим удалением их с участка. После этого проводится разрезание пласта почвы дисковой бороной путём проезда техники с целью разрезки корневой системы с механическим отделением корневых отпрысков. Проводится дискование в прямом и в поперечном направлении с целью разделения, дезинтеграции корневой системы кипрея узколистного на отдельные отрезки непосредственно на месте произрастания. Глубина обработки почвы 15 см. В результате этой технологической операции корневища кипрея узколистного, находящиеся в почве, разрезаются на отрезки 10-15 см.

Одновременно дискование в этом случае имеет дополнительную функцию снижения плотности почвы рыхлением для разрушения механических связей, исключения сцепления корневищ с почвой и уменьшения усилий и свободного отделения от земли отрезков корневищ при последующей машинной выкопке.

Обсуждение. Предлагаемый механизированный способ заготовки посадочного материала кипрея узколистного (иван-чая) является, на наш взгляд, перспективным. Данная разработка позволяет уйти от ручного труда при получении посадочного материала кипрея узколистного (иван-чая). Разработанный нами способ ранее никем не предлагался.

Выводы. Проведенные нами исследования показали, что зелёная масса кипрея узколистного наряду с традиционными силосными культурами обладает хорошими кормовыми показателями. Поэтому был разработан эффективный способ получения посадочного материала из корневищ кипрея узколистного (иван-чая). Эта инновационная разработка позволяет механизировать заготовку посадочного материала из корневищ кипрея узколистного для возделывания на кормовые цели. Способ получения посадочного материала кипрея узколистного заключается в обработке поля тяжёлой дисковой бороной с разделением корневой системы на отдельные многочисленные отрезки корневых отпрысков с последующим их извлечением. Получен патент РФ № 2799600 «Способ получения посадочного материала кипрея узколистного (иван-чая)». Этот способ особенно актуален для развития кормопроизводства и увеличения животноводческой продукции в северном регионе нашей страны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никифоров В.Е., Никитин Л.А. Технология механизированной заготовки качественного сена в условиях Европейского севера России // АгроЗооТехника. 2022. №.5(3), 4. <https://doi.org/10.15838/alt.2022.5.3.4>
2. Симонов Г.А., Степурина М.А., Варакин А.Т., Саломатин В.А., Зотеев В.С. Влияние минеральной добавки на уровень общего белка и его фракций в сыворотки крови коров // Известия Самарской госуларственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1. С. 73-79. https://doi.org/10.55471/19973225_2022_7_1_73
3. Тяпугин Е, Сереброва И., Симонов Г.. Серебров Д. Пастбища и их роль в кормлении иолочного скота в условиях Европейского севера РФ // Молочное и мясное скотоводство. 2011. № 5. С. 23-24. EDN: NXPSRN
4. Тяпугин Е.А., Симонов Г.А., Зотеев В.С.. Интенсификация кормопроизводства и улучшение качества кормов в условиях Северо-Западного региона России. Вологда: Вологодская ГМХА. 2012. 110 с. EDN: YWPDCY

5. Капустин Н.И. Старковский Б.Н. Иван-чай и его возделывание в культуре // Вопросы совершенствования полевого кормопроизводства и технологий возделывания лесных культур. Юбил. сб. научн. статей к 60-летию факультета агрономии и лесного хозяйства. Вологда-Молочное: Вологодская ГМХА. 2003. С. 27-29. EDN: URPLBF
6. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Влияние фазы вегетации на минеральный состав кипрея узколистного // Молочнохозяйственный вестник. 2021. № 3 (43). С. 77-84. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_77
7. Старковский Б.Н., Симонов Г.А., Хализова З.Н., Симонов А.Г. Технология возделывания кипрея узколистного в условиях Северного региона на кормовые цели // АгроСнабФорум. 2018. № 5 (161). С. 66–68. EDN: MGDТAT
8. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Сравнительный анализ влияния добавки кипрея узколистного при силосовании люцерны изменчивой и козлятника восточного // Научно-практическое обеспечение интенсивного развития животноводства и кормопроизводства на современном этапе. Матер. межд. науч.-практ. конф., посвященной 90-летию со дня основания Казахского НИИ животноводства и кормопроизводства (Алматы, 14-15 июня 2023 г.). Алматы: Казахский НИИТИЖ. 2023. С. 374-379. EDN: EQMZPI
9. Старковский Б.Н., Капустин Н.И. Изучение консервирующего действия зелёной массы кипрея // Перспективные направления научных исследований молодых ученых Северо-Запада России: Юбил. сб. науч. трудов к 75-летию аспирантуры ВГМХА. Вологда-Молочное: ВГМХА. 2001. С. 114-118. EDN: UKAZTZ
10. Старковский Б.Н. Использование иван-чая узколистного в системе кормопроизводства Европейского Севера России // Аграрная наука на современном этапе: состояние, проблемы, перспективы. Матер. I Межд. науч.-практ. конф. (Вологда-Молочное, 28 февраля-01 марта 2018 г.). Вологда: Вологодский научный центр РАН. 2018. С. 207-215. EDN: XOLZDF
11. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Влияние добавки кипрея узколистного на качество силоса из клевера лугового // Передовые достижения науки в молочной отрасли. Матер. Межд. науч.-практ. конф. (Вологда-Молочное, 28 ноября 2021 г.) Вологда: ВГМХА. 2021. С. 93-98. EDN: DDGYUF
12. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Качество силоса, приготовленного из смеси козлятника восточного и кипрея узколистного // Молочнохозяйственный вестник. 2021. № 2 (42). С. 86-94. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_2_86
13. Симонов Г.А., Старковский Б.Н., Симонов А.Г. Состав органических кислот силоса из клевера лугового и его смеси с иван-чаем // Молочнохозяйственный вестник. 2024. № 1 (53). С. 78-88. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2024_1_78
14. Косолапов В.М., Григорьев Н.Г., Фицев А.И., Гаганов А.П. Организация полноценного кормления высокопродуктивных коров (рекомендации). ГНУ ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса. М.: ФГУ РЦСК. 2008. 58 с.
15. Капустин Н.И., Старковский Б.Н. Способ возделывания кипрея узколистного (Иван-чая) на кормовые и лекарственные цели в условиях культуры. Патент на изобретение № 2286047 РФ. Оpubл. 27.10.2006. Заявка № 2004123032/12 от 27.07.2004.
16. Старковский Б.Н. Способ возделывания кипрея узколистного (Иван-чая) для получения зелёной массы на пищевые цели. Патент на изобретение № 2708833 РФ. Оpubл. 11.12.2019. Заявка № 2018129797 от 16.08.2018.

17. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Размножение кипрея узколистного на кормовые цели отпрысками в условиях Вологодской области // Сельское и лесное хозяйство: инновационные направления развития. Сб. науч. трудов Всеросс. науч.-практ. конф. с международным участием (Вологда, Молочное, 08 декабря 2020 г.). Вологда: ВГМХА, 2021. С. 28-32. EDN: JTVVQO
18. Старковский Б.Н., Щекутьева Н.А., Симонов Г.А. Эффективный способ культивирования кипрея узколистного // Молочнохозяйственный вестник. 2023. № 1 (49). С. 109-123. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_1_109
19. Старковский Б.Н., Симонов Г.А. Продуктивность кипрея узколистного при двухукосном использовании // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство. Матер. Межд. конгресса по кормам, посвященного 100-летию ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» (Москва, 21-24 июня 2022 г.). М.: РАКО АПК. 2022. Т. 29 (77). Часть II. С. 148-152. EDN: CPPBIU
20. Старковский Б.Н., Симонов Г.А., Вахрушева В.В. Возделывание кипрея узколистного (*Chamaenerion angustifolium*) в смеси с маральим корнем (*Rhaponticum carthamoides*) (Willd) Jlin // Молочнохозяйственный вестник. 2020. № 3 (39). С. 83-93. EDN: KYHNOX
21. Симонов Г.А., Кочетов В.М., Зотеев В.С., Соловьёв П.И. Комплекс машин и технологические операции, применяемые при заготовке кормов из козлятника восточного // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2010. № 3 (27). С.113-115. EDN: MVNQWF
22. Симонов Г.А., Никифоров В.Е., Старковский Б.Н., Симонов А.Г. Способ получения посадочного материала кипрея узколистного (иван-чая). Патент РФ № 2799600. Заявка № 2022110065, 14.04.2022, опубл. 07.07.2023.

REFERENCES

1. Nikiforov V.E., Nikitin L.A. Technology of mechanized harvesting of quality hay in the conditions of the European North of Russia. AgroZooTekhnika = Agricultural and Livestock Technology. 2022;5(3), 4. (In Russ) <https://doi.org/10.15838/alt.2022.5.3.4>
2. Simonov G.A., Stepurina M.A., Varakin A.T., Salomatin V.V, Zoteev V.S. Effect of mineral supplement on blood serum total protein and its fractions of a cattle. Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin Samara State Agricultural Academy. 2022;1:73-79. (In Russ) https://doi.org/10.55471/19973225_2022_7_1_73
3. Tyapugin E, Serebrova I., Simonov G., Serebrov D. Pastures and their role in feeding of dairy cattle in the conditions of the European North of the Russian Federation. Molochnoe i myasnoe skotovodstvo = Journal of Dairy and Beef Cattle Breeding. 2011;5:23-24. (In Russ) EDN: NXPSRN
4. Tyapugin E.A., Simonov G.A., Zoteev V.S. Intensification of feed production and improvement of feed quality in the North-West region of Russia. Vologda: Vologda State Dairy Farming Academy. 2012. 110 p. (In Russ) EDN: YWPDCY
5. Kapustin N.I. Starkovsky B.N. Willow herb and its cultivation with artificial propagation. In: Issues of Improving Field Feed Production and Technologies for Cultivating Forest Crops. Memorial volume of scientific articles on the 60th anniversary of the Faculty of Agronomy and Forestry. Vologda-Molochnoje: Vologda State Dairy Farming Academy. 2003:27-29. (In Russ) EDN: URPLBF

6. Starkovsky B.N., Simonov G.A. The influence of the phase of the growing season on the mineral composition of the narrow-leaved fireweed. *Molochnokhozyaistvennyi vestnik = Molochnokhozyaistvenny Vestnik*. 2021;3 (43):77-84. (In Russ) https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_77
7. Starkovsky B.N., Simonov G.A., Khalizova Z.N., Simonov A.G. Technology for cultivating narrow-leaved fireweed in the Northern region for feed purposes. *AgroSnaBForum – Agricultural Supply Forum*. 2018; 5 (161):66-68. (In Russ) EDN: MGDtat
8. Starkovsky B.N., Simonov G.A. Comparative analysis of the effect of the addition of narrow-leaved fireweed in the silage of variable alfalfa and eastern goat. In: *Scientific and Practical Support for the Intensive Development of Animal Husbandry and Feed Production at the Present Stage. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. dedicated to the 90th anniversary of foundation of the Kazakh Research Institute of Livestock and Foraging*. Almaty: Kazakh Research Institute of Livestock and Foraging. 2023: 374-379. (In Russ.) EDN: EQMZPI
9. Starkovsky B.N., Kapustin N.I. Study of the preserving effect of the green mass of fireweed. In: *Promising Areas of Scientific Research of Young Scientists of the North-West of Russia. Memorial volume of scientific works for the 75th anniversary of the graduate school of the Vologda State Dairy Farming Academy. Vologda-Molochnoje: Vologda State Dairy Farming Academy*. 2001:114-118. (In Russ.) EDN: UKAZTZ
10. Starkovsky B.N. The use of fireweed in the feed production system of the European North of Russia. In: *Agrarian Science at the Present Stage: Status, Problems, and Prospects. Proc. I Int. Sci. Prac. Conf. (Vologda-Molochnoje, February 28-March 1, 2018)*. Vologda: Vologodsky Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018: 207-215. (In Russ.) EDN: XOLZDF
11. Starkovsky B.N., Simonov G.A. The effect of adding fireweed on the quality of meadow clover silage. In: *Advanced Achievements of Science in the Dairy Industry. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Vologda-Molochnoje, November 28, 2021)*. Vologda: Vologda State Dairy Farming Academy. 2021: 93-98. (In Russ.) EDN: DDGYUF
12. Starkovskiy B.N., Simonov G.A. The quality of silage made from a mixture of fodder galega and french willow. *Molochnokhozyaistvennyi vestnik = Molochnokhozyaistvenny Vestnik*. 2021;2 (42):86-94. (In Russ) https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_2_86
13. Simonov G.A., Starkovskiy B.N., Simonov A.G. Composition of organic acids of meadow clover and its mixture with blooming sally silage. *Molochnokhozyaistvennyi vestnik = Molochnokhozyaistvenny Vestnik*. 2024;1 (53):78-88. (In Russ) https://doi.org/10.52231/2225-4269_2024_1_78
14. Kosolapov V.M., Grigoriev N.G., Fitsev A.I., Gaganov A.P. Organization of complete feeding for high-productive cows (Recommendations). V.R. Williams All-Russian Research Institute of Feeds. Moscow: Federal State Unitary Enterprise Research Center for Animal Husbandry. 2008. 58 p. (In Russ.)
15. Kapustin N.I., Starkovsky B.N. Method of cultivation of fireweed for fodder and medicinal purposes with artificial propagation. Patent for Invention No. 2286047 of the Russian Federation. 2004. (In Russ.)
16. Starkovsky B.N. Method of cultivation of fireweed for producing green mass for food purposes. Patent for Invention No. 2708833 of the Russian Federation. 2018.
17. Starkovsky B.N., Simonov G.A. Propagation of narrow-leaved fireweed for fodder purposes by root-segments in the conditions of the Vologda Region. In: *Agriculture and Forestry: Innovative Directions of Development. Proc. All-Russian Sci. Prac. Conf. with Int. Particip.*

(Vologda, Molochnoje, December 8, 2020). Vologda: Vologda State Dairy Farming Academy. 2021;28-32. (In Russ.) EDN: JTVVQO

18. Starkovskiy B.N., Shchekut'eva N.A., Simonov G.A. An effective way of rosebay willow herb (*Epilobium Angustifolium*) cultivation. Molochnokhozyaistvennyi vestnik = Molochnokhozyaistvennyi Vestnik. 2023;1 (49):109-123. (In Russ) https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_1_109

19. Starkovskiy B.N., Simonov G.A. Productivity of fireweed angustifolia with two-cutting use. Proc. Int. Congress on Feed Production dedicated to the 100th anniversary of V.R. Williams Scientific Research Center for Forage Production and Agroecology (Moscow, June 21-24, 2022). Moscow: Russian Academy of Personnel Support for the Agro-Industrial Complex of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2022; 29 (77), 2:148-152. (In Russ.) EDN: CPPBIU

20. Starkovsky B.N., Simonov G.A., Vakhrusheva V.V. Cultivation of narrow-leaved fireweed (*Chamaenerion angustifolium*) together with maral root (*Rhaponticum carthamoides*) (Willd) Jlin. Molochnokhozyaistvennyi vestnik = Molochnokhozyaistvennyi Vestnik. 2020;3 (39):83-93. (In Russ) EDN: KYHNOX

21. Simonov G.A., Kochetov V.M., Zoteev V.S., Solovyov P.I. Machines complex and technological operations for preparing fodder from caucasian goat's rue. Izvestiya OGAU = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2010;3 (27):113-115. (In Russ.) EDN: MVNQWF

22. Simonov G.A., Nikiforov V.E., Starkovsky B.N., Simonov A.G. Method of obtaining planting material for narrow-leaved cypress (willow herb). Patent No. 2799600 of the Russian Federation. 2022. (In Russ.)

Об авторах	About the authors
Симонов Геннадий Александрович , д-р с.-х. наук, профессор кафедры «Кормление сельскохозяйственных животных», Вологодская молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, г.Вологда, п. Молочное, ул. Шмидта 2, Россия gennadiy0007@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4559-233X	Gennady A. Simonov , DSc (Agriculture), Professor of the Department of Feeding Farm Animals, Vologda State Dairy Farming Academy named after. N.V. Vereshchagin, Vologda, Molochnoje Settlement, Schmidt Str., 2, Russia gennadiy0007@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-4559-233X
Тяпугин Евгений Александрович , д-р биол. наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, «Отдел технологии животноводства», Краснодарский научный центр по зоотехнии и ветеринарии, г. Краснодар, п. Знаменский, 4, Россия tuapuginsergei@mail.ru	Evgeny A. Tyapugin , DSc (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Department of Animal Husbandry Technology, Krasnodar Scientific Center for Animal Science and Veterinary Medicine, Krasnodar, Znamensky Settlement, 4, Russia tuapuginsergei@mail.ru
Никифоров Владислав Евгеньевич , старший научный сотрудник технологического отдела, Вологодский научный центр РАН, СЗНИИМЛПХ, г. Вологда, п. Молочное, ул. Ленина 14,	Vladislav E. Nikiforov , Senior Researcher, Technological Department, Vologda Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, SZNIIMLPX, Vologda, Molochnoje Settlement, Lenin Str., 14, Russia

Россия nfrv_123@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-1175-2526	nfrv_123@mail.ru https://orcid.org/0000-0003-1175-2526
Старковский Борис Николаевич , канд. с.-х. наук, доцент кафедры растениеводства, земледелия и агрохимии, Вологодская молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина, г. Вологда, п. Молочное, ул. Шмидта, 2, Россия bor.2076@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-3251-2214	Boris N. Starkovsky , Cand. Sc. (Agriculture), Associate Professor, Department of Crop Production, Agriculture and Agrochemistry, Vologda State Dairy Farming Academy named after. N.V. Vereshchagin, Vologda, Molochnoje Settlement, Schmidt Str., 2, Russia bor.2076@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-3251-2214
Симонов Александр Геннадьевич , канд. экон. наук, доцен кафедры «Мировая экономика», Унивепситет дружбы народов им. П. Лумумбы, г. Москва, ул. Миклухо- Маклая, д. 6, Россия alexandersimonov@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8497-9564	Alexander G. Simonov , Ph.D. in Economics, Associate Professor, Department of World Economy, P. Lumumba Peoples' Friendship University, Moscow, Miklukho-Maklaya Str., 6, Russia alexandersimonov@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8497-9564
Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.	Stated 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. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest. The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 02.02.2026	Received: 02.02.2026
Одобрена после рецензирования: 10.04.2026	Approved after reviewing: 10.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА СУШЕНОГО ТОПИНАМБУРА

Василий Аркадьевич Бызов¹, Виктор Иванович Старовойтов², Оксана Анатольевна Старовойтова³, Александра Анатольевна Манохина^{4✉},
Владимир Владимирович Литвяк⁵

^{1,2,3}Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, Московская область, Россия

⁴Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

⁵ВНИИ крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха», Московская область, Россия

¹byzov1966@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1918-4455>

²agronir1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

³agronir2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

⁴alexman80@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

⁵besser1974@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Аннотация. С точки зрения минерализации, топинамбур превосходит такие корнеплоды, как картофель, морковь и свекла по концентрации железа, кремния и цинка. Это делает его ценным объектом для исследований в области питания, особенно в контексте разработки функциональных продуктов с длительным сроком хранения, например, сушеного топинамбура. Цель исследования – разработка технологии производства сушеного топинамбура. Поиск литературы осуществляли по базам данных РИНЦ, Google Scholar, ResearchGate, PubMed, по ключевым словам, и словосочетаниям на русском и английском языках. Химический состав и пищевая ценность сушеного топинамбура определялась при помощи стандартизированных методик. Авторами рассмотрена технология производства сушеного топинамбура, которая включает подачу клубней топинамбура в цех для переработки, их мойку и отделение камней; калибровку, инспекцию и очистку топинамбура от кожуры с возможностью применения механического, парового или пароводотермического способов очистки; дочистку, сульфитацию, резку и бланширование топинамбура; сушку подготовленного топинамбура; инспекцию, магнитную сепарацию, упаковку, маркировку и транспортирование сушеного топинамбура потребителю или для хранения на склад готовой продукции. Исследован химический состав и пищевая ценность сушеного топинамбура и установлено, что он содержит в 100 г: 4,7 г белков, 2,2 г жиров, 73,6 г углеводов (56 г крахмала и 19 г сахаров в виде моно- и дисахаридов), 0,6 г органических кислот, 27 г пищевых волокон, 1 г воды, 8 г золы, а также витамины (В₁, В₂, С, Е, РР и др.), макро- и микроэлементы (К, Са, Mg, Na, Р, Fe и др.). Калорийность (пищевая ценность) сухого топинамбура составляет 340 кКал или 1422,56 кДж. Технология сушки топинамбура рекомендуется для внедрения на картофелеперерабатывающих предприятиях России.

Ключевые слова: топинамбур, технология, мойка, очистка, резка, бланширование, сушка.

Для цитирования: Бызов В.А., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А., Литвяк В.В. Технология производства сушеного топинамбура // *АгроЭкоИнженерия*. 2026. № 2(127). С. 38-53 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-38-52>

TECHNOLOGY FOR PRODUCING DRIED JERUSALEM ARTICHOKE

Vasily A. Byzov^Y, Viktor I. Starovoitov², Oksana A. Starovoitova³, Aleksandra A. Manokhina^{4✉}
Vladimir V. Litvyak⁵

^{1,2,3}Russian Potato Research Centre (RCPR), Moscow Region, Russia

⁴Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

⁵All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing –
Branch of Russian Potato Research Centre, Moscow Region, Russia

¹byzov1966@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1918-4455>

²agronir1@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

³agronir2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

⁴alexman80@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9785-1164>

⁵besserk1974@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1456-9586>

Abstract. In terms of micronutrient profile, Jerusalem artichoke surpasses such root vegetables as potatoes, carrots, and beets in iron, silicon, and zinc concentration. This makes it a valuable research target in nutrition, particularly for the development of functional foods with a long shelf life, such as dried Jerusalem artichoke. The study goal was to develop a technology for producing Jerusalem artichoke. Literature sources were searched by keywords and phrases in Russian and English in the Russian Science Citation Index, Google Scholar, ResearchGate, and PubMed databases. The chemical composition and nutritional value of dried Jerusalem artichoke were determined by standardized methods. The authors considered the technology of producing dried Jerusalem artichoke that included the following steps. First, Jerusalem artichoke tubers are supplied to the workshop for processing. Then they are washed and the foreign matter is removed. Then come Jerusalem artichoke calibration, inspection and peeling by mechanical, steam or steam-thermal methods. The next steps are Jerusalem artichoke additional cleaning, sulfite treatment, cutting and blanching. Then the prepared Jerusalem artichoke is dried. The dried product undergoes inspection, magnetic separation, packing, labeling, and transportation to the consumer or for storage in a warehouse of finished products. The study identified the chemical composition and nutritional value of dried Jerusalem artichoke. Per 100 g, the product contained 4.7 g of proteins, 2.2 g of fats, 73.6 g of carbohydrates (56 g of starch and 19 g of sugars in the form of mono and disaccharides), 0.6 g of organic acids, 27 g of dietary fiber, 1 g of water, 8 g of ash. The product also had vitamins (B₁, B₂, C, E, PP, and others) and macro-minerals and trace elements (K, Ca, Mg, Na, P, Fe). The energy value of dry Jerusalem artichoke was 340 kcal or 1422.56 kJ. Jerusalem artichoke drying technology is recommended for introduction at potato processing plants in Russia.

Keywords: Jerusalem artichoke, technology, washing, cleaning, cutting, blanching, drying.

For citation: Byzov V.A., Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A., Litvyak V.V. Technology for producing dried Jerusalem artichoke. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 38-53 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-38-52>

Введение. В настоящее время известна методика проведения исследований по культуре топинамбура [1], а также переработки топинамбура на сироп, особо чистый инулиновый порошок [2] и другие разнообразные технологии глубокой переработки

топинамбура (мытый, очищенный и упакованный топинамбур; БАДы из топинамбура и т.д.) [3].

Среди разнообразных технологий промышленной переработки клубнеплодов, наиболее востребованной из-за своей эффективности и относительной простоты является технология сушки овощей [4, 5]. Среди клубнеплодов наиболее отработана технология сушки картофеля [4, 5]. Современная технология сушки картофеля описана в работе отечественных учёных [5]. Усовершенствованные технологии сушки картофеля показаны в ряде патентов на изобретения [6, 7, 8]. Кроме этого, детально исследовано бланширование картофеля – один из ключевых технологических процессов, обуславливающих качество сушеного картофеля [9, 10].

Большой интерес у зарубежных исследователей вызывает изучение влияния предварительной обработки бланшированием и микроволновой вакуумной сушки на кинетику сушки и физико-химические свойства фиолетового батата [11], а также изучение изменения физико-химических свойств обезжиренных чипсов из батата в процессе микроволновой вакуумной сушки [12].

Полезные вещества овощей можно сохранять в течении длительного периода времени именно в сухом виде. Следует также указать, что использование сушки овощей (например, топинамбура, картофеля и т.д.) для длительного сохранения часто применяется не только в промышленных (производственных) масштабах [5], но и домашних условиях (условиях домашней кухни) [1, 2].

За рубежом активно проводятся исследования влияния методов сушки на химические и функциональные свойства картофеля [13].

Цель исследования – разработка технологии производства сушеного топинамбура.

Материалы и методы. *Объект исследований.* Объектом исследований являлись технологические процессы сушки топинамбура и конечный продукт – сушеный топинамбур.

Поиск литературы. Поиск литературы по проблеме за последние 38 лет (1988-2026 гг.) осуществляли по базам данных РИНЦ, Google Scholar, ResearchGate, PubMed, по ключевым словам и словосочетаниям на русском языке: «топинамбур», «технология», «мойка», «очистка», «резка», «бланширование», «сушка», и на английском языке: «Jerusalem artichoke», «technology», «washing», «cleaning», «cutting», «blanching», «drying».

Методы физико-химических исследований. Определение белка проводили по ГОСТ 34454¹, жира – по ГОСТ 15113.9² и по ГОСТ Р 54686³, углеводов – по ГОСТ 26176⁴, крахмала – по ГОСТ 10574⁵, пищевых волокон – по ГОСТ Р 54014⁶, органических кислот – по ГОСТ 32771⁷, витаминов – по ГОСТ 7047⁸ и ГОСТ Р 54634⁹, золы – по ГОСТ 15113.8¹⁰, макро- и микроэлементов – по ГОСТ 26928¹¹ и ГОСТ 30178¹², влаги – по ГОСТ 15113.4¹³.

¹ ГОСТ 34454-2018 «Продукция молочная. Определение массовой доли белка методом Кьельдаля».

² ГОСТ 15113.9-77 «Концентраты пищевые. Методы определения жира (с Изменениями N 1, 2, 3, 4).

³ ГОСТ Р 54686-2011 «Изделия кондитерские. Метод определения массовой доли жирных кислот».

⁴ ГОСТ 26176-2019 «Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов (с Поправкой)».

⁵ ГОСТ 10574-2016 «Продукты мясные. Методы определения крахмала (Издание с Поправкой)».

⁶ ГОСТ Р 54014-2010 «Продукты пищевые функциональные. Определение растворимых и нерастворимых пищевых волокон ферментативно-гравиметрическим методом (Переиздание)».

⁷ ГОСТ 32771-2014 «Продукция соковая. Определение органических кислот методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии».

Пищевую ценность (калорийность) сухого топинамбура определяли в соответствии коэффициентами (табл. 1)¹⁴.

Таблица 1 Коэффициенты пересчета пищевой ценности

Table 1. Conversion factors for nutritional value

Пищевые вещества	Энергетическая ценность, кКал/г
Белки	4,0
Жиры	9,0
Углеводы	4,0
Пищевые волокна	0,0
Органические кислоты	3,0

Для пересчета в килоджоули, при необходимости, общее количество килокалорий умножается на коэффициент пересчёта 4,184, энергетическая ценность округляется до целых единиц. Оптимизацию очистки топинамбура проводили экспериментально методом визуального контроля. Отработку технологических режимов сушки топинамбура на паровой конвейерной сушилке Г4-КСК-90 проводили с учетом ее технических характеристик и основываясь на необходимых характеристиках конечного продукта – сушеного топинамбура (влажность и органолептические показатели: цвет, вкус, запах). Эксперимент проводился в 5-кратной повторности, результаты статистически обработаны.

Результаты. Нами впервые предлагается инновационная технология глубокой переработки клубней топинамбура с возможностью получения сушеного топинамбура – пищевого продукта длительного хранения.

Общая характеристика продукта. Сушеный топинамбур – пищевой продукт, изготовленный из очищенного и нарезанного кубиками, столбиками или пластинками топинамбура и высушенного до 88-92% сухих веществ. В зависимости от качественных показателей сушеный топинамбур можно выпускать высшим, первым или вторым сортом.

Сырье и материалы. Для изготовления сушеного топинамбура применяют следующее сырье и материалы:

- топинамбур свежий для переработки на продукты питания по ГОСТ 32790¹⁵ или по другому действующему техническому правовому акту;
- пиросульфит натрия технический по ГОСТ 11683¹⁶ или натрия бисульфит технический (водный раствор) по ГОСТ 902¹⁷.

⁸ ГОСТ 7047-55 «Витамины А, С, D, В(1), В(2) и РР. Отбор проб, методы определения витаминов и испытания качества витаминных препаратов».

⁹ ГОСТ Р 54634-2011 «Продукты пищевые функциональные. Метод определения витамина Е (Переиздание)».

¹⁰ ГОСТ 15113.8-77 «Концентраты пищевые. Методы определения золы (с Изменениями N 1, 2)».

¹¹ ГОСТ 26928-86 «Продукты пищевые. Метод определения железа».

¹² ГОСТ 30178-96 «Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов».

¹³ ГОСТ 15113.4-77 «Концентраты пищевые. Методы определения влаги (с Изменением N 1)».

¹⁴ Типсина Н.Н., Варфоломеева Т.Ф. Расчет пищевой ценности хлебобулочных и кондитерских изделий: методические указания. Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. 41 с. EDN: BZJPPH

¹⁵ ГОСТ 32790-2014 «Топинамбур свежий. Технические условия».

¹⁶ ГОСТ 11683-76 (ИСО 3627-76) «Пиросульфит натрия технический. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3)».

Технологический процесс. Технологическая схема производства сушеного топинамбура представлена на рисунке 1, комплекс производства – на рисунке 2.

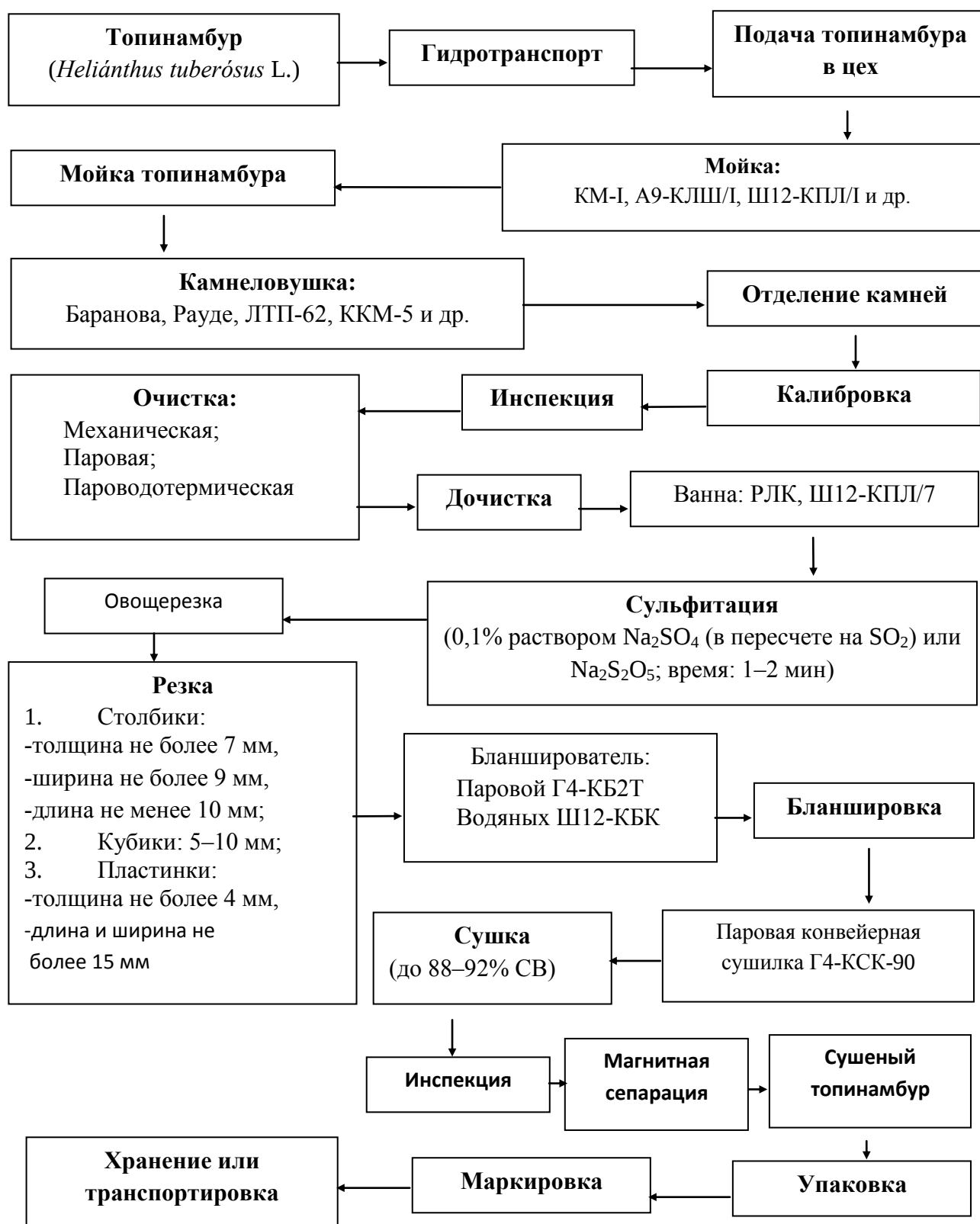
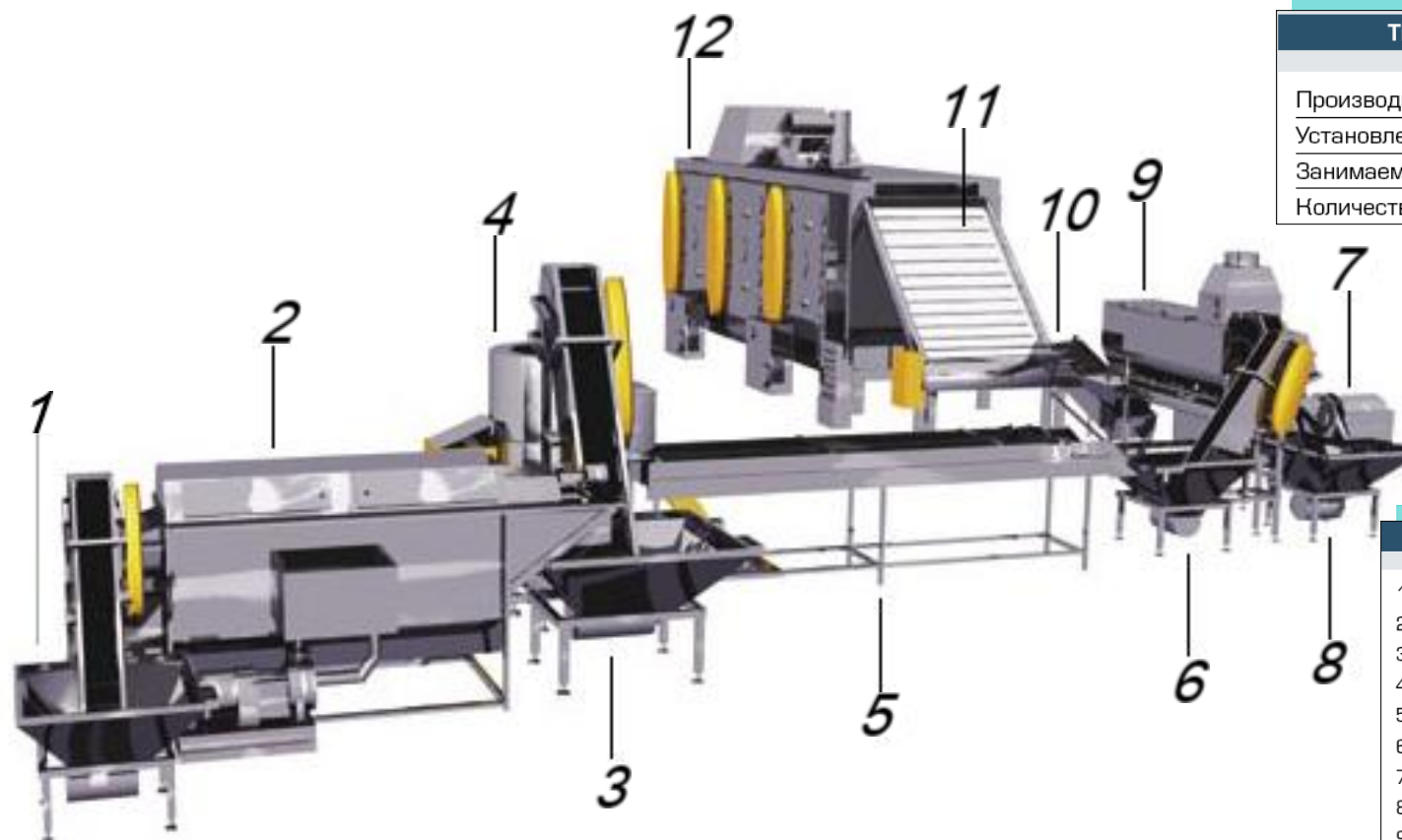


Рис. 1. Технологическая (процессуальная) схема производства сушеного топинамбура

Fig. 1. Technological (process) scheme for the production of dried Jerusalem artichoke

¹⁷ ГОСТ 902-76 «Натрия бисульфит технический (водный раствор). Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3)».



ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Производительность	кг/ч	100
Установленная мощность	кВт/ч	90
Занимаемая площадь	м²	750
Количество обл. персонала	чел.	7

ЭКСПЛИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

1	Конвейер питатель
2	Машина моечная
3	Конвейер питатель
4	Очистительная машина
5	Инспекционный конвейер
6	Конвейер питатель
7	Резательная машина
8	Конвейер питатель
9	Бланширователь (или сульфитационная ванна)
10	Подающий конвейер
11	Конвейер раскладчик
12	Сушилка ленточная

Рис. 2. Комплекс производства сушеного топинамбура

Fig. 2. Production line for dried Jerusalem artichoke

Подача клубней в цех. Топинамбур из овощехранилища подают в цех гидротранспортером или другими видами транспорта.

При подаче топинамбура в цех без применения гидротранспортировки необходимо осуществлять сухую очистку клубней, поступающих на хранение или переработку, от соломы, песка и других загрязнений.

Мойка клубней и отделение камней. Топинамбур моют холодной водой в моечных машинах типа КМ-I, А9-КЛШ/I, Ш12-КПЛ/I и др. для удаления загрязнений с поверхности клубней. Для повышения качества мойки устанавливают последовательно две моечные машины.

Отделение камней осуществляют в моечных машинах, снабженных устройством для отделения камней или в камнеловушках системы Баранова, Рауде, ЛТП-62, ККМ-5 и др.

Калибровка. После мойки топинамбура отделяют мелочь (проход через отверстия калибрователя 5×5 см) и калибруют клубни на калибровочных машинах на три размера по наибольшему диаметру: мелкие клубни – проход через отверстия 6×6 см, средние клубни – проход через отверстия 7×7 см, крупные клубни – сход с машины.

На дальнейшую обработку клубни топинамбура по размерам поступают отдельно.

При очистке паровым способом калибровка топинамбура может не производиться.

Инспекция. Топинамбур инспектируют на ленточном, роликовом или других транспортерах. В процессе инспекции удаляют больные, подгнившие и механически поврежденные клубни топинамбура. Скорость инспекционного транспортера регулируют в зависимости от качества сырья. Отбракованные в процессе инспекции, механически поврежденные клубни используют для производства этилового спирта, на кормовые или технические цели.

Очистка. После калибровки и инспекции топинамбур подают на очистку, которая осуществляется одним из применяемых в промышленности методов: механическим, паровым или пароводотермическим.

1. Механический способ очистки. Механическую очистку топинамбура осуществляют в корнечистках с абразивной поверхностью периодического или непрерывного действия КА-350, КА-600, Ш12-КОУ и др. Продолжительность обработки клубней на корнечистке определяют опытным путем для каждой партии сырья в зависимости от размеров клубней. Отходы используют для переработки на этиловый спирт, на кормовые или технические цели.

2. Паровой способ очистки. Топинамбур очищают паровым способом в очистительных машинах типа А9-КЛШ/30, А9-КЧЯ, ТА 19.00.000М путем обработки паром при избыточном давлении 0,3-1,0 МПа в течение 30-90 секунд с последующим мгновенным сбросом давления. Кожицу с поверхности клубней удаляют в моечно-очистительных машинах типа КМ-I, Ш12-КПЛ/3, Ш12-КПЛ/4. Для более качественной очистки клубней картофеля от кожуры и глазков устанавливают последовательно две моечно-очистительные машины, при этом в первой производят полусухую очистку с подачей незначительного количества воды, а во второй – мокрую очистку проточной водой.

Отходы, полученные при паровой очистке топинамбура, используют на кормовые или технические цели.

3. Пароводотермический способ очистки. При пароводотермическом способе очистку топинамбура производят на паротермическом агрегате по следующим технологическим режимам:

3.1) для мелких клубней: $\frac{2-1-1-4}{2,0-22-75-25}$

3.2) для средних клубней: $\frac{2-2-1-8}{2,0-22-75-25}$

3.3) для крупных клубней: $\frac{2-2-1-15}{2,0-18-75-25}$,

где в числителе указаны последовательно:

- продолжительность нагрева топинамбура в автоклаве, мин;
- продолжительность бланширования топинамбура в автоклаве (при избыточном давлении), мин;
- продолжительность доводки топинамбура в автоклаве (при закрытых паровых вентилях, под давлением), мин;
- продолжительность окончательной доводки топинамбура в автоклаве (при открытых вентилях спуска конденсата), мин.

В знаменателе указаны последовательно:

- давление пара в автоклаве при бланшировании топинамбура, МПа;
- число оборотов барабана моечно-очистительной машины, об/мин;
- температура воды в ванне термостата, °С;
- температура воды в ванне моечно-очистительной машины, °С.

Отходы при пароводотермическом способе очистки используют на кормовые или технические цели.

Дочистка. Очищенный одним из указанных способов топинамбур дочищают вручную, удаляя темные пятна, глазки, остатки кожицы и др.

Сульфитация. Очищенные клубни топинамбура сульфитируют в ваннах типа РЛК, Ш12-КПЛ/7 и др. 0,1% раствором бисульфита натрия (в пересчете на SO₂) или пиросульфита натрия в течение 1-2 мин.

Для получения 0,1% раствора бисульфита натрия на каждый литр раствора расходуют 2 г метабисульфита натрия или 5,3 г водного раствора бисульфита натрия 30% концентрации.

Резка. Резку топинамбура осуществляют на овощерезках на столбики толщиной не более 7 мм, шириной не более 9 мм и длиной не менее 10 мм, кубики с размером граней 5-10 мм и пластинки толщиной не более 4 мм, длиной и шириной не более 15 мм.

После резки производят отсев мелочи на сотрясательных ситах с размером ячеек 4 мм и удаление мелких частиц с поверхности частиц нарезанного топинамбура при помощи душевых устройств (для топинамбура, очищенного пароводотермическим способом душ не применяют).

Бланширование. При механическом и паровом способах очистки, нарезанный и промытый топинамбур бланшируют в паровых бланширователях типа Г4-КБ2Т или в водяных бланширователях Ш12-КБК. В паровом бланширователе нарезанный топинамбур после промывки подвергают шпарке паром при температуре 95-99 °С в растворе, содержащем топинамбуровую крошку, хлористый натрий и хлористый калий, взятые в соотношении (0,9-1,5):(0,5-0,8):(0,1-0,2). Указанную смесь вводят в количестве 1,5-2,5% к массе воды. Полноту бланширования устанавливают реакцией на активность наиболее

стойкого окислительного фермента – пероксидазы. Продолжительность термической выдержки – 3,5-4,5 мин.

Сушка. Сушку топинамбура производят в паровых конвейерных сушилках до влажности не более 12% и не более 8%.

Режимы сушки топинамбура, нарезанного столбиками сечением 6×7 мм, кубиками 8×8×8 мм или пластинами 10×10×4 мм, на паровой конвейерной сушилке Г4-КСК-90 представлены в таблице 2.

Таблица 2 Режимы сушки топинамбура на паровой конвейерной сушилке
Г4-КСК-90

Table 2. Drying modes of Jerusalem artichoke on G4-KSK-90 steam conveyor dryer

Параметры	Режимы сушки на пятиленточной сушилке Г4-КСК-90 до массовой доли влаги	
	не более 12%	не более 8%
Загрузка топинамбура в сушилку, кг/мин	15,5	11,0
Нагрузка на первую ленту, кг/м ²	26,5	26,5
<i>Скорость движения лент, м/мин:</i>		
I	0,29	0,21
II	0,24	0,17
III	0,25	0,18
IV	0,18	0,12
V	0,16	0,12
<i>Температура воздуха над лентами, °C</i>		
I	55–60	60–65
II	65–70	70–75
III	65–70	65–70
IV	55–60	55–60
V	40–45	40–45
Продолжительность сушки, мин	210	300
Расход воздуха, м ³ /ч	45000	45000

Инспекция. Высушенный топинамбур поступает на инспекцию, где отбраковывают дефектные частицы продукта: подгоревшие, с черными или серыми пятнами, с остатками глазков и кожицы, деформированные.

Магнитная сепарация. Для удаления металлопримесей сушеный топинамбур пропускают через магнитный сепаратор.

Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. В дальнейшем сушеный топинамбур упаковывают, маркируют и при необходимости транспортируют или/и хранят.

Химический состав и пищевая ценность конечного продукта – сушеного топинамбура. Химический состав и калорийность 100 г сушёного топинамбура представлены в таблице 3.

Таблица 3 Химический состав и калорийность 100 г сушёного топинамбура
Table 3 Chemical composition and nutritional value per 100 g of dried Jerusalem artichoke

Наименование показателя	Значение	Наименование показателя	Значение
Белки, г	4,7	кальций (Ca), мг	110
Жиры, г	2,2	кремний (Si), мг	46
Углеводы, г	73,1	магний (Mg), мг	70
Органические кислоты, г	0,6	натрий (Na), мг	17
Пищевые волокна, г	27	фосфор (P), мг	465
Вода (H ₂ O), г	1	Микроэлементы:	
Зола, г	8	алюминий (Al), мкг	4800
Витамины:		ванадий (V), мкг	58
витамин А, мкг	11	железо (Fe), мг	2
β-каротин, мг	0,4	литий (Li), мкг	2
витамин В ₁ (тиамин), мг	0,4	никель (Ni), мкг	14
витамин В ₂ (рибофлавин), мг	0,3	рубидий (Rb), мкг	33
витамин В ₄ (холин), мг	170	селен (Se), мкг	4
витамин В ₅ (пантотеновая кислота), мг	2,2	хром (Cr), мкг	20
витамин С (аскорбиновая кислота), мг	35	Усвояемые углеводы:	
витамин Е (α-токоферол), мг	1	крахмал декстрины, г	56
витамин Н (биотин), мкг	2	моно- и дисахариды (сахара), г	19
витамин К (филлохинон), мкг	0,5	Насыщенные жирные кислоты, г:	0,8
витамин РР, мг	9	Полиненасыщенные жирные кислоты:	
ниацин, мг	7	омега-3 жирные кислоты, г	0,4
Макроэлементы:		омега-6 жирные кислоты, г	0,005
калий (K), мг	1100	Калорийность, кКал	340

В результате изучения готового продукта – сушеного топинамбура выяснено (табл. 3), что сушеный топинамбур содержит в 100 г: 4,7 г белков, 2,2 г жиров, 73,6 г углеводов (56 г крахмала и 19 г сахаров в виде моно- и дисахаридов), 0,6 г органических кислот, 27 г пищевых волокон, 1 г воды, 8 г золы, а также витамины (В₁, В₂, С, Е, РР и др.), макро- и микроэлементы (К, Са, Mg, Na, P, Fe и др.). Калорийность (пищевая ценность) сухого топинамбура составляет 340 кКал или 1422,56 кДж.

Обсуждение. Разработанная нами технология производства сушеного топинамбура по технологическим этапам (подача клубней, мойка и отделение камней, калибровка, инспекция, очистка от кожуры (механическим или паровым, или пароводотермическим способом), дочистка, сульфитация, резка, бланширование, сушка подготовленных клубней, инспекция сушеного продукта, магнитная сепарация, упаковка, маркировка, транспортирование потребителю или для хранения на склад готовой продукции) и

рекомендуемому к применению технологическому оборудованию очень близка к классической технологии получения сушеного картофеля [4, 5].

В дальнейшем возможна оптимизация разработанной нами технологии получения сушеного топинамбура в виде разработки нового технологического оборудования специально для глубокой переработки клубней топинамбура, имеющих часто неправильную форму в отличие от преимущественно округлой формы клубней картофеля [2, 3, 5].

Технология промышленного производства сушеного топинамбура во многом позволит устранить самый главный недостаток топинамбура – его плохую лежкость и быструю порчу при хранении [1, 3]. При этом в сушеном топинамбуре сохраняются все важные ингредиенты (белки, жиры, углеводы, витамины, минералы, органические кислоты, пищевые волокна и различные биологически активные вещества).

Также промышленная технология производства сушеного топинамбура позволит существенно расширить отечественный ассортимент полезных пищевых продуктов из топинамбура, которые можно применять в качестве полуфабрикатов быстрого приготовления [3].

Описанная технология глубокой переработки топинамбура – технология производства сушеного топинамбура рекомендуется как перспективная для широкого внедрения на предприятиях Российской Федерации [1, 2, 3]. Наиболее эффективным внедрение технологии получения сушеного топинамбура будет на картофелеперерабатывающих и овощесушильных предприятиях.

Заключение. Технологию промышленного производства сушеного топинамбура можно рассматривать как ряд последовательно осуществляемых технологических стадий: подача клубней топинамбура в цех для переработки, мойка клубней топинамбура и отделение камней, калибровка топинамбура, инспекция топинамбура, очистку топинамбура от кожуры (с возможностью применения способов очистки: механический или паровой, или пароводотермический), дочистка топинамбура, сульфитация топинамбура, резка топинамбура, бланширование топинамбура, сушка подготовленного топинамбура, инспекция сушеного топинамбура, магнитная сепарация сушеного топинамбура, упаковка сушеного топинамбура, маркировка сушеного топинамбура, транспортированием сушеного топинамбура потребителю или для хранения на склад готовой продукции.

Установлено, что сушеный топинамбур содержит в 100 г: 4,7 г белков, 2,2 г жиров, 73,6 г углеводов (56 г крахмала и 19 г сахаров в виде моно- и дисахаридов), 0,6 г органических кислот, 27 г пищевых волокон, 1 г воды, 8 г золы, а также витамины (В₁, В₂, С, Е, РР и др.), макро- и микроэлементы (К, Са, Mg, Na, Р, Fe и др.). Калорийность (пищевая ценность) сухого топинамбура составляет 340 кКал или 1422,56 кДж.

Технология производства сушеного топинамбура рекомендуется как перспективная для внедрения на предприятиях России, занимающихся переработкой топинамбура.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А. Методика проведения исследований по культуре топинамбура // Агроинженерия. 2018. № 1. С. 7-14. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-7-14>
2. Старовойтов В.И., Манохина А.А., Старовойтова О.А., Бызов В.А., Воронов Н.В. Эффективность технологии переработки топинамбура на сироп и особо чистый

инулинсодержащий порошок // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 4 (125). С. 22-34. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-4125-22-34>

3. Бызов В.А., Андреев Н.Р., Литвяк В.В., Старовойтов В.И., Жевора С.В., Лукин Н.Д., Пучкова Т.С., Пихало Д.М. Топинамбур: история, технологии и перспективы; Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья: коллективная монография. М.: КнигИздат, 2024. 442 с. EDN: GISFXP

4. Ловкис З.В., Литвяк В.В., Петюшев Н.Н., Почицкая И.М. Картофель и картофелепродукты: наука и технология: коллективная монография. Минск: Беларуская навука, 2008. 537 с. EDN: RYOWVP

5. Литвяк В.В., Лукин Н.Д., Симаков Е.А., Дегтярев В.А., Кузина Л.Б., Кузьмина Л.Г. Картофель и технологии его глубокой переработки: коллективная монография. М: ФЛИНТА. 2021. 896 с. EDN: QXYENR

6. Остриков А.Н., Калашников Г.В., Калабухов В.М., Зуев И.А., Шевцов С.А. Способ производства сушеного картофеля. Патент на изобретение РФ № 2254001; опубл. 20.06.2005. Бюл. № 17. Заявка № 2003138187/13 от 31.12.2003. EDN: LPYFQV

7. Харнас В.И. Способ производства сушеного картофеля. Патент на изобретение РФ № 2712498; опубл. 29.01.2020. Бюл. № 4. Заявка № 2019120337 от 27.06.2019.

8. Дианов Л.В., Смелик В.А., Юнкин П.А., Карповский Д.А. Аэрожелоб для сушки сыпучих материалов Патент на изобретение РФ № 2259527; опубл. 27.08.2005. Бюл. № 24. Заявка № 2003116218/06 от 02.06.2003. EDN SPBKPR

9. Зубова Е.В., Залетова Т.В. Влияние предварительной обработки сырья на качество сушеного картофеля // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы II науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Краснодар, 20 марта 2016 г.). Краснодар: КубГАУ. 2016. С. 248-252. EDN: VVKSGD

10. Бабеня В.Ю., Мазур А.М., Кожушкова С.В., Ободзинский А.А. Способ бланширования при производстве сушеных овощей. Авторское свидетельство SU № 1517917 опубл. 30.10.1989. Бюл. 40. Заявка № 4357784 от 04.01.1988. EDN: UKUDKI

11. Marzuki S.U., Pranoto Y., Khumsap T., Nguyen L.T. Effect of blanching pretreatment and microwave-vacuum drying on drying kinetics and physicochemical properties of purple-fleshed sweet potato // Journal of Food Science and Technology. 2021. Vol. 58. P. 2884-95. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04789-5>

12. Monteiro R.L., de Moraes J.O., Domingos J.D., Carciofi B.A.M., Laurindo J.B. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 63, 102317. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102317>

13. Kolawole F.L., Balogun M.A., Usman F.D. and Akeem S.A. Effect of drying methods on the chemical and functional properties of potato (*Solanum tuberosum*) and sweet potato (*Ipomoea batatas*) varieties // Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment. 2016. Vol. 12, No. 4. P. 151–156.

REFERENCES

1. Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Manokhina A.A. Methodology of doing research on jerusalem artichoke crops. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering* (Moscow). 2018;1:7-14. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-7-14>
2. Starovoitov V.I., Manokhina A.A., Starovoitova O.A., Byzov V.A., Voronov N.V. The effectiveness of Jerusalem artichoke processing technology for syrup and extra pure inulin-containing powder. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2025;4(125):22-34.(In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2025-4125-22-34>
3. Byzov V.A., Andreev N.R., Litvyak V.V., Starovoitov V.I., Zhevora S.V., Lukin N.D., Puchkova T.S., Pikhalo D.M. Jerusalem Artichoke: History, Technologies and Prospects: multi-authored monograph. Moscow: KnigIzdat Publ. 2024. 442 p. (In Russ.) EDN: GISFXP
4. Lovkis Z.V., Litvyak V.V., Petyushev N.N., Pochitskaya I.M. Potatoes and Potato Products: Science and Technology: multi-authored monograph. Minsk: Belaruskaya Navuka. 2008. 537 p. EDN: RYOWVP
5. Litvyak V.V., Lukin N.D., Simakov E.A., Degtyarev V.A., Kuzina L.B., Kuzmina L.G. Potatoes and Technologies of Its Multi-Level Processing: joint monograph. Moscow: FLINT. 2021. 896 p. (In Russ.) EDN: QXYEHR
6. Ostrikov A.N., Kalashnikov G.V., Kalabukhov V.M., Zuev I.A., Shevtsov S.A. Method of production of dried potatoes. Patent on invention of the Russian Federation No. 2254001. (In Russ.) 2003. EDN: LPYFQV
7. Kharnas V.I. Method of production of dried potatoes. Patent on invention of the Russian Federation No. 2712498. 2019. (In Russ.)
8. Dianov L.V., Smelik V.A., Yunkin P.A., Karpovsky D.A. An air dryer for drying bulk materials. Patent on invention of the Russian Federation No. 2259527. 2003. (In Russ.) EDN: SPBKPR
9. Zubova E.V., Zaletova T.V. The effect of pretreatment of raw materials on the quality of dried potatoes. In: *Modern Aspects of Production and Processing of Agricultural Products: Proc. II Sci. Prac. Conf. of students, postgraduates and young scientists* (Krasnodar, March 20, 2016). Krasnodar: KubGAU. 2016: 248-252. (In Russ.) EDN: VVKSGD
10. Babenya V.Yu., Mazur A.M., Kozhushkova S.V., Obodzinskij A.A. Method of blanching when producing dry vegetables. Authorship Certificate SU No. 1517917. 1988.(In Russ.) EDN: UKUDKI
11. Marzuki S.U., Pranoto Y., Khumsap T., Nguyen L.T. Effect of blanching pretreatment and microwave-vacuum drying on drying kinetics and physicochemical properties of purple-fleshed sweet potato. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58:2884-95. (In Eng.) <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04789-5>
12. Monteiro R.L., de Moraes J.O., Domingos J.D., Carciofi B.A.M., Laurindo J.B. Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;63, 102317. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102317>
13. Kolawole F.L., Balogun M.A., Usman F.D., Akeem S.A. Effect of drying methods on the chemical and functional properties of potato (*Solanum tuberosum*) and sweet potato (*Ipomoea batatas*) varieties. *Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment*. 2016. Vol. 12(4). P. 151-156.

Об авторах:	About the authors:
Василий Аркадьевич Бызов кандидат сельскохозяйственных наук Врио директора ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, д. 23, литер В byzov1966@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-1918-4455	Vasily A. Byzov Cand. Sc.(Agriculture), Acting Director, Russian Potato Research Centre (RCPR) Lorkh Str., 23, Building V, Kraskovo, Lyubertsy District, Moscow Region, 140051, Russian Federation byzov1966@yandex.ru https://orcid.org/0000-0003-1918-4455
Виктор Иванович Старовойтов д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, отдел агротехнологий ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, д. 23, литер В agronir1@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9365-7631	Viktor I. Starovoitov Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Department of Agricultural Technologies Russian Potato Research Centre (RCPR) Lorkh Str., 23, Building V, Kraskovo, Lyubertsy District, Moscow Region, 140051, Russian Federation agronir1@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-9365-7631
Оксана Анатольевна Старовойтова д-р с.-х. наук, главный научный сотрудник, отдел агротехнологий ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», 140051, Российская Федерация, Московская область, Люберецкий район, п. Красково, ул. Лорха, д. 23, литер В agronir2@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8293-6579	Oksana A. Starovoitova Doctor of Agricultural Sciences, Chief Scientific Officer Department of Agricultural Technologies Russian Potato Research Centre (RCPR) Lorkh Str., 23, Building V, Kraskovo, Lyubertsy District, Moscow Region, 140051, Russian Federation agronir2@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-8293-6579
Александра Анатольевна Манохина д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры механизации сельского хозяйства ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49 alexman80@list.ru https://orcid.org/0000-0002-9785-1164	Aleksandra A. Manokhina Doctor of Agricultural Sciences, Docent, Professor of the Department of Agricultural Mechanization, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation alexman80@list.ru https://orcid.org/0000-0002-9785-1164
Владимир Владимирович Литвяк д-р техн. наук, канд. хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории по испытаниям и внедрению модифицированных крахмалов	Vladimir V. Litvyak DSc (Engineering), PhD (Chemistry), Docent, leading researcher, Laboratory for Testing and Implementation of Modified Starches, All- Russian Research Institute of Starch and

Всероссийского НИИ крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», ул. Некрасова, 11, пос. Красково, Люберецкий р-н, Московская обл., 140051, Российская Федерация besserk1974@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1456-9586	Starch-Containing Raw Materials Processing – Branch of Russian Potato Research Centre, 11, Nekrasov Str., Kraskovo, Lyuberetsky District, Moscow region, 140051, Russian Federation besserk1974@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1456-9586
Заявленный вклад авторов В.А. Бызов – проведение исследований, формальный анализ, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов. В.И. Старовойтов – научное руководство исследованием, формулирование основных направлений исследования, цели и задач, формулирование общих выводов. В.В. Литвяк – методология проекта, проведение исследований, формальный анализ, формулирование общих выводов. О.А. Старовойтова – методология проекта, проведение исследований, формальный анализ, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование. А.А. Манохина – анализ литературных источников для постановки цели, создание черновика рукописи, формулирование общих выводов, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.	Authors' contribution V.A. Byzov– conducting research, formal analysis, creating a draft of the manuscript, formulating general conclusions. V.I. Starovoitov – scientific management of research, formulation of the main directions of research, goals and objectives, formulation of general conclusions. V.V. Litvyak – project methodology, research, formal analysis, formulation of general conclusions. O.A. Starovoitova – project methodology, research, formal analysis, formulation of general conclusions, creation of the final version (revision) of the manuscript and its editing. A.A. Manokhina – analysis of literary sources for setting goals, creation of a draft manuscript, formulation of general conclusions, creation of the final version (revision) of the manuscript and its editing.
Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 21.01.2026	Received: 21.01.2026
Одобрена после рецензирования: 04.04.2026	Approved after reviewing: 04.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДЛИНЫ ПРИЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА ЧИЗЕЛЬНОГО ОРУДИЯ С ПОДАЧЕЙ В РАБОЧИЕ ОРГАНЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЖАТОГО ВОЗДУХА

Ильдар Раисович Рахимов^{1✉}, Денис Альбертович Ялалетдинов², Альберт
Исмагилович Сулейманов³, Александр Александрович Васько⁴

¹Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

²ООО «Челябинский компрессорный завод», Челябинск, Россия

^{3,4}Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

¹ildarr@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

²chkz@chkz.ru

³al@chkz.ru

⁴seo@chkompressor.ru

Аннотация. В работе исследованы параметры чизельного орудия с подачей пульсирующего сжатого воздуха, являющейся одним из актуальных направлений в повышении эффективности обработки почвы. Способ агрегатирования орудия с трактором и конструкция прицепного устройства оказывают немаловажное влияние на устойчивость и эффективность работы агрегата. Особенно важно учесть параметры компрессорной установки и системы подачи пульсирующего сжатого воздуха на вновь разрабатываемом орудии. Цель исследования – определить значения сил, действующих на чизельное орудие с подачей пульсирующего сжатого воздуха в рабочие органы в горизонтальной плоскости и обосновать параметры прицепного устройства для обеспечения устойчивости хода орудия. Составлена расчетная схема чизельного орудия с подачей пульсирующего сжатого воздуха в горизонтальной плоскости. На основе изучения сил, действующих на чизельное орудие в горизонтальной плоскости, определены значения возмущающего момента, вызывающие колебания орудия и момента сопротивления, удерживающего орудие в направлении движения агрегата, с использованием которых составлены дифференциальные уравнения колебаний орудия в горизонтальной плоскости. При известных значениях возмущающего момента построены зависимости угла колебания орудия от расстояния от точки прицепа до центра сопротивления орудия. Результаты расчетов показали, что колебания орудия в горизонтальной плоскости при максимальных значениях возмущающих сил при различной длине прицепного устройства не превышают 0,09 м, при допустимых $\pm 0,15$ м, что указывает на хорошую устойчивость хода чизельного орудия в горизонтальной плоскости. Это дает возможность выбора длины прицепного устройства из условий отсутствия наезда задних колес трактора на раму орудия на поворотах. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и эксплуатации современных чизельных орудий с системой подачи сжатого воздуха.

Ключевые слова: чизельное орудие, прицепное устройство, рабочий орган, возмущающий момент, момент сопротивления, устойчивость, уравнение колебаний, сжатый воздух

Для цитирования: Рахимов И.Р., Ялалетдинов Д.А., Сулейманов А.И., Васько А.А. Теоретическое обоснование длины прицепного устройства чизельного орудия с подачей в рабочие органы пульсирующего сжатого воздуха // АгроЭкоИнженерия. 2026. №2 (127) С. 53-66. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-53-65>

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE TRAILING DEVICE LENGTH OF A CHISEL IMPLEMENT WITH PULSATING COMPRESSED AIR SUPPLY TO THE WORKING ELEMENTS

Ildar R. Rakhimov^{1✉}, Denis A. Yalaletdinov², Albert I. Suleymanov³, Alexander A. Vasko⁴

¹South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk Compressor Plant, Chelyabinsk, Russia

³South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

¹ildarr@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

²chkz@chkz.ru

³al@chkz.ru

⁴seo@chkompressor.ru

Abstract. The study examines the parameters of a chisel implement equipped with a pulsating compressed air supply – a promising approach to enhancing soil cultivation efficiency. The method of tractor-implement coupling and the trailing hitch design have a significant effect on the stability and efficiency of the combined system. It is particularly important to consider the parameters of the compressor unit and the pulsating compressed air supply system for newly developed implements. The purpose of the study was to determine the forces acting on the chisel implement with pulsating compressed air supply in the horizontal plane and to justify the parameters of the trailing device to ensure the stability of the implement's travel. A computational model for a chisel implement with a pulsating compressed air supply in the horizontal plane was developed. The study considered the forces acting on the chisel implement in the horizontal plane and determined the values of the disturbing moment causing the implement to oscillate and the resistance moment maintaining the implement's alignment with the direction of travel. Using these values, the study developed differential equations describing the oscillations of the implement in the horizontal plane. With the known values of the disturbing moment, the dependences of the implement oscillation angle on the distance from the trailing point to the implement's center of resistance were plotted. Calculation results showed that horizontal implement oscillations at maximum disturbing force values for various hitch lengths did not exceed 0.09 m, with an acceptable oscillation of ± 0.15 m, indicating good horizontal stability of the chisel implement. This allows for the selection of the trailing device's length to ensure that the tractor's rear wheels do not collide with the implement frame during turns. The study results can be used in the design and operation of modern chisel implements with compressed air supply systems.

Keywords: chisel implement, trailing device, working body, disturbing moment, resistance moment, stability, oscillation equation, compressed air

For citation: Rakhimov I.R., Yalaletdinov D.A., Suleimanov A.I., Vas'ko A.A. Theoretical justification of the trailing device length of a chisel implement with pulsating compressed air supply to the working elements. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 53-66 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-53-65>

Введение. *Актуальность темы.* Чизельные орудия, выпускаемые в последние годы, различаются большим разнообразием по конструктивному исполнению. Они отличаются по способу агрегатирования с трактором, по схеме расположения рабочих органов на раме орудия, по способу крепления рабочих органов на раме орудия, по способу регулирования глубины обработки, по конструкции дополнительных приспособлений для выравнивания поверхности поля, по величине металлоемкости конструкции и т.д. На энергетические и агротехнические показатели работы, на производительность агрегата и на металлоемкость

чизельного орудия оказывает основное влияние способ агрегатирования орудия с трактором, который определяет характер протекания отдельных элементов технологического процесса работы агрегата [1].

Одним из видов нового конструктивного исполнения чизельного орудия, улучшающего качество обработки почвы, является применение пульсирующего сжатого воздуха при обработке почвы. В работе Wendling J.I. и Bernhardt H. [2] представлены результаты испытаний экспериментального плуга со встроенными в лемех и отвал соплами для нагнетания воздуха. Авторы экспериментально подтвердили, что подача воздуха между металлом и почвой создает эффект смазки, снижая коэффициент внешнего трения. Полевые испытания на песчаных почвах показали снижение тягового сопротивления до 40%. Также в работе [3] ученые изучали подачу сжатого воздуха через наконечник роторного чизеля. Их исследования показали, что нагнетание воздуха под давлением создает в почве полости, что приводит к падению крутящего момента и тягового сопротивления практически до нуля, однако такой метод требует тщательного изучения влияния на структурное состояние почвы.

Большой вклад в изучения процесса воздействия сжатого воздуха на почву внесли Лобачевский Я.П. и Старовойтов С.И. [4]. В их работах представлены результаты моделирования воздействия струи сжатого воздуха на поверхностный слой почвы. Доказан положительный эффект применения сжатого воздуха при обработке почвы улучшением крошения, снижением тягового сопротивления.

В последние годы ведутся работы по изучению процесса воздействия сжатого воздуха на почву [5, 6]. Исследованиями установлено, что применение сжатого воздуха позволяет снизить тяговое сопротивление орудия до 20%, улучшить агротехнические показатели почвы в результате аэрационного воздействия сжатого воздуха на почву [7]. Несмотря на наличие исследований в этой области, нет работ по разработке чизельного орудия с системой подачи пульсирующего сжатого воздуха.

При подаче пульсирующего сжатого воздуха одновременно с обработкой почвы к вышеперечисленным параметрам чизельных орудий добавляется способ привода и место установки компрессора и ресивера на орудии, способ управления и регулирования параметров сжатого воздуха.

При проектировании нового чизельного орудия с подачей в рабочие органы пульсирующего сжатого воздуха должны быть выполнены требования ко всем элементам технологического процесса работы агрегата. Невыполнение требований хотя бы одного элемента технологического процесса ведет к неработоспособности всего орудия.

Одним из немаловажных критериев является конструкция и параметры прицепного устройства.

На основании вышеизложенного, при разработке чизельного орудия с системой подачи сжатого воздуха следует уделить особое внимание обоснованию и разработке конструкции прицепного устройства.

Цель работы – определить значения сил, действующих на чизельное орудие с подачей пульсирующего сжатого воздуха в рабочие органы в горизонтальной плоскости и обосновать параметры прицепного устройства для обеспечения устойчивости хода орудия.

Материалы и методы. Полунавесные и прицепные чизельные орудия присоединяются к трактору через прицепное устройство длиной L_{Π} , м, в точке O_1 прицепа. В процессе работы под воздействием силы тяги трактора P , кН, орудие движется вперед по оси X с постоянной скоростью v_a , и одновременно из-за изменения горизонтальных сил сопротивления отдельных рабочих органов R_{xi} , кН, опорных колес Q_{xi} , кН, катков R_{xki} , кН, и реакции почвы на действие сжатого воздуха, P_s , кН, орудие совершает колебания в горизонтальной плоскости XOY на угол $\theta(t)$, град (рис. 1).

Таким образом, в процессе работы движение чизельного орудия в горизонтальной плоскости можно разложить на переносное по оси X со скоростью v_a , м/с и на относительное вокруг точки O_1 с относительной скоростью v_u , м/с на угол $\theta(t)$, град [8, 9].

Тогда суммарные силы сопротивления, действующие с левой стороны орудия

$$R_{xl}(t) = \sum R_{xil}(t) + Q_{x1}(t) + R_{xk1}(t) + P_{el},$$

и с правой стороны

$$R_{xnp}(t) = \sum R_{xinp}(t) + Q_{x2}(t) + R_{xk2}(t) + P_{enp},$$

меняется по величине, что ведет к появлению возмущающего момента $M_0(t)$, кНм, равной:

$$M_0(t) = R_{xl}(t) \cdot B_l - R_{xnp}(t) B_{np}, \quad (2)$$

где B_l и B_{np} – плечо действия суммарных сил, действующих, соответственно, с левой и правой стороны, м.

При условии, что орудие симметрическое, $B_l = B_{np} = B/4$. Тогда

$$M_0(t) = [R_{xl}(t) - R_{xnp}(t)] B/4, \quad (3)$$

где B – ширина захвата чизельного орудия, м.

Своим действием возмущающий момент $M_0(t)$, кНм, вызывает колебание чизельного орудия в горизонтальной плоскости на угол $\theta(t)$, величина которой зависит от разницы сил сопротивления, действующих на отдельные чизельные рабочие органы, опорные колеса, катки и реакции почвы на воздействие сжатого воздуха P_6 , вызывающих момент сопротивления $M_c(t)$, кНм, колебанию орудия. Величину $M_c(t)$, кНм, можно определить по формуле:

$$M_c(t) = \sum_{i=1}^n F_{cmi} L_{um} + \sum Q_{yi} L_{kol} + \sum R_{yki} L_{kat} + P_6 n L_{um}, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^n F_{cmi}$ – сила смятия почвы при колебаниях орудия под действием возмущающего момента $M_0(t)$ в горизонтальной плоскости, кН;

$$\sum_{i=1}^n F_{cmi} = b_{cm} a \sigma_{cm} n,$$

где b_{cm} – ширина стойки чизельного рабочего органа, м;

a – глубина отработки, м;

σ_{cm} – коэффициент смятия почвы, кН/м²;

n – количество рабочих органов, шт;

P_6 – сила импульса пульсирующего сжатого воздуха, действующих в боковые стороны, кН;

Q_{yki} – сила сопротивления опорных колес развороту чизельного орудия в горизонтальной плоскости, кН.

Значение силы Q_{yi} зависит от вертикальных сил Q_{zi} , воспринимаемых опорными колесами в процессе работы от физико-механических свойств почвы, которые определяют величину колеи колеса и величину коэффициента смятия почвы и от характеристики колеса, определяющих поперечную деформацию шины. Однако из-за отсутствия таких данных в литературе примем:

$$\sum Q_{yi} = Q_{zi} f_n n_k,$$

где f_n – коэффициент трения между колесом и почвой; примем $f_n = 0,3$;

n_k – количество колес на раме; $n_k = 4$;

R_{yki} – сила сопротивления катка развороту орудия в горизонтальной плоскости, кН;

Вследствие того, что катки в работе находятся в заглубленном состоянии на глубину 0,06 – 0,1 м, они препятствуют развороту орудия, что приводит на поводках механизма навески катков к раме орудия больших усилий, способствующих их поломке. В связи с этим поводки катков крепятся к раме с зазором, обеспечивающим колебания рамы в горизонтальной плоскости. Поэтому примем $R_{yki} = 0$.

Тогда формула (4) примет вид:

$$M_c(t) = b_{cm} a \sigma_{cm} n L_{um} + Q_{zki} f_n n_k L_{kol} + P_6 n L_{um}. \quad (5)$$

При известных возмущающего момента $M_0(t)$, кНм, и момента сопротивления $M_c(t)$, кНм можно определить величину момента, вызывающего колебания орудия в горизонтальной плоскости $M_p(t)$, кНм в виде:

$$M_p(t) = M_0(t) - M_c(t) = P(t)\Delta b = F(t)L_{um}, \quad (6)$$

где $F(t)$ – приведенная реактивная сила, возникающая на рабочих органах, опорных колесах и катках при их отклонении от направления движения, кН.

Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов подробно изучены в работах доктора технических наук, профессора Л.В. Гячева [8, 9]. Согласно этим работам при прямолинейном равномерном движении со скоростью v_a , м/с, колебание чизельного орудия в горизонтальной плоскости $\Theta(t)$ под воздействием возмущающих сил $F(t)$, кН, описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами в виде (рис. 1):

$$J_0 \ddot{\Theta}(t) + \frac{P \cdot L_{um}^2 \cdot \dot{\Theta}(t)}{v_a} + PL_{um} \Theta(t) = F(t)L_{um}, \quad (7)$$

где J_0 – момент инерции чизельного орудия относительно точки O_1 , кгм²;

P – тяговое сопротивление орудия, кН.

Перепишем уравнение в виде:

$$\ddot{\Theta}(t) + \frac{PL_{um}^2 \dot{\Theta}(t)}{v_a J_0} + \frac{PL_{um} \Theta(t)}{J_0} = \frac{F(t)L_{um}}{J_0}. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\frac{PL_{um}^2}{v_a J_0} = 2m_0; \quad \frac{PL_{um}}{J_0} = \omega^2, \quad (9)$$

где m_0 – коэффициент сопротивления чизельного орудия отклонению в горизонтальной плоскости, 1/с;

ω – частота собственных колебаний чизельного орудия, 1/с.

Тогда уравнение (7) примет вид:

$$\ddot{\Theta}(t) + 2m_0 \dot{\Theta}(t) + \omega^2 \Theta(t) = \frac{F(t)L_{um}}{J_0}. \quad (10)$$

Согласно формуле (9), коэффициенты m_0 и ω^2 входящие в дифференциальное уравнение (10) всегда положительны. Тогда согласно условиям устойчивости движения машины, рассматриваемое чизельное орудие всегда работоспособно [10] и технологически надежно [11].

Для определения величины отклонения чизельного орудия в горизонтальной плоскости при тяжелых условиях работы рассмотрим решение уравнения (10).

$$\Theta = \frac{F(t)L_{um}}{J_0} \frac{\cos \rho t}{\sqrt{(\omega^2 - \rho^2)^2 + 4m_0^2 \rho^2}}, \quad (11)$$

где ρ – частота возмущающих сил, 1/с.

Частота возмущающих сил ρ , 1/с, зависит от скорости движения агрегата v_a , м/с, и длины волн неровности рельефа поля и свойств почвы, находящейся в пределах $L_{Znm} = 4 \dots 13$ м.

$$\text{Тогда} \quad \rho = \frac{v_a}{L_{Znm}}. \quad (12)$$

При скорости движения агрегата $v_a = 1,4 - 2$ м/с,

$$\rho = \frac{1,4-2,0}{4-13} = (0,1 \dots 0,5) \text{ 1/с.}$$

Исходные данные для определения величины угла Θ , град, представлены в таблице.

Таблица. Исходные данные для определения угла колебаний орудия θ , град.

Table. Initial data for determining the oscillation angle of the tool θ , degrees

№ п/п	Параметры	Обозначение	Единица измерения	Величина параметра
1	Сила тяжести орудия	G_0	кН	49,6
2	Ширина междуследия	b	м	0,6
3	Количество рабочих органов	n	шт	7
4	Ширина захвата орудия $b \cdot n$	B	м	4,2
5	Тяговое сопротивление орудия	P	кН	40,4 – 45,1
6	Среднеквадратическое отклонение тягового сопротивления	σ_p	кН	1,5-2,0
7	Коэффициент вариации P	V_p	%	5,1 – 6,2
8	Глубина обработки	a	м	0,3
9	Ширина стойки	b_{cm}	м	0,15
10	Коэффициент смятия почвы	σ_{cm}	кН/м ²	20 – 65
11	Реакция почвы на опорное колесо	Q_{zk}	кН	2 – 4
12	Коэффициент трения	f_n	–	0,3
13	Количество колес	n_k	шт	4
14	Расстояние от точки прицепа до центра сопротивления орудия	L_{um}	м	2 – 6
15	Расстояние от точки прицепа до точки опоры колеса	L_{kol}	м	1 – 3
16	Частота возмущающих сил	ρ	1/с	0,1...0,5
17	Момент возмущающий	$M_{omax}(t)$	кН·м	15,12 – 20,1
18	Момент сопротивления	$M_c(t)$	кН·м	12,45 – 16,3
19	Горизонтальная составляющая реакции почвы на опорное колесо	$Q_x(t)$	кН	0,2- 0,4
20	Горизонтальная составляющая сил действующих на каток	$R_{xk}(t)$	кН	5,0 – 7,5
21	Горизонтальная составляющая сил действующих на рабочие органы	$R_{xl}(t)$	кН	3,6 – 5,7
22	Момент вызывающий колебания орудия в горизонтальной плоской	$F(t) \cdot L_{um}$	кН·м	2,67 – 3,8
23	Коэффициент сопротивления	m_0	1/с	0,23
24	Частота собственных колебаний	ω	1/с	0,46
25	Момент инерции относительно точки O_1	J_0	кН·мс ²	446 – 1240
26	Частота возмущающих сил	ρ	1/с	0,1 – 0,5
27	Сила импульса сжатого воздуха на один рабочий орган	P_e	кН	0,018
28	Частота воздействия сжатого воздуха	ν	1/с	10-30

Результаты. Максимально возможные значения $M_0(t)$, $M_c(t)$, $F(t)$, L_{um} , m_0 , ω^2 , подсчитанные по формулам (3), (5), (6) и (9) внесены в таблицу.

Подставляя полученные значения известных величин в формулу (11), получили максимальные значения угла колебания орудия в горизонтальной плоскости, Θ , град, которые представлены на рис. 2, 3 и 4.

Из рис. 2 и 3 видно, что с увеличением расстояния L_{um} , м, при различных параметрах L_{um} , L_n , м, P , кН, ρ , 1/с и ϑ_a , м/с, величина угла Θ , град, снижается от 2,6 до 0,1 град.

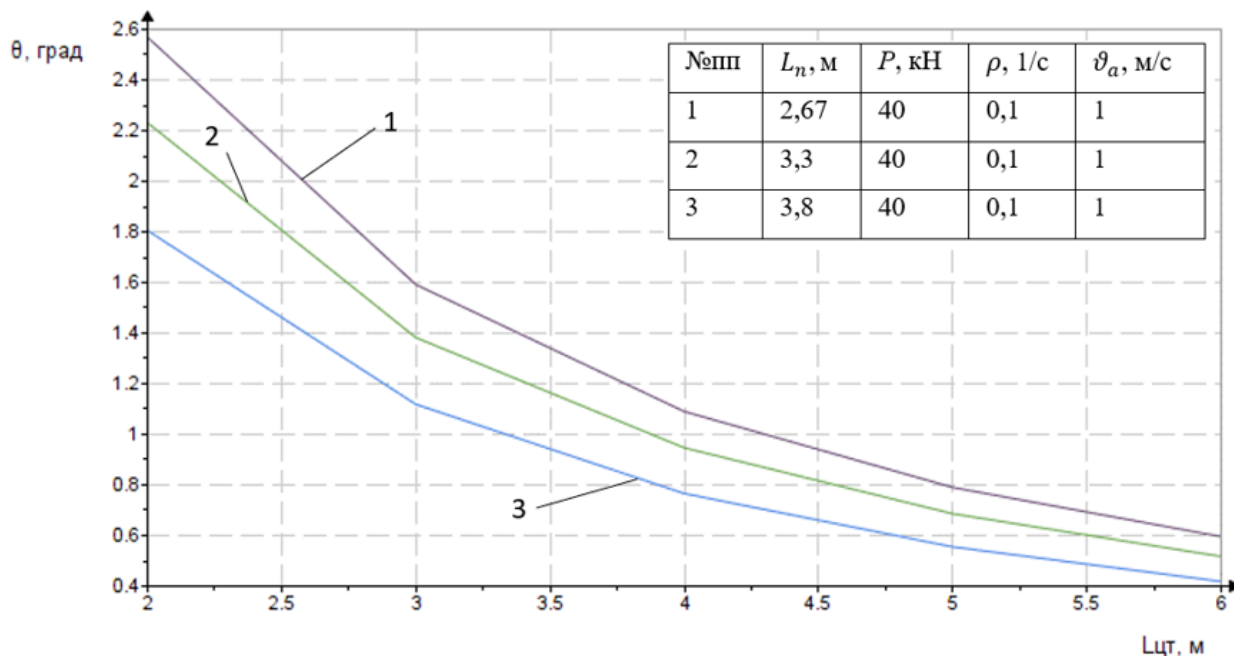


Рис. 2. Зависимость угла колебания чизельного орудия в горизонтальной плоскости Θ , град, от расстояния от точки прицепа до центра сопротивления орудия L_{um} , м, при различных параметрах L_{um} , L_n , м; P , кН; ρ , 1/с и ϑ_a , м/с

Fig. 2. Dependence of the oscillation angle of the chisel tool in the horizontal plane Θ , deg, on the distance from the trailing point to the center of resistance of the tool L_{ct} , m, at various parameters L_{ct} , L_n m; P , kN; ρ , 1/s and ϑ_a , m/s

Тогда величина отклонения чизельного орудия в горизонтальной плоскости Δb , составляет:

$$\Delta b = L_{um} \tan \Theta. \quad (13)$$

Подставляя значения углов Θ , град, в формулу 13 получим величину отклонения Δb , м (рис. 4).

Видно, что при максимальных значениях, возмущающей силы $F(t)$, кН, значения величины отклонения Δb , м, находится в пределах от 0,01 до 0,09 м, что ниже допустимых $\Delta b = \pm 0,15$ м.

Проведенные исследования показывают, что чизельное орудие с подачей в рабочие органы пульсирующего сжатого воздуха устойчиво в горизонтальной плоскости.

В связи с этим длину прицепного устройства необходимо выбрать из условия обеспечения свободного разворота орудия на концах загонок без заезда задних колес трактора на раму орудия.

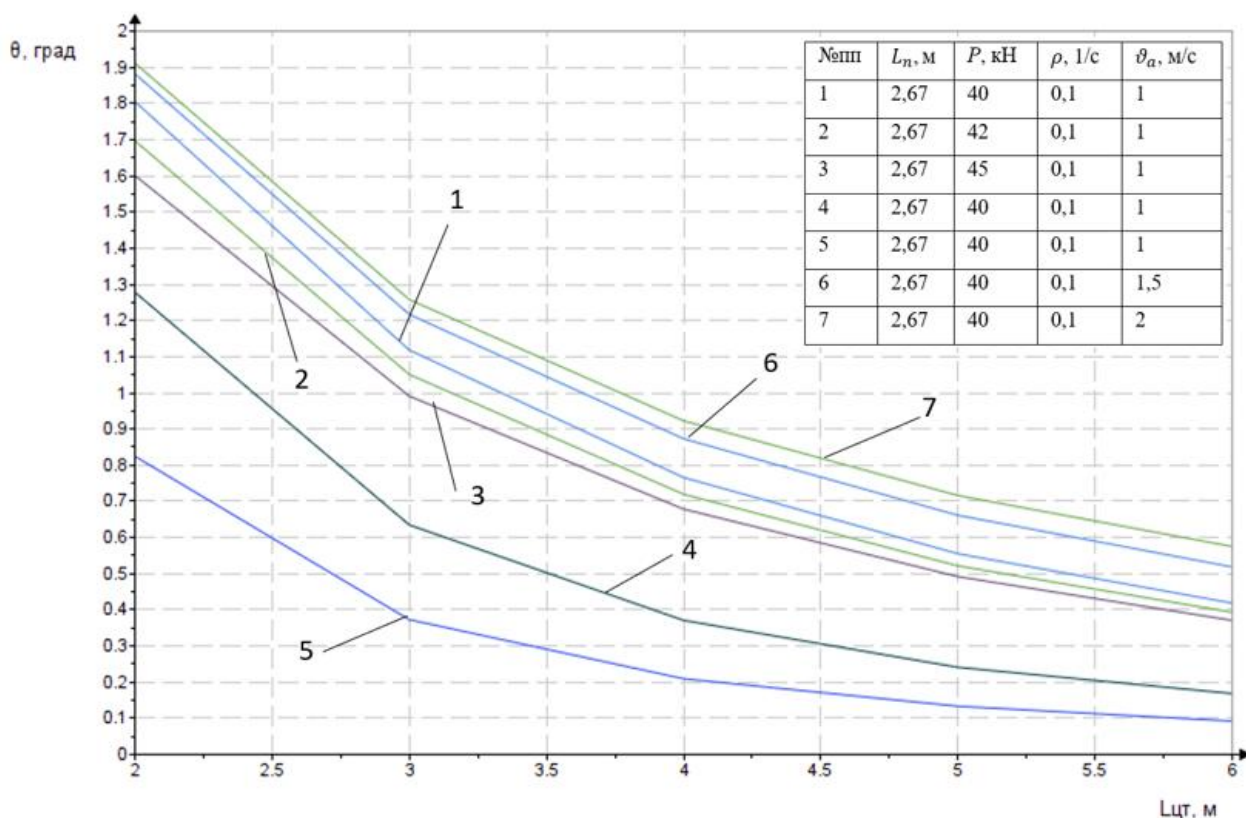


Рис. 3. Зависимость угла колебания чизельного орудия в горизонтальной плоскости Θ , град, от расстояния от точки прицепа до центра сопротивления орудия L_{ct} , м, при различных параметрах L_{um} , L_n , м; P , кН; ρ , 1/с и ϑ_a , м/с

Fig. 3. Dependence of the oscillation angle of the chisel tool in the horizontal plane Θ , deg, on the distance from the trailing point to the center of resistance of the tool L_{ct} , m, for various parameters L_{ct} , L_n m; P , kN; ρ , 1/s and ϑ_a , m/s

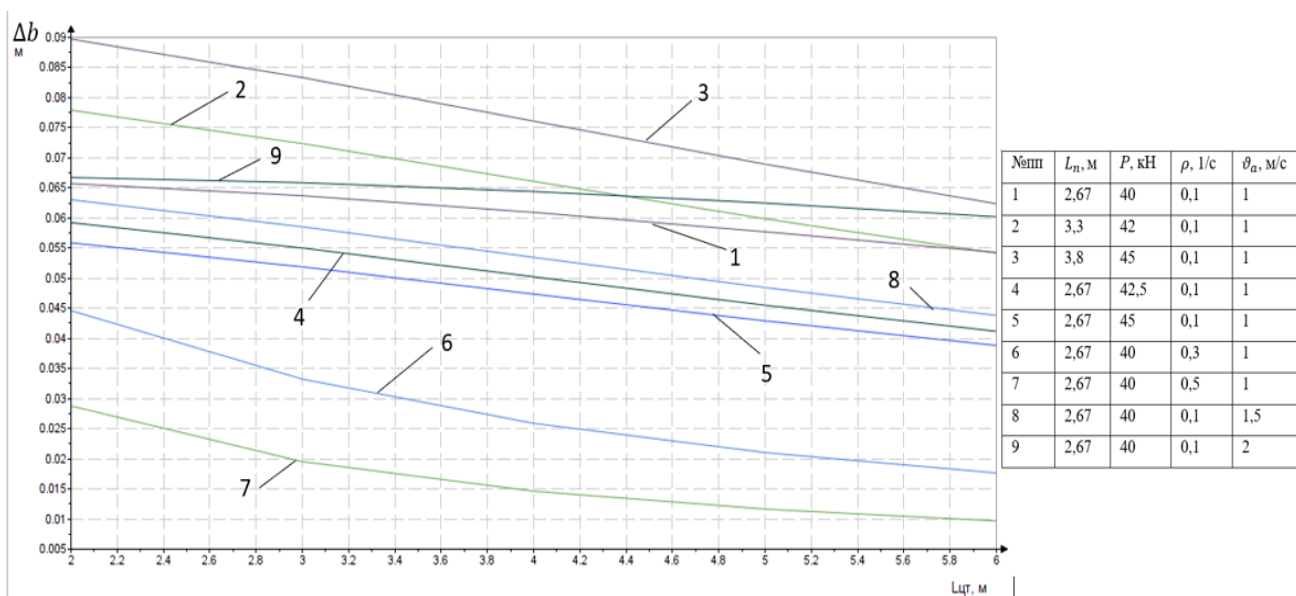


Рис. 4. Зависимость отклонения чизельного орудия в горизонтальной плоскости Δb , м, от расстояния от точки прицепа до центра сопротивления орудия L_{um} , м, при различных параметрах L_{um} , L_n , м; P , кН; ρ , 1/с и ϑ_a , м/с

Fig. 4. Dependence of the deviation of the chisel tool in the horizontal plane Δb , m, on the distance from the trailing point to the center of resistance of the tool L_{ct} , m, at various parameters

$$L_{ct}, L_n \text{ m}; P, \text{ kN}; \rho, 1/\text{s} \text{ and } \vartheta_a, \text{ m/s}$$

Обсуждение. На основе проведенных теоретических исследований по обоснованию длины прицепного устройства чизельного орудия с подачей рабочего органа пульсирующего сжатого воздуха установлено, что чизельное орудие устойчиво в горизонтальной плоскости и длину прицепного устройства орудия необходимо выбрать с учетом разворота орудия на концах загонок без заезда задних колес трактора на раму орудия. Полученные значения колебания орудий в горизонтальной плоскости соответствуют исследованиям, проведенным ранее [12], и будут использованы при создании чизельного орудия с системой подачи пульсирующего сжатого воздуха.

Выводы. Получены следующие результаты:

1. Разработана расчетная схема чизельного орудия по обоснованию длины прицепного устройства и установлены силы, действующие на чизельное орудие в горизонтальной плоскости.
2. Установлено, что при изменении свойств почвы и рельефа поверхности поля силы, действующие на рабочие органы, опорные колеса и катки меняются по величине и создают возмущающий момент, вызывающий колебания орудия в горизонтальной плоскости.
3. Установлено, что при развороте орудия в горизонтальной плоскости на опорной поверхности стоек рабочих органов и при взаимодействии опорных колес с почвой возникают силы, препятствующие их развороту, величина которых зависит от параметров рабочих органов и колес, а также от характеристик свойств почвы.
4. Составлено, согласно разработанной расчетной схеме, дифференциальное уравнение колебания чизельного орудия, решение которого с учетом сопротивления позволило определить величину колебания орудия в горизонтальной плоскости, которая составляет 0,1-2,6 град.
5. Величина отклонения чизельного орудия в горизонтальной плоскости при различных длинах прицепного устройства составляет от 0,01 м до 0,09 м при допустимых $\pm 0,15$ м.

Полученные результаты показывают, что чизельное орудие с подачей пульсирующего сжатого воздуха устойчиво в горизонтальной плоскости. Длина прицепного устройства должна обеспечить свободный разворот агрегата на концах загонок без наезда заднего колеса трактора на раму чизельного орудия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимов Р.С. Повышение эффективности технологического процесса работы противозерозионных почвообрабатывающих машин. Дис. ... д-р техн. наук. Челябинск. 1990. 434 с.
2. Wendling J.I., Bernhardt H. Friction reduction in ploughing by air lubrication // 2025 ASABE Annual International Meeting (Toronto, Ontario, Canada July 13-16, 2025). ASABE. 2025, 2500446. <https://doi.org/10.13031/aim.202500446>
3. Araya K., Kawanishi K. Soil failure by introducing air under pressure // Transactions of the ASAE. 1985. Vol. 27 (5). P. 1292-1298. <https://doi.org/10.13031/2013.32962>

4. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Сычев С.М. Элементы моделирования воздействия воздушного потока на поверхностный слой почвы: монография. Брянск: Брянский ГАУ. 2026. 198 с. EDN: UUZWBA
5. Измайлов А.Ю., А.С. Дорохов, И.Р. Рахимов, Н.В. Алдошин, Ялалетдинов Д.А. Обработка почвы с подачей сжатого воздуха – путь к быстрому восстановлению структуры почвы // *Агроинженерия*. 2025. № 27 (5). С. 4-13. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>. – EDN UVRXBK.
6. Рахимов И.Р., Куликова А.П. Определение параметров пульсирующего сжатого воздуха при обработке почвы // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2025. № 4(76). С. 169-173. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2025-76-4-169-173>
7. Куликова А.П. Использование сжатого воздуха для снижения тягового сопротивления чизельных орудий // *Актуальные вопросы агроинженерных и агрономических наук. Матер. Нац. (Всеросс.) науч. конф. Института агроинженерии, Института агроэкологии, (Челябинск-Миасское, 29 ноября – 02 2022 г.) / Под ред. Н.С. Низамутдиновой*. Челябинск: Южно-Уральский государственный аграрный университет. 2022. С. 132-138. EDN: JKL VOM
8. Гячев Л.В. Динамика машинно-тракторных и автомобильных агрегатов. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета. 1976. 191 с.
9. Гячев Л.В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов. М.: Машиностроение. 1981. 206 с.
10. Токушев Ж.Е. Теория и расчет орудий для глубокого рыхления плотных почв. М.: Инфра-М. 2003 300 с.
11. Смелик В.А. Технологическая надежность сельскохозяйственных агрегатов и средства ее обеспечения: монография. Ярославль: Ярославская государственная сельскохозяйственная академия. 1999. 229 с. EDN: UHCYSN
12. Рахимов И.Р. Обоснование устойчивости хода широкозахватных прицепных машин в горизонтальной плоскости // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2021. № 3(59). С. 106-115. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-106-115>. – EDN GXSNXO.

REFERENCES

1. Rakhimov R.S. Improving the efficiency of the technological process of anti-erosion tillage machines. Diss ... Doctor of Technical Sciences. Chelyabinsk. 1990. 434 p. (In Russ.)
2. Wendling J.I., Bernhardt H. Friction reduction in ploughing by air lubrication. In: 2025 ASABE Annual International Meeting (Toronto, Ontario, Canada July 13-16, 2025). ASABE. 2025, 2500446. (In Eng.) <https://doi.org/10.13031/aim.202500446>
3. Araya K., Kawanishi K. Soil failure by introducing air under pressure. Transactions of the ASAE. 1985;27 (5):1292-1298. (In Eng.) <https://doi.org/10.13031/2013.32962>
4. Lobachevsky Ya.P., Starovoitov S.I., Sychev S.M. Elements of modeling the effect of airflow on the surface layer of soil: monograph. Bryansk: Bryansk State Agrarian University. 2026. 198 p. (In Russ.) EDN: UUZWBA
5. Izmaylov A.Yu., Dorokhov A.S., Rakhimov I.R., Aldoshin N.V., Yalaletdinov D.A. Soil treatment with compressed air as a way to restore the soil structure. *Agroinzheneriya = Agricultural Engineering* (Moscow). 2025;27(5):4-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-4-13>
6. Rakhimov I.R., Kulikova A.P. Determination of parameters of pulsating compressed air during tillage. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir*

State Agrarian University. 2025;4(76):169-173. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2025-76-4-169-173>

7. Kulikova A.P. Using compressed air to reduce the draft resistance of chisel implements. In: Current Issues in Agricultural Engineering and Agronomic Sciences. Proc. Nat. (All-Russian) Sci. Conf. of the Institute of Agricultural Engineering, Institute of Agroecology (Chelyabinsk-Miasskoye, November 29 - February 2, 2022). N. S. Nizamutdinova (ed.). Chelyabinsk: South Ural State Agrarian University. 2022:132-138. (In Russ.) EDN: JKL VOM

8. Gyachev L.V. Dynamics of machine-tractor and automobile units. Rostov-on-Don: Rostov University Press. 1976. 191 p. (In Russ.)

9. Gyachev L.V. Stability of movement of agricultural machines and units. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1981. 206 p. (In Russ.)

10. Tokushev Zh.E. Theory and calculation of tools for deep loosening of dense soils. Moscow: Infra-M Publ. 2003. 300 p. (In Russ.)

11. Smelik V.A. Technological reliability of agricultural units and means of ensuring it: monograph. Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy. 1999. 229 p. (In Russ.) EDN: UHCYSN

12. Rakhimov, I.R. Substantiation of the course stability of wide-reach trailed machines in the horizontal plane. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2021:3 (59):106-115. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-59-3-106-115>

Об авторах:	About the authors:
Ильдар Раисович Рахимов д-р техн. наук, профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», 454080, Российская Федерация, Челябинская область, Челябинск, проспект Ленина, д.75 ildarr@bk.ru https://orcid.org/0000-0003-0020-6634	Ildar R. Rakhimov Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Tractors, Agricultural Machinery and Farming, South Ural State Agrarian University 454080, Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 75, Russian Federation ildarr@bk.ru https://orcid.org/0000-0003-0020-6634
Денис Альбертович Ялалетдинов канд. техн. наук, Генеральный директор, ООО «Челябинский компрессорный завод», 456677, Челябинская область, Красноармейский район, 14-й километр автодороги Челябинск-Новосибирск 1 Российская Федерация chkz@chkz.ru	Denis A. Yalaletdinov Candidate of Technical Sciences, General Director, Chelyabinsk Compressor Plant LLC 456677, Chelyabinsk Region, Krasnoarmeysky District, 14th kilometer of the Chelyabinsk-Novosibirsk highway 1, Russian Federation, chkz@chkz.ru
Альберт Исмагилович Сулейманов Аспирант кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», 454080, Российская Федерация, Челябинская	Albert Ismagilovich Suleymanov Postgraduate Student of the Department of Tractors, Agricultural Machinery, and Farming, South Ural State Agrarian University, 454080, Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 75, Russian Federation

область, Челябинск, проспект Ленина, д.75 al@chkz.ru	al@chkz.ru
Александр Александрович Васько Аспирант кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие» ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», 454080, Российская Федерация, Челябинская область, Челябинск, проспект Ленина, д.75 seo@chkompressor.ru	Alexander Alexandrovich Vasko Postgraduate Student of the Department of Tractors, Agricultural Machinery, and Farming, South Ural State Agrarian University, 454080, Chelyabinsk Region, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 75, Russian Federation seo@chkompressor.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 the planning, execution, and analysis of this study.
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 одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 17.03.2026	Received: 17.03.2026
Одобрена после рецензирования: 09.04.2026	Approved after reviewing: 09.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СТАБИЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА НА БАЗЕ БЕЛАРУС-952.3 С КРН-5,6В

Сария Вале́йевна Тарасова✉, Николай Михайлович Ожегов

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉saria20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8347-2534>

Аннотация. В статье описано решение проблемы отклонения машинно-тракторного агрегата от траектории движения при выполнении технологических операций на склоне. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения курсовой устойчивости машинно-тракторных агрегатов при выполнении технологических операций на склоновых землях, где под действием сил тяжести и неравномерности сопротивления движению происходит отклонение от заданной траектории. Цель исследования – определение оптимальных значений давления воздуха в шинах машинно-тракторного агрегата и влияние поворотного механизма на прямолинейность движения его на различных углах склона. Испытания проводили согласно методу определения условий испытаний на тракторе БЕЛАРУС-952.3 в агрегате с культиватором КРН-5,6В на склонах 5, 10, 15 и 20 градусов при почвенном фоне вспаханного поля с коэффициентом сцепления 0,5. Варьировали давление воздуха в шинах передних, задних колес трактора и транспортных колес культиватора. Установили, что применение разработанного способа позволило удерживать агрегат в пределах технологического коридора шириной 2,62 м при отклонениях, не превышающих 0,1-0,15 м, во всем диапазоне углов склона. Оптимальные значения давления в шинах передних колес составили 0,17-0,20 МПа, задних – 0,12-0,13 МПа, транспортных колес культиватора – 0,10-0,12 МПа в зависимости от угла наклона. Таким образом, полученные значения внутришинного давления экспериментально подтвердили эффективность способа стабилизации движения колесного трактора с навесным культиватором на склонах до 20° за счет применения принципа излишней поворачиваемости движителя, созданный за счет изменения давления в шинах, и поворотного механизма транспортных колес орудия.

Ключевые слова: трактор, машинно-тракторный агрегат, устойчивость, склон, эксперимент

Для цитирования: Тарасова С.В., Ожегов Н.М. Экспериментальное исследование способа стабилизации движения машинно-тракторного агрегата на базе БЕЛАРУС-952.3 с КРН-5,6В // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 66-76 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-66-75>

EXPERIMENTAL STUDY OF A METHOD FOR STABILIZING THE MOVEMENT OF A BELARUS-952.3 TRACTOR AND KRN-5.6V CULTIVATOR UNIT

Saria V. Tarasova[✉], Nikolay M. Ozhegov

Saint Petersburg State Agrarian University, Saint Petersburg, Russia

[✉]saria20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8347-2534>

Abstract. The article describes a solution to the problem of deviation of a tractor-implement system from its trajectory during technological operations on sloping terrain. It occurs under the influence of gravity and uneven resistance to movement. So, the directional stability of these systems needs to be ensured in such operations. The study aimed to determine the optimal values of air pressure in the tires of a machine-tractor unit and the effect of the turning mechanism on the unit's straight-line tracking at various slope angles. The tests were conducted following the methodology of determining the testing conditions using a BELARUS-952.3 tractor combined with a KRN-5.6V cultivator on 5°, 10°, 15°, and 20° slopes. The soil background was a ploughed field with an adhesion coefficient of 0.5. The air pressure in the tires of tractor's front and rear wheels, and the transport wheels of the cultivator was varied. The study results demonstrated that the use of the developed method allowed the unit to remain within a 2.62 m technological corridor. The deviations did not exceed 0.1-0.15 m across the entire range of slope angles. The optimal tire pressures were found to be 0.17-0.20 MPa for the front tractor wheels, 0.12-0.13 MPa for the rear wheels, and 0.10-0.12 MPa for the transport wheels of the cultivator, depending on the inclination angle. Thus, the experimental results confirm the effectiveness of the proposed method for stabilizing the movement of a wheeled tractor with a mounted cultivator on slopes up to 20°. This is achieved by applying the principle of excessive turning of the propulsion system, regulated by adjusting the tire pressure and the turning mechanism of the cultivator's transport wheels.

Keywords: tractor, machine-tractor unit, stability, slope, experiment

For citation: Tarasova S. V., Ozhegov N. M. Experimental study of a method for stabilizing the movement of a BELARUS-952.3 tractor and KRN-5.6V cultivator unit. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 66-76 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-66-75>

Введение. В настоящее время развитие машинно-тракторного парка в аграрном секторе экономики является актуальным в связи с ростом продовольственной потребности и увеличения земельного фонда. Степень распаханности территории в России составляет более 7%.¹⁸ Однако, нельзя не учитывать, что значительная часть пашни находится в нестабильных агроландшафтных условиях поскольку сельскохозяйственные угодья расположены не только на равнинах, но и в отрогах гор и возвышенностях.

Рассмотрена ландшафтная специфика земельных угодий в аграрном секторе, на примере Оренбургской области. В северной зоне равнины и склоны до 3° занимают 57,15% территории, склоны 3-10° – 42,04%, более 10° – 0,81 %. В центральной зоне 66,4% пахотных земель расположены на склонах до 7°, 33,6% имеют уклон 7° и выше. Из общей площади селхозугодий западной зоны на склонах до 7° расположены 92,21%, с уклонами более 7° –

¹⁸ Сельское хозяйство в России. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13226> (дата обращения 14.03.2026).

остальная часть пашни. В восточной зоне пологие и слабопокатые склоны от 1° до 7° занимают 92,25%, склоны крутизной более 7° и выше – 7,75%¹.

Модернизация машинно-тракторных агрегатов (МТА), предназначенных для работы на склонах, не может быть осуществлена без стабилизации устойчивости к опрокидыванию и удержания курса движения МТА при культивации, посадке растений [1, 2].

Устойчивость движения машинно-тракторных агрегатов в склонном земледелии находится под влиянием сил тяжести, разности сил сопротивления прикатыванию нижних и верхних по склону движителей, координат точки силы тяги на крюке и его конструктивных особенностей [3]. Фактически, не актуализируется **проблема** отклонения машинно-тракторного агрегата от траектории движения при выполнении технологических операций на склоне. За основу создания способа стабилизации положения на наклонной опорной поверхности движущегося колесного трактора было принято сравнение двух теорий – «Теории автомобиля» и «Теории трактора», при котором выявлена аналогия конструктивных особенностей пневматических движителей и реализация принципа поворачиваемости [4, 5]. Принцип поворачиваемости, который обусловлен углами увода и радиусом поворота, импортируют в способ удержания машинно-тракторного агрегата (МТА) на склоне, создав при этом интегральную теорию, направленную на стабилизацию движения МТА [6, 7].

Научной новизной исследования является предложенный способ стабилизации движения машинно-тракторного агрегата на наклонной опорной поверхности.

Цель экспериментальных исследований – определение оптимальных значений давления воздуха в шинах машинно-тракторного агрегата и влияние поворотного механизма на прямолинейность движения его на различных углах склона.

Материалы и методы. Производственные эксперименты по выявлению сходимости математических расчетов способа стабилизации положения на наклонной опорной поверхности движущегося колесного транспортного средства с навесным орудием, оборудованным поворотными механизмами на транспортных колесах, проведены на тракторе БЕЛАРУС-952.3 с культиватором КРН-5,6В при движении его в заданных условиях на земельных угодьях ООО «Краснополье» Переволоцкого района Оренбургской области [4, 8].

При проведении экспериментов осуществлялись замеры отклонений от траектории трактора БЕЛАРУС-952.3 с КРН-5,6В с помощью приемника глобальной навигационной спутниковой системы «Сигма» фирмы Javad. Назначение приемника – измерение текущих координат траектории аппарата в системе координат с одновременной их регистрацией и выдачей в каналы связи (рис. 1) [9, 10]. При проведении экспериментальных исследований трактора с агрегатом фиксировались действительная скорость движения трактора v_d и давление воздуха p_ω в шинах (рис. 2). Машинно-тракторный агрегат и контрольные участки технологического коридора готовились к испытаниям в соответствии с требованиями ГОСТ¹⁹. Длина технологического коридора составляла 50 м, ширина 2,02 м и ширина защитной зоны $\omega_{3,3}=0,3$ м; они были определены посредством рулетки. Перед зачетным

¹⁹ ГОСТ 20915-2011. Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний. М.: Стандартинформ. 2013. 27 с.

участком и после были расположены участки «въезд-выезд». При движении на участке «въезд-выезд» устанавливалась необходимая скорость ($v_d=8$ км/ч) движения трактора, которая контролировалась на протяжении всего опыта с помощью спидометра.



Рис. 1. Проверка траекториальной стабилизации трактора БЕЛАРУС-952.3 с культиватором КРН-5,6В на склоне с применением приемника глобальной навигационной спутниковой системы «Сигма» фирмы Javad

Fig. 1. Testing the trajectory stabilization of BELARUS-952.3 tractor with the KRN-5.6B cultivator on a slope using the Javad Sigma Global Navigation Satellite System receiver



Рис. 2. Проверка траекториальной стабилизации МТА на склоне с применением поворотного механизма

Fig. 2. Testing the trajectory stabilization of the machine-tractor unit on a slope using a turning mechanism

На передних колесах трактора с шиной 360/70R24 фирмы BELSHINA устанавливалось следующее давление: 0,2 МПа для склона с углом наклона 5° ; 0,17 МПа – для наклона 10° ; 0,14 МПа – для наклона $15-20^\circ$. Давление в колесах более нагруженного заднего моста, оборудованного шинами 18.4R34 Ф-11 фирмы BELSHINA и в культиваторе на шинах модели 5.50-16Ф122 – 0,08 МПа при необходимости повышали на 0,02 МПа [8, 9].

Результаты. Как показали испытания, МТА с поворотным механизмом движется внутри заданного коридора ($КД+2b_{з.з.}=2,62\text{м}$) на склонах с наклоном до 20° . Траектории движения машинно-тракторного агрегата на различных склонах и на одном почвенном фоне (вспаханное поле с $\varphi = 0,5$) показаны на рисунках 3-5. Посредством графоаналитических процедур были установлены диапазоны оптимальных значений давления воздуха в шинах в зависимости от факторов: угла опорной поверхности α и коэффициента сцепления с почвой φ . Значения давления в шинах выбиралось с учетом наименьшего отклонения от технологического коридора.

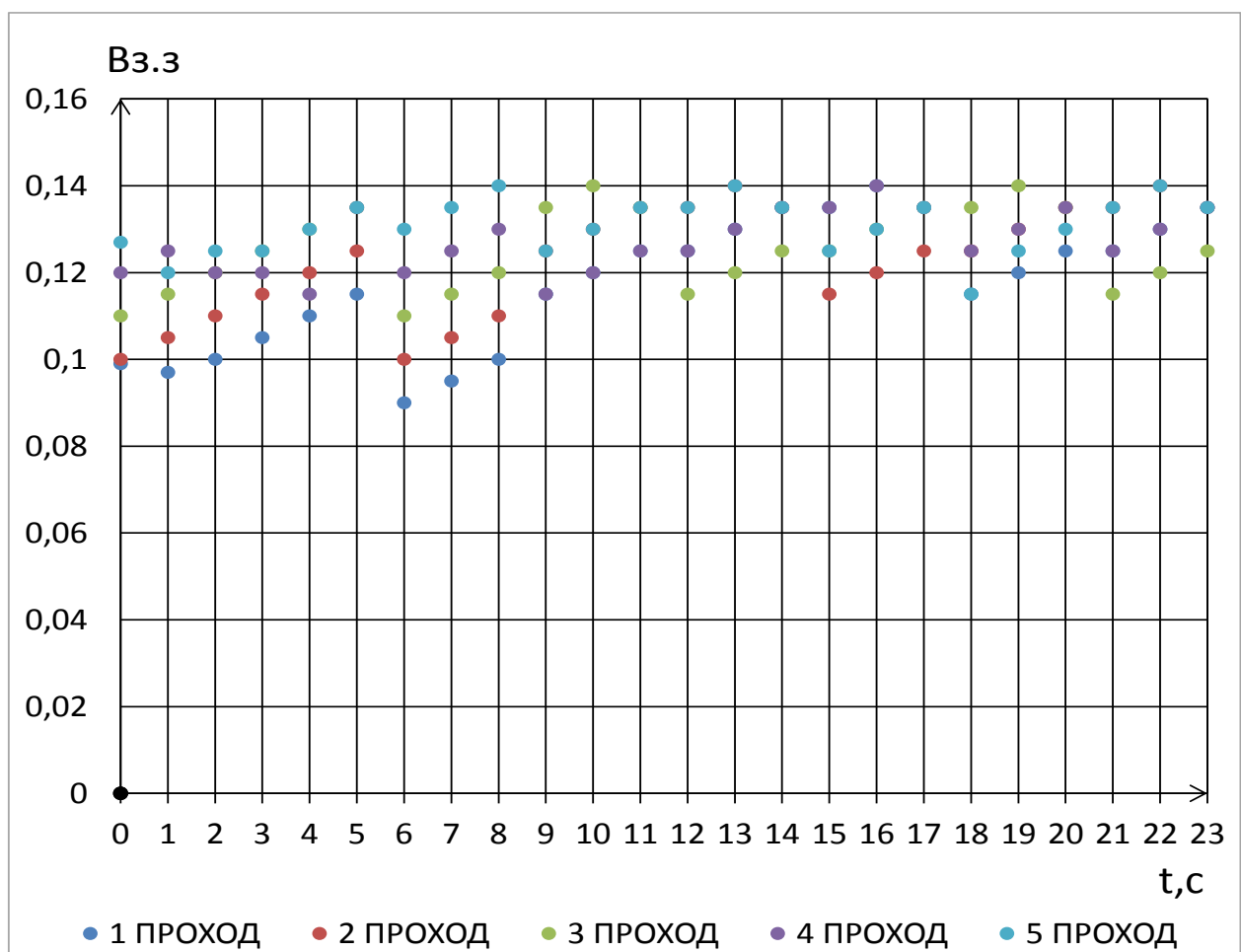


Рис. 3. Траектории движения трактора БЕЛАРУС-952.3 с КРН-5,6В на склоне $\alpha = 5^\circ$ при внутришинном давлении передних колёс $p_{\omega_{п.к.}} = 0,2$ МПа, задних колёс $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, транспортных колёс культиватора $p_{\omega_{оп.}} = 0,1$ МПа: $b_{з.з.}$ – ширина защитной зоны технологического коридора, м; t – время за один проход МТА, с.

Fig. 3. Trajectories of BELARUS-952.3 tractor with KRN-5.6V cultivator on a slope of $\alpha = 5^\circ$ with tire pressure of the front wheels $p_{\omega_{п.к.}} = 0,2$ МПа, rear wheels $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, transport wheels of the cultivator

$p_{\omega op.} = 0,1 \text{ МПа}$; $B_{3.3}$ – width of the protective zone of the technological corridor, m;
 t – time for one machine-tractor unit pass, s.

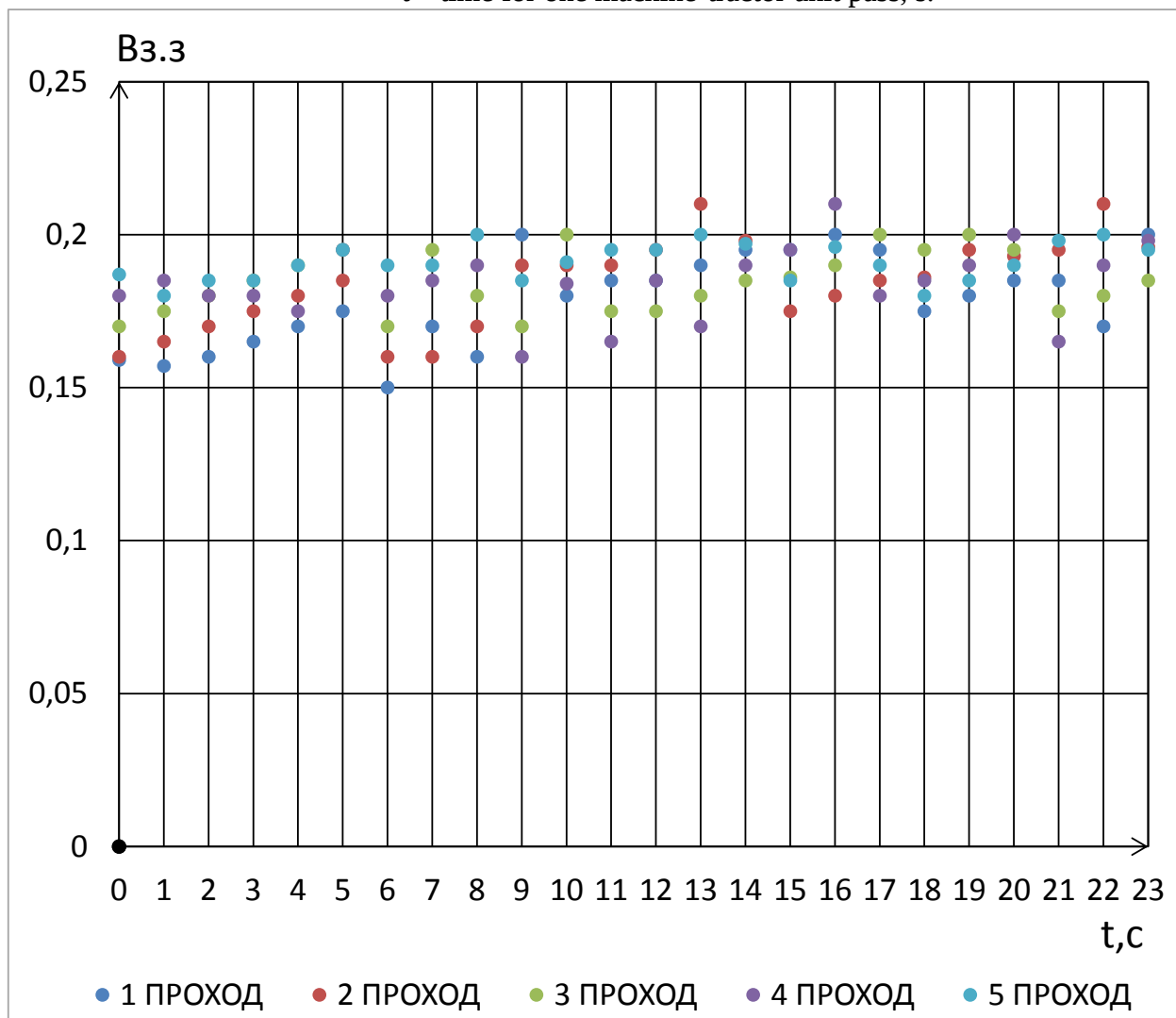


Рис.4. Траектории движения трактора БЕЛАРУС-952.3
с КРН-5,6В на склоне $\alpha = 15^\circ$ при внутришинном давлении передних колёс
 $p_{\omega n.к.} = 0,19 \text{ МПа}$, задних колёс $p_{\omega з.к.} = 0,12 \text{ МПа}$, транспортных колёс культиватора
 $p_{\omega op.} = 0,12 \text{ МПа}$

Fig. 4. Trajectories of BELARUS-952.3 tractor with
KRN-5.6V cultivator on a slope of $\alpha = 15^\circ$ with tire pressure of the front wheels
 $p_{\omega n.к.} = 0,19 \text{ МПа}$, rear wheels $p_{\omega з.к.} = 0,12 \text{ МПа}$, transport wheels of the cultivator
 $p_{\omega op.} = 0,12 \text{ МПа}$

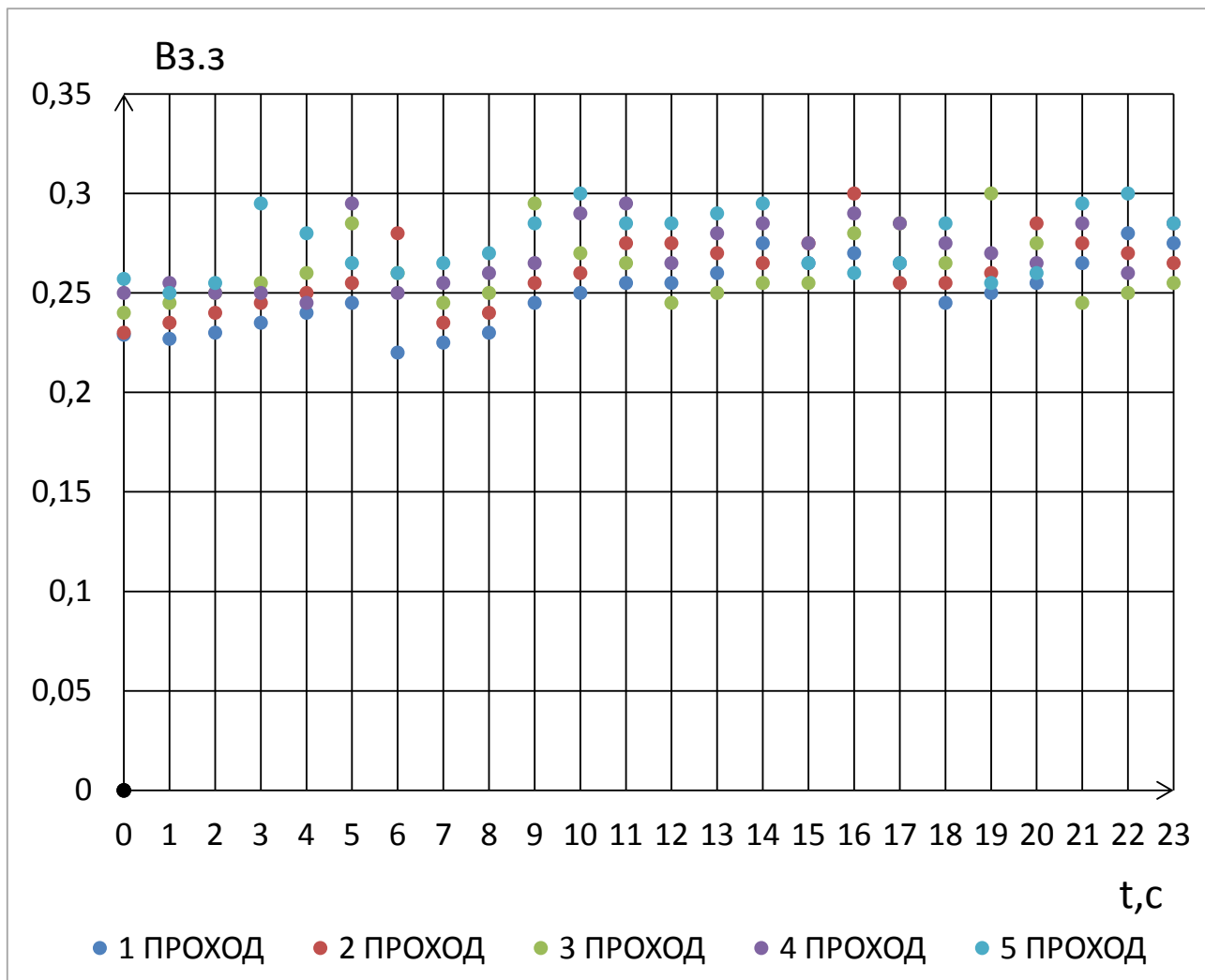


Рис.5.Траектории движения трактора БЕЛАРУС-952.3 с
 КРН-5,6В на склоне $\alpha = 20^\circ$ при внутришинном давлении передних колёс
 $p_{\omega_{п.к.}} = 0,17$ МПа, задних колёс $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, транспортных колёс культиватора
 $p_{\omega_{ор.}} = 0,12$ МПа

Fig. 5. Trajectories of BELARUS-952.3 tractor with
 KRN-5.6V cultivator on a slope of $\alpha = 20^\circ$ with tire pressure of the front wheels
 $p_{\omega_{п.к.}} = 0,17$ МПа, rear wheels $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, transport wheels of the cultivator
 $p_{\omega_{ор.}} = 0,12$ МПа

Обсуждение. Таким образом, для удержания МТА в технологическом коридоре необходимо в соответствии с экспериментальными исследованиями устанавливать внутришинное давление передних колёс 360/70R24 фирмы BELSHINA - 0,2МПа, 0,19МПа, 0,19МПа, 0,17МПа соответственно для склонов с углами наклона 5° , 10° , 15° , 20° . Внутришинное давление задних колёс 18.4R34 Ф-11 фирмы BELSHINA - 0,13МПа, 0,12МПа, 0,12МПа, 0,13МПа соответственно для склонов с углами наклона 5° , 10° , 15° , 20° . Внутришинное давление транспортных колёс навесного орудия 5.50-16Ф122 - 0,10МПа, 0,12МПа, 0,12МПа, 0,12МПа соответственно для склонов с углами наклона 5° , 10° , 15° , 20° .

Вывод. Экспериментально подтверждена эффективность способа стабилизации движения машинно-тракторного агрегата на примере машинно-тракторного агрегата БЕЛАРУС-952.3 с КРН-5,6В на наклонных опорных поверхностях с углами наклона до 20° за счет принципа излишней поворачиваемости колесного движителя МТА посредством поворотного механизма навесного орудия. Таким образом, для трактора БЕЛАРУС-952.3, укомплектованного шинами на передних колесах 360/70R24 и задних колесах 18.4R34 Ф-11, в агрегате с культиватором КРН-5,6 необходимо устанавливать давление воздуха на передних колёсах $p_{\omega_{п.к.}} = 0,2$ МПа, задних колесах $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, транспортных колёсах культиватора $p_{\omega_{ор.}} = 0,1$ МПа на склоне $\alpha = 5^\circ$, на склоне $\alpha = 10 - 15^\circ$ – на передних колесах $p_{\omega_{п.к.}} = 0,19$ МПа, задних колесах $p_{\omega_{з.к.}} = 0,12$ МПа, транспортных колёсах культиватора $p_{\omega_{ор.}} = 0,12$ МПа; на склоне $\alpha = 20^\circ$ при внутришинном давлении передних колёс $p_{\omega_{п.к.}} = 0,17$ МПа, задних колесах $p_{\omega_{з.к.}} = 0,13$ МПа, транспортных колёсах культиватора $p_{\omega_{ор.}} = 0,12$ МПа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Габитов И. И., Шайхетдинов Ф. Р., Неговора А. В. Модернизация эксплуатируемой сельскохозяйственной техники как эффективный фактор повышения уровня технической оснащённости // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2020. № 3(55). С. 95-99. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-55-3-95-99>
2. Тарасова С. В., Асманкин Е. М., Ушаков Ю. А., Ротова В.А., Кондрашов А.Н., Шахов В.А. Курсовая стабилизация движущегося колёсного транспортного средства с навесным орудием на наклонной опорной поверхности // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 6(104). С. 124-130. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-124-130>
3. Поликутина Е. С., Щитов С. В., Кривуца З. Ф., Ковшун А. А., Щитова В. А. Влияние конструктивно-технологических параметров машинно-тракторных агрегатов на тягово-сцепные качества трактора при работе с прицепными одноосными машинами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 9 (251). С. 78–84. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-251-9-78-84>
4. Асманкин Е. М., Тарасова С. В., Наумов Д. В. Механизм поворота опорных колес // Современное состояние и перспективы производства и переработки сельскохозяйственной продукции и продуктов питания. Матер. национ. научн.-практ. конф. с междунар. участием (Оренбург, 15 марта 2024 г.). Оренбург: Изд-во PROофис. 2024. С. 5-7.
5. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A review of current and historical research contributions to the development of ground autonomous vehicles for agriculture // Sustainability. 2022. Vol.14(15), 9221. <https://doi.org/10.3390/su14159221>
6. Поликутина Е. С., Щитов С. В., Кривуца З. Ф., Ковшун А.А., Щитова В.А. Повышения тягово-сцепных свойств энергетических средств при работе с прицепными агрегатами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2025. № 207. С. 245-253. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-207-021>
7. 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>

8. Тарасова С. В., Стеновский В.С. Основы теоретических и экспериментальных исследований способа стабилизации положения колесного трактора на склоне // Молодые ученые и специалисты - науке и практике страны: Сб. матер. конф. (Оренбург, 29-30 октября 2019 г.). Оренбург: Оренбургский государственный университет: ИПК «Университет». 2019. С. 300-304.

9. Слепенков А.Е., Леонов В.В., Митрохина О.П., Кидяева Н.П., Щитов С.В., Кузнецов Е.Е. Результаты исследований по использованию колёсного трактора и модернизированной дисковой бороны // Технический сервис машин. 2022. №1(146). С. 39-45. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-1-39-45>

10. Щитов С. В., Кривуца З. Ф., Поликутина Е. С., Ковшун А.А., Щитова В.А. Пути перераспределения силовых нагрузок на опорные поверхности машинно-тракторного агрегата // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 5 (247). С. 70-74. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-247-5-70-74>

REFERENCES

1. Gabitov. I. I., Shaihutdinov F. R., Negovora A. V. Improvements in the in-service agricultural machinery as an effective factor for better equipment. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University. 2020; 3(55):95-99. (In Russ.) <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2020-55-3-95-99>

2. Tarasova S. V., Asmankin E. M., Ushakov Yu. A., Rotova V.A., Kondrashov A.N., Shakhov V.A. Course stabilization of a moving wheeled vehicle with an attached implement on an inclined support surface. Izvestiya OGAU = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2023; 6(104):124-130. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-124-130>

3. Polikutina E. S., Shchitov S. V., Krivutsa Z. F., Kovshun A. A., Shchitova V. A. Influence of design and technological parameters of machine-tractor units on the traction and coupling qualities of a tractor when working with single-axle trailed machines. Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2025; 9 (251):78–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-251-9-78-84>

4. Asmankin E. M., Tarasova S. V., Naumov D. V. The mechanism of turning the support wheels. In: The Current State and Prospects of Production and Processing of Agricultural Products and Food. Proc. National Sci. Prac. Conf. with Int. Participation (Orenburg, March 15, 2024). Orenburg: Publishing House PROofis. 2024: 5-7. (In Russ.)

5. Rondelli V., Franceschetti B., Mengoli D. A review of current and historical research contributions to the development of ground autonomous vehicles for agriculture. Sustainability. 2022;14(15), 9221. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/su14159221>

6. Polikutina E. S., Shchitov S. V., Krivutsa Z. F., Kovshun A. A., Shchitova V. A. Improving the traction and traction-coupling properties of power vehicles when working with trailer units. Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2025; 207: 245-253. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-207-021>

7. Fayurshin A., Farkhshatov M., Saifullin R. Islamov L., Gaskarov I., Masyagutov R., Bagautdinova I.

8. Improving the durability of cultivator blades using one-sided gas-flame surfacing. Journal of Applied Engineering Science. 2021;19(1):57-67. <https://doi.org/10.5937/jaes0-27725>

9. Tarasova S. V., Stenovskiy V.S. Fundamentals of theoretical and experimental studies of the method of stabilizing the position of a wheeled tractor on a slope. In: Young Scientists and Specialists to the Science and Practice of the Country. Conf. Proc. (Orenburg, 29-30 October 2019). Orenburg: Orenburg State University: IPK "University". 2019: 300-304 (In Russ.)

10. Slepencov A.E., Leonov V.V., Mitrokhina O.P., Kidyaeva N.P., Shchitov S.V., Kuznetsov E.E. Studying of the use of a wheeled tractor and the upgraded disc harrow. Tekhnicheskii servis mashin = Machinery Technical Service. 2022; 1 (146):39-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2022-60-1-39-45>

11. Shchitov S. V., Krivutsa Z. F., Polikutina E. S., Kovshun A. A., Shchitova V. A. Ways of redistribution of power loads on supporting surfaces of machine-tractor unit. Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2025; 5 (247):70-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-247-5-70-74>

Об авторах	About the authors
Тарасова Сария Вале́евна канд. техн. наук, доцент кафедры автомобилей, тракторов и технического сервиса Санкт- Петербургского государственного аграрного университета, 196601, Санкт-Петербург, город Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А saria20@mail.ru https://orcid.org/0009-0001-8347-2534	Saria Valeyevna Tarasova Associate Professor, Cand. Sc. (Engineering), Department of Automobiles, Tractors, and Technical Service, Saint Petersburg State Agrarian University, 196601, Saint Petersburg, Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, Lit. A, saria20@mail.ru https://orcid.org/0009-0001-8347-2534
Ожегов Николай Михайлович д-р. техн. наук, профессор кафедры автомобилей, тракторов и технического сервиса Санкт- Петербургского государственного аграрного университета, 196601, Санкт-Петербург, город Пушкин, Петербургское шоссе, 2, лит. А	Nikolay Mikhailovich Ozhegov DSc (Engineering), Professor, Department of Automobiles, Tractors, and Technical Services, St. Petersburg State Agrarian University, 196601, St. Petersburg, Pushkin, Peterburgskoje Shosse, 2, lit. A
Заявленный вклад авторов Тарасова С.В. – проведение и описание эксперимента Ожегов Н.М. – идея, алгоритм, написание статьи	Authors' contribution Tarasova S.V. – experiment execution and description Ozhegov N.M. – concept, algorithm, article writing
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 одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 02.03.2026	Received: 02.03.2026
Одобрена после рецензирования: 13.04.2026	Approved after reviewing: 13.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

РАЗДЕЛ 2. ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ В АПК

Обзорная статья

УДК 631.1:004 + 001.891

DOI 10.24412/2713-2641-2026-2127-76-88

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМАТИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Ольга Вячеславовна Кондратьева

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

inform-iko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1140-1024>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена стремительной цифровой трансформацией агропромышленного комплекса и сопутствующей методологической разобщенностью, проявляющейся в отсутствии единого понятийного аппарата и стандартизированных подходов к оценке цифровых решений. Это затрудняет сравнительные исследования, формирование стратегий господдержки и выбор технологий сельхозтоваропроизводителями. Цель работы – разработка методологических основ систематизации цифровых технологий в сельском хозяйстве, включающих уточнение понятийно-терминологического аппарата, создание многоуровневой системы критериев оценки и концептуальной модели реестра цифровых решений. В исследовании применены методы системного анализа, сравнительно-сопоставительного анализа, классификации, многокритериальной оценки и моделирования. Эмпирической базой послужили открытые данные Росстата, отчеты Минсельхоза РФ, аналитические обзоры ФГБНУ «Росинформагротех», а также материалы зарубежных каталогов AgriTech-решений (EIP-AGRI, Agri-TechE). В результате уточнена иерархия ключевых понятий: «AgriTech» как индустриальный сектор, «цифровое сельское хозяйство» как его технологическая парадигма, «точное сельское хозяйство» как структурная подсистема, объединяющая точное земледелие и точное животноводство, «умная ферма» – как результат практической реализации. Предложена оригинальная система многоуровневых критериев оценки (технологических, экономических, агроэкологических и социально-управленческих). Ключевым результатом является концептуальная модель реестра цифровых решений для агропромышленного комплекса, основанная на принципах прагматичности и открытости, с двухуровневой классификацией (по целевой функции и технологическому ядру) и стандартизированным форматом карточки решения. Научная новизна заключается в разработке целостной методологии систематизации, интегрирующей функциональный и технологический подходы к классификации и многокритериальной оценке, адаптированной к условиям российского агропромышленного комплекса. Разработанная методология может быть использована для структурированных сравнительных исследований, формирования научно обоснованных стратегий цифровизации и создания практических навигаторов для сельхозтоваропроизводителей.

Ключевые слова: цифровое сельское хозяйство, AgriTech, точное сельское хозяйство, методология, систематизация, классификация, реестр технологий

Для цитирования: Кондратьева О.В. Методологические основы систематизации цифровых технологий в сельском хозяйстве // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 76-89 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-76-88>

Review article

Universal Decimal Code 631.1:004 + 001.891

METHODOLOGICAL BASIS FOR SYSTEMATIZING DIGITAL TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE

Olga V. Kondratieva

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

inform-iko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1140-1024>

Abstract. The relevance of the study is due to the rapid digital transformation of the agro-industrial complex and accompanying methodological fragmentation characterized by the lack of a unified conceptual framework and standardized approaches to evaluating digital solutions. This complicates comparative research, the formulation of state support strategies, and the choice of technologies by agricultural producers. The study aims to develop a methodological framework for systematizing digital technologies in agriculture by clarifying the core concepts and terminology, designing a multi-level evaluation system, and proposing a conceptual model for a digital solutions register. The research uses methods of system analysis, comparative analysis, classification, multi-criteria assessment, and modeling. The empirical base includes open data from the Federal State Statistics Service (Rosstat), reports of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation, analytical reviews of Rosinformagrotech, as well as materials from foreign catalogs of AgriTech solutions (EIP-AGRI, Agri-TechE). As a result, the hierarchy of key concepts has been clarified. Specifically, “AgriTech” is defined as an industrial sector, “digital agriculture” as its technological paradigm, “precision agriculture” as a structural subsystem combining precision crop farming and precision livestock farming, and “smart farm” as the result of practical implementation. The study proposes an original system of multi-level evaluation criteria – o technological, economic, agro-ecological, and socio-managerial. The key result is a conceptual model of a register of digital solutions for the agro-industrial complex, based on the principles of pragmatism and openness, with a two-level classification (by target function and technological core) and a standardized template of solution profiles. The study’s novelty lies in the development of a holistic methodology for systematization, integrating functional and technological approaches to classification and multi-criteria assessment, adapted to the conditions of Russian agriculture. The developed methodology can be used for structured comparative research, the formation of scientifically based digitalization strategies, and the creation of practical guides for agricultural producers.

Keywords: digital agriculture, precision agriculture, AgriTech, systematization, methodology, classification, technology register

For citation: Kondratieva O.V. Methodological basis for systematization of digital technologies in agriculture. AgroEcoEngineering. 2026; 2(127): 76-89 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-76-88>

Введение. Динамичное внедрение цифровых технологий в агропромышленный комплекс (АПК) формирует новый технологический уклад, часто обозначаемый как «Сельское хозяйство 4.0». Однако стремительное развитие этого направления сопровождается нарастающей методологической разобщенностью. Ключевая научная проблема заключается в отсутствии единого, научно обоснованного понятийного аппарата и стандартизированных подходов к систематизации и сравнительной оценке цифровых решений в АПК. Исследователи и практики оперируют терминами «AgriTech», «цифровое сельское хозяйство», «точное земледелие», «умные фермы» зачастую как синонимами [1, 2]. Существующие попытки классификации носят фрагментарный характер, фокусируясь либо на отдельных типах технологий, либо на описании успешных кейсов без выявления универсальных критериев для их сопоставления [3, 4]. Это не только затрудняет научную коммуникацию и сравнительный анализ, но и создает значительные барьеры на пути цифровой трансформации отрасли, затрудняя адаптацию передового опыта, формирование приоритетов государственной поддержки и осознанный выбор технологий сельхозтоваропроизводителями.

Цель исследования – разработка методологических основ для систематического анализа, оценки и классификации цифровых агротехнологий.

Материалы и методы. В исследовании использован комплекс общенаучных и специальных методов. Системный анализ и сравнительно-сопоставительный метод применены для критического анализа эволюции ключевых концепций цифровизации АПК и выявления их иерархической взаимосвязи. Метод классификации использован как основа для построения таксономии цифровых решений. Для разработки и обоснования системы оценочных критериев проведен анализ существующих многокритериальных рамок оценки технологий в АПК, включая подходы, представленные в зарубежных исследованиях [5, 6], а также изучены материалы отечественных и зарубежных каталогов и реестров AgriTech-решений (EIP-AGRI, Agri-TechE, платформа «Цифровое сельское хозяйство» Минсельхоза РФ). Эмпирической базой послужили открытые данные Росстата, отчеты Минсельхоза России, аналитические обзоры ФГБНУ «Росинформагротех» [7, 8], а также публикации в рецензируемых журналах. Метод моделирования применен для разработки концептуальной архитектуры реестра цифровых решений и формата карточки описания технологии. Для верификации предложенной системы критериев и определения весовых коэффициентов предполагается использование метода анализа иерархий (МАИ) Т. Саати, позволяющего перейти от качественных экспертных суждений к количественным показателям. В данной работе этот метод не применялся; представленные результаты ограничиваются разработкой методологической базы.

Результаты исследования. Эволюция концептуальных основ цифровизации АПК. Эволюция концепций цифровизации АПК носит этапный характер, отражая переход от узкотехнологических задач к управлению сквозными процессами [1]. Исходной точкой стала концепция «точного земледелия». Как отмечают ведущие исследователи, точное земледелие следует рассматривать не изолированно, а в рамках более широкой парадигмы «точного сельского хозяйства», структурными подсистемами которого являются точное земледелие и точное животноводство [9].

Сущность точного земледелия заключается не только в управлении внутривидовой пространственной изменчивостью, но и в комплексном подходе к управлению продукционным процессом. Как подчеркивает В.В. Якушев, это «управление продукционным процессом сельскохозяйственных культур с учетом внутривидовой вариативности среды обитания растений» [10, с. 15]. Практическим ядром является создание электронных карт-заданий, реализуемое по одноэтапной или двухэтапной технологии на основе данных дистанционного зондирования, агрохимических обследований и мониторинга урожайности [10, 11].

Расширением данной концепции стало «цифровое сельское хозяйство», которое преодолело границы поля и охватило всю цепочку создания стоимости, интегрируя гетерогенные данные (от метеоданных до рыночных цен) в единые аналитические платформы [2, 12]. Параллельно оформилось понятие «AgriTech», имеющее инновационно-экономическое происхождение и описывающее экосистему стартапов и решений, нацеленных на трансформацию АПК [13]. Конкретным воплощением этих принципов на уровне хозяйствующего субъекта является концепция «умной фермы», представляющей собой киберфизическую систему с высокой степенью автоматизации, использованием алгоритмов искусственного интеллекта и интернета вещей (IoT) [14]. В таблице 1 структурирована эволюция концепций, что позволяет наглядно сопоставить их ключевые атрибуты. В отличие от распространенных подходов, в данной классификации акцентирована иерархическая связь и конкретизированы примеры, охватывающие как растениеводство, так и животноводство.

Таблица 1. Эволюция ключевых концепций цифровизации сельского хозяйства

Table 1. Evolution of key concepts in digitalization of agriculture

Критерий / Концепция	Точное сельское хозяйство	Цифровое сельское хозяйство	AgriTech	Умная ферма
Сущность и фокус	Комплексный подход к управлению продукционным процессом в растениеводстве и животноводстве на основе учета внутрихозяйственной вариативности	Сквозная цифровизация цепочки создания стоимости АПК на основе интеграции данных для управления бизнес-процессами	Инновационно-технологическая экосистема, трансформирующая АПК, включая биотехнологии и новые производственные системы	Киберфизическая система на уровне отдельного предприятия с высокой степенью автоматизации
Технологическое ядро	ГНСС, ГИС, датчики урожайности, ДЗЗ, техника с переменным нормированием, системы управления стадом	Big Data, IoT, облачные платформы, предиктивная аналитика, ИИ	Робототехника, биотех, сенсорики, вертикальные фермы, альтернативный белок	IoT, роботы, компьютерное зрение, ИИ для управления в реальном времени

Объект управления	Поле, участок, стадо, растение/животное	Бизнес-процессы и данные по всей цепочке: от производства до сбыта	Сектор экономики (АПК) в целом, инвестиционные и инновационные потоки	Все физические и информационные активы конкретной фермы
Примеры реализации	дифференцированное внесение удобрений по картограммам урожайности [10]; системы мониторинга здоровья животных (активность, руминация) [14]; автоматическое управление микроклиматом в животноводческих помещениях	комплексные платформы (Climate FieldView, «Агросигнал», «Цифровая земля»); интегрирующие данные для сквозной аналитики [7]	автономные роботы (Tertill, Harvest CROO); вертикальные фермы (iFarm, AeroFarms); альтернативные белки (Beyond Meat).	роботизированные доильные системы с ИИ-анализом качества молока (Lely, DeLaval); умные теплицы с полным климат-контролем на основе машинного обучения (Priva, Hoogendoorn); системы компьютерного зрения для выявления болезней растений

Таблица составлена автором на основе [9, 10, 13, 15]

Предлагается следующая концептуальная иерархия: AgriTech – наиболее общий термин, описывающий весь спектр технологических инноваций в АПК; цифровое сельское хозяйство – его цифровое ядро; точное сельское хозяйство – структурная подсистема, реализующая управление на основе данных на уровне поля/фермы; умная ферма – конечная реализация этих принципов на конкретном предприятии.

Многоуровневая система критериев оценки

Множественность и разнородность цифровых решений в АПК делают необходимой разработку универсального инструментария для их системной оценки. Предлагаемая методология предполагает внедрение многоуровневой системы критериев, объединенных в четыре взаимодополняющих блока, что позволяет оценивать технологии с точки зрения их инновационности, практической полезности, экономической целесообразности и адаптивности к условиям реального производства [6, 16]. Система разработана на основе анализа существующих подходов [5, 6, 17] и экспертного обобщения требований, предъявляемых к цифровым решениям в АПК.

В таблице 2 представлена многоуровневая система критериев и показателей для анализа цифровых технологий.

Таблица 2. Многоуровневая система критериев оценки цифровых агротехнологий

Table 2. Multi-level system of criteria for assessing digital agricultural technologies

№ блока	Критерии оценки	Примечание
1. Технологический	<i>Уровень технологической</i>	Адаптация шкалы TRL для AgriTech (от

Распознает/оценивает зрелость, надежность и совместимость решения	<i>готовности (TRL)</i>	идеи до коммерческого масштабирования)
	<i>Техническая совместимость и открытость</i>	Наличие открытых API, поддержка стандартов обмена данными (ISO 11783, ADAPT), совместимость с распространенным парком техники и ПО
	<i>Надежность и отказоустойчивость</i>	Стабильность работы (например, в условиях сельской местности (перебои со связью, запыленность, влажность, перепады температур)
	<i>Тип технологического ядра</i>	IoT-платформа, спутниковый мониторинг, компьютерное зрение, робототехника, блокчейн и т.д.
2. Экономико-производственный Распознает/оценивает прямые и косвенные экономические эффекты	<i>Модель монетизации и стоимость владения</i>	Единовременная покупка, подписка (SaaS), лизинг; расчет совокупной стоимости владения (TCO)
	<i>Расчетный экономический эффект</i>	Потенциал снижения затрат (семена, СЗР, топливо, вода) и/или увеличения урожайности/качества. NPV, срок окупаемости
	<i>Масштабируемость</i>	Возможность применения решения на предприятиях (от малого бизнеса до крупных) и специализации без пропорционального роста издержек
3. Агроэкологический Распознает/оценивает влияние на устойчивость агросистем	<i>Ресурсоэффективность</i>	Потенциал экономии воды, удобрений, пестицидов, кормов, топлива
	<i>Экологический след</i>	Влияние на сокращение эрозии почв, выбросов парниковых газов (N^2O , CO^2 , CH_4) химической нагрузки на агроценозы
	<i>Адаптивность к климатическим изменениям</i>	Возможности технологии для управления климатическими рисками (засуха, заморозки, переувлажнение и т.д.)
4. Социально-управленческий Распознает/оценивает влияние на человеческий капитал и процессы управления	<i>Требования к компетенциям пользователей</i>	Необходимый уровень цифровой грамотности, агрономических знаний для эффективного использования
	<i>Степень поддержки принятия решений</i>	От простой визуализации данных до выдачи агрономических рекомендаций (DSS) или полностью автономного исполнения
	<i>Влияние на организацию труда</i>	Сокращение рутинного труда, появление новых профессий, изменение структуры управления, повышение привлекательности труда для молодежи

Таблица составлена автором на основе [6, 17]

Представленная система является основой для многокритериального анализа. Ее практическое применение требует формализации в виде алгоритма, включающего настройку

весовых коэффициентов в зависимости от типа хозяйства и решаемой задачи, сбор данных, нормализацию показателей и агрегирование в интегральный профиль технологии.

Концептуальная модель реестра цифровых решений

Управление множеством профилей технологий требует перехода на следующий уровень систематизации – создания структурированного реестра цифровых решений. Такой реестр, будучи логическим развитием методологии критериальной оценки, обеспечивает навигацию в быстрорастущем технологическом ландшафте. Его архитектура выстраивается на основе пяти ключевых принципов:

- 1). Системности и полноты охвата – включение технологий всех уровней готовности и всех сегментов АПК (растениеводство, животноводство, переработка, логистика).
- 2). Единой классификации и структурированности – применение стандартизированного таксономического аппарата (на основе предложенной двухуровневой классификации) для обеспечения фильтрации, поиска и сравнительного анализа.
- 3). Верифицируемости и прозрачности – наличие подтвержденных данных: технической документации, результатов апробаций, ссылок на внедренные кейсы.
- 4). Практической ориентированности (прагматичности) – адаптация структуры и функционала под задачи различных пользователей (сельхозтоваропроизводителей, консультантов, регуляторов, инвесторов).
- 5). Открытости и динамичности – возможность регулярного пополнения и актуализации на основе обратной связи и мониторинга технологических трендов [18].

Иерархическая классификация цифровых решений в реестре

Для навигации предлагается *двухуровневая иерархическая классификация*.

Первый уровень (по целевой функции) ориентирован на решаемую пользователем проблему:

- мониторинг и сбор данных (дистанционное зондирование, IoT-сенсоры, мобильные приложения для полевого учета);
- аналитика и поддержка принятия решений (DSS-системы, предиктивная аналитика, платформы точного земледелия);
- автоматизация и роботизация (беспилотная техника, роботизированные доильные системы, системы автопилотирования);
- управление ресурсами и цепочками поставок (ERP, MES, системы прослеживаемости, блокчейн-платформы);
- цифровые платформы и маркетплейсы (агрегаторы данных, электронные торговые площадки, платформы совместного использования техники).

Второй уровень (по технологическому ядру) раскрывает техническую сущность решения внутри каждой целевой категории (например, внутри «Мониторинга» выделяются: спутниковый мониторинг, аэросъемка с БПЛА, стационарные почвенные датчики, мобильные сенсорные системы, компьютерное зрение).

Формат карточки решения и примеры

В целях обеспечения сопоставимости все записи в реестре оформляются в виде унифицированных карточек, содержащих: базовые сведения (название, разработчик, статус), классификацию, описание решения, оценку по критериальной системе, инфраструктурные требования и ссылки на кейсы внедрения.

Для демонстрации практического применения формата карточки рассмотрим реальные примеры цифровых решений, представленных на российском рынке и прошедших

апробацию в хозяйствах. Данные взяты из открытых источников и отчетов ФГБНУ «Росинформагротех».

Пример 1. Система агромониторинга на базе БПЛА «Геоскан 401» (ООО «Геоскан», Россия)

Целевая функция: мониторинг и сбор данных.

Технологическое ядро: беспилотные летательные аппараты, мультиспектральная съемка, фотограмметрия.

Описание: БПЛА выполняет плановую аэрофотосъемку полей, на основе которой строятся ортофотопланы, карты вегетационных индексов (NDVI, NDRE), выявляются зоны угнетения растений, засоренности, повреждений.

Оценка по критериям: TRL 9 (серийное производство, широкое внедрение). Модель монетизации – продажа оборудования и ПО. Экономический эффект: по данным производителя, применение позволяет увеличить урожайность на 5–15% за счет своевременного выявления проблем и оптимизации обработок²⁰.

Интеграция с ГИС (QGIS, ArcGIS) и отечественными платформами («Агросигнал», «Цифровая земля»).

Инфраструктурные требования: наличие БПЛА, обученного оператора, ПО для обработки данных, доступ к полям.

Внедрение: в АО «Учхоз «Кубань» (Краснодарский край) использование системы позволило сократить потери урожая озимой пшеницы от болезней на 12% за сезон²¹.

Пример 2. Платформа точного земледелия «Агросигнал» (ООО «ИнфоБиск», Россия)

Целевая функция: аналитика и поддержка принятия решений.

Технологическое ядро: облачная платформа, IoT, машинное обучение, интеграция с техникой.

Описание: платформа собирает данные с техники (датчики урожайности, расходомеры, ГЛОНАСС/GPS), метеостанций, спутников, формирует карты-задания для дифференцированного внесения, предоставляет инструменты планирования и учета.

Оценка по критериям: TRL 9. Модель монетизации – подписка (SaaS). Экономический эффект: снижение затрат на удобрения до 20%, увеличение урожайности до 15% [19]. Интеграция с техникой John Deere, Claas, Ростсельмаш.

Пример внедрения: в КФХ «Рассвет» (Липецкая область) внедрение платформы позволило сократить расход топлива на 12%, удобрений – на 18% при росте урожайности на 9% [20].

Обсуждение. Полученные результаты развивают и уточняют существующие подходы к систематизации цифровых технологий в АПК. Предложенная иерархия понятий («AgriTech» – «цифровое сельское хозяйство» – «точное сельское хозяйство» – «умная ферма») отражается в работах Е.В. Труфляка и соавторов [9], где точное земледелие и животноводство рассматриваются как структурные подсистемы, и дополняет их, встраивая в более широкий контекст инновационной экосистемы AgriTech.

²⁰Геоскан 401: технические характеристики и опыт применения [Электронный ресурс] URL: <https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan-401> (дата обращения: 20.02.2026)

²¹ Отчет о внедрении технологий точного земледелия в АО «Учхоз «Кубань». Краснодар: Министерство сельского хозяйства Краснодарского края. 2024. 45 с.

Система критериев развивает методологические подходы, изложенные в трудах В.П. Якушева и В.В. Якушева [11, 21]. Если указанные работы фокусируются на технологических и агрофизических аспектах, то предлагаемый подход расширяет оценочный инструментарий за счет экономико-производственных, агроэкологических и социально-управленческих блоков, что позволяет перейти от узконаучной оценки к комплексному анализу с позиции практического внедрения.

Сравнение с зарубежными классификациями (например, таксономия Agri-TechE, каталоги EIP-AGRI) показывает, что предложенная двухуровневая модель (целевая функция + технологическое ядро) является синтетической и адаптирована к особенностям российского АПК: разнообразию размеров хозяйств, почвенно-климатическим условиям и текущему уровню цифровизации. В отличие, например, от классификации Европейского инновационного партнерства, где акцент сделан на тематических группах, наша модель ориентирована на конечного пользователя – сельхозтоваропроизводителя.

Ограничения предложенной методологии связаны с необходимостью дальнейшей эмпирической верификации весовых коэффициентов критериев. Вероятно, для хозяйств разного размера и специализации приоритеты будут различаться: для малых форм хозяйствования ключевыми могут стать стоимость владения и простота использования, для крупных агрохолдингов – масштабируемость и интеграционный потенциал. Кроме того, социально-управленческие эффекты (цифровая грамотность, изменение организации труда) сложно поддаются прямой количественной оценке; их измерение требует разработки специальных индексов на основе социологических опросов, что является перспективой для дальнейших междисциплинарных исследований.

Предлагаемая структура реестра соответствует международным принципам FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Стандартизированная карточка решения с поддержкой международных протоколов (ISO 11783) и ссылками на верифицированные кейсы создает основу для совместимой базы знаний об агротехнологиях. В перспективе это может способствовать интеграции российского реестра с аналогичными европейскими платформами для целей сравнительного анализа и трансфера технологий.

Заключение. В результате исследования разработаны комплексные методологические основы для систематизации цифровых технологий в сельском хозяйстве:

1. Уточнена иерархия ключевых понятий, где «точное сельское хозяйство» рассматривается как структурная подсистема цифрового сельского хозяйства, объединяющая точное земледелие и точное животноводство;
2. Предложена оригинальная система многоуровневых критериев оценки, объединяющая технологические, экономические, агроэкологические и социально-управленческие аспекты;
3. Создана концептуальная модель реестра цифровых решений для АПК с двухуровневой классификацией (по целевой функции и технологическому ядру) и стандартизированным форматом карточки описания, апробированная на реальных примерах российских разработок.

Практическая значимость разработанной методологии заключается в её применимости для проведения структурированных сравнительных исследований, формирования научно обоснованных государственных стратегий и создания практических навигаторов для сельхозтоваропроизводителей. Дальнейшая работа будет направлена на

эмпирическую верификацию системы критериев с использованием метода анализа иерархий и разработку пилотной версии реестра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьева О. В., Федоров А. Д., Слинько О. В., Войтюк В. А. Совершенствование информационных технологий в отечественном АПК // Техника и оборудование для села. 2023. № 8(314). С. 7-11. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-7-11>
2. Чутчева, Ю. В. Цифровая трансформация сельского хозяйства: от теории к практике // Russian Journal of Management. 2024. № 12 (4). С. 113-123. <https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-113-12>
3. Котылева Е. А. Готовность российского сельского хозяйства к цифровой трансформации // Вестник Академии права и управления. 2024. № 6(81). С. 116-120.
4. Вертакова Ю. В., Булгакова И. Н., Дин Шуи. Методы и инструменты цифровой трансформации предприятий агропромышленного комплекса в условиях индустрии 4.0 // *π-Economy*. 2023. № 16 (5). С. 109-122. <https://doi.org/10.18721/JE.16508>
5. Walter A., Finger R., Huber R. et al. A multi-criteria framework for assessing the sustainability and practicality of digital agriculture solutions // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 214, 108291. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108291>
6. Rose D. C., Wheeler R., Winter M., Lobley Matt, Chivers C.-A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet // *Land Use Policy*. 2021. Vol. 100, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
7. Кондратьева О. В., Мишуrow Н. П., Федоров А. Д. и др. Передовые отечественные программные продукты и цифровые платформы в развитии АПК. М.: Росинформагротех. 2023. 84 с.
8. Мишуrow Н. П., Кондратьева О. В., Гольяпин В. Я. и др. Зарубежный опыт цифровизации сельского хозяйства: аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2022. 224 с.
9. Зубарева Ю.В., Кирилова О.В. Экономическая эффективность внедрения цифровых технологий в растениеводстве // Вестник евразийской науки. 2023. № 15 (4). С. 1-12. – URL: <https://esj.today/PDF/60ECVN423.pdf>
10. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: АФИ. 2016. 363 с.
11. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю.И., Матвеев Д.А. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 8. С. 755-768. <https://doi.org/10.31857/S0869587321080090>
12. Смелик В. А. Технологическая карта для точного земледелия // Цифровые технологии в преподавании профильных дисциплин: Сб. кейсов и практических заданий по развитию цифровых компетенций обучающихся среднего профессионального и высшего образования. Казань: Логос-Пресс. 2023. С. 159-162. EDN: VVFTVS
13. Barman B., Singh R., Padaria R., Quader Sk W., Das A., Nath R. K., Ghosh. B., Munshi S., Sultana S., Meghana N. Mapping the evolution of agriculture 4.0: A bibliometric analysis of research trends. Research Square. 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4948484/v2>

14. Verdouw C. N., Wolfert S., Tekinerdogan B. Internet of Things in agriculture // CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 2016. Vol. 11 (35). P. 1-12. <https://doi.org/10.1079/PAVSNR201611035>
15. Berckmans D., Guarino M., Norton T., D. Berckmans Precision livestock farming: a global perspective // Animal Frontiers. 2019. Vol. 9 (1). P. 4-5. <https://doi.org/10.1093/af/vfy044>
16. Perekopsky A. N., Smelik V. A., Zakharov A. M. Prerequisites and effectiveness of the introduction of precision farming elements in the sowing of grain crops in the Leningrad region // BIO Web of Conferences. 2023. Vol. 67, 02015. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702015>
17. Klerkx L., Rose D. C. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition? // Global Food Security. 2020. Vol. 26, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
18. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review // Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
19. Капсаргина С.А. Цифровизация сельского хозяйства // Право и государство: теория и практика. 2024. № 3(231). С. 32-35. http://doi.org/10.47643/1815-1337_2024_3_32
20. Кейс: Цифровизация КФХ «Рассвет» (Липецкая область) // Сборник лучших практик цифровой трансформации АПК. Под ред. О. В. Кондратьевой. М.: Росинформагротех. 2024. С. 78-84.
21. Якушев В. П., Якушев В. В., Блохина С. Ю., Блохин Ю.И., Матвеев Д.А. Роль дистанционного зондирования Земли в точном земледелии // Вестник РАН. 2023. № 93 (10). С. 955-969. <https://doi.org/10.31857/S0869587323100117>

REFERENCES

1. Kondratieva O. V., Fedorov A. D., Slinko O. V., Voytyuk V. A. Improvement of information technologies in the domestic agro-industrial complex. Tekhnika i oborudovanie dlya sela = Machinery and Equipment for Rural Area 2023;8(314):7-11 (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-8-7-11>
2. Chutcheva Yu. V. Digital transformation of agriculture: from theory to practice. Russian Journal of Management. 2024;12 (4):113-123. (In Russ.) <https://doi.org/10.29039/2500-1469-2024-12-4-113-12>
3. Kotyleva E. A. The readiness of Russian agriculture for digital transformation. Vestnik Akademii prava i upravleniya = Bulletin of the Academy of Law and Management. 2024;1:116-120. (In Russ.) EDN: XXTTZQ
4. Vertakova Yu. V., Bulgakova I. N., Din Shui. Methods and tools of digital transformation of agroindustrial enterprises in the context of Industry 4.0. π-Economy. 2023;16 (5):109-122. (In Russ.) <https://doi.org/10.18721/JE.16508>
5. Walter A., Finger R., Huber R. [et al.] A multi-criteria framework for assessing the sustainability and practicality of digital agriculture solutions. Computers and Electronics in Agriculture. 2023;214, 108291. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108291>
6. Rose D. C., Wheeler R., Winter M., Lobley Matt, Chivers C.-A. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. Land Use Policy. 2021;100, 104933. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>

7. Kondratyeva O. V., Mishurov N. P., Fedorov A. D. et al. Advanced domestic software products and digital platforms in the development of the agro-industrial complex. Moscow: Rosinformagrotekh. 2023. 84 p. (In Russ.)
8. Mishurov N. P., Kondratyeva O. V., Goltypin V. Ya. et al. Foreign experience in digitalization of agriculture: analytical review. Moscow: Rosinformagrotekh. 2022. 224 p. (In Russ.)
9. Zubareva Yu.V., Kirilova O.V. Economic efficiency of the introduction of digital technologies in crop production. Vestnik Evraziiskoi nauki = The Eurasian Scientific Journal. 2023;15 (4): 1-12. URL: <https://esj.today/PDF/60ECVN423.pdf>
10. Yakushev V.V. Precision Farming: Theory and Practice. Saint Petersburg: Agrophysical Research Institute. 2016. 363 p. (In Russ.)
11. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Blokhin Yu. I., Matveenkov D. A. Information support for modern farming systems in Russia. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021;91(8):755-768 (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869587321080090>
12. Smelik V. A. Technological map for precision agriculture. In: Digital Technologies in Teaching Specialized Disciplines. Collection of cases and practical tasks for the development of digital competencies of students of secondary vocational and higher education. Kazan: Logos-Press. 2023:159-162. (In Russ.) EDN: VVFTVS
13. Barman B., Singh R., Bakery R. et al. Analysis of the evolution of agriculture 4.0: bibliometric analysis of research trends. Research Square. 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4948484/v2> – URL: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4948484/v2>
14. Verdouw C. N., Wolfert S., Tekinerdogan B. Internet of Things in agriculture. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources. 2016;11 (35):1-12. (In Eng.) <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201611035>
15. Berckmans D., Guarino M., Norton T., D. Berckmans Precision livestock farming: a global perspective. Animal Frontiers. 2019;9 (1):4-5. (In Eng.) <https://doi.org/10.1093/af/vfy044>
16. Perekopsky A. N., Smelik V. A., Zakharov A. M. Prerequisites and effectiveness of the introduction of precision farming elements in the sowing of grain crops in the Leningrad region. BIO Web of Conferences. 2023; 67, 02015. (In Eng.) <https://doi.org/10.1051/bioconf/20236702015>
17. Klerkx L., Rose D. C. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition? Global Food Security. 2020;26, 100347. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
18. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems. 2017;153:69-80. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
19. Kapsargina S.A. Digitalization of agriculture. Pravo i gosudarstvo: teoriya i praktika = Law and State: The Theory and Practice. 2024;3(231):32-35. (In Russ.) http://doi.org/10.47643/1815-1337_2024_3_32
20. Kondratieva O. V. (ed.). Case: Digitalization of the peasant farm "Rassvet" (Lipetsk region). Collection of Best Practices for Digital Transformation of Agro-Industrial Complex. Moscow: Rosinformagrotekh. 2024:78-84. (In Russ.)
21. Yakushev V. P., Yakushev V. V., Blokhina S. Yu., Blokhin Yu.I., Matveenkov D.A. The role of remote sensing of the Earth in precision agriculture. Vestnik Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2023;93 (10):955-969. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869587323100117>

Об авторах:	About the authors:
Кондратьева Ольга Вячеславовна канд. экон. наук, зав. отделом прогнозно-аналитической информации и консультационного обеспечения ФГБНУ «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, Inform-iko@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1140-1024 +7-925-919-53-13	Olga V. Kondratieva Candidate of Economic Sciences, Head of the Department of Forecasting and Analytical Information and Consulting Support, 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 Inform-iko@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1140-1024 +7-925-919-53-13
Заявленный вклад авторов Автор выполнил весь проект	Authors' contribution One-author article – the author completed the whole project
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The author declares that there is no conflict of interest
Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи к публикации.	The author has read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.01.2026	Received: 26.01.2026
Одобрена после рецензирования: 16.03.2026	Approved after reviewing: 16.03.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ
МИКРОКЛИМАТОМ ТЕПЛИЦЫЕвгений Александрович Рожков^{1✉}, Софико Гелаевна Джалагония²Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар,
Россия¹zhenyacool31@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8607-0252>²jalagonia05@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7710-5658>

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме автоматизации тепличных комплексов с применением современных оптико-электронных методов контроля и управления. Исследование продиктовано глобальными вызовами, такими как рост населения, сокращение плодородных земель и изменение климата, которые требуют перехода к высокотехнологичному и ресурсосберегающему сельскому хозяйству. Целью работы является разработка и обоснование алгоритма работы оптико-электронной системы для прецизионного контроля и управления микроклиматом теплицы, направленного на максимизацию продуктивности сельскохозяйственных культур. В качестве материалов и методов исследования рассматривается комплекс современных оптико-электронных систем: пиранометры для измерения солнечной радиации, мультиспектральные камеры для расчета вегетационных индексов (NDVI), датчики температуры, влажности и концентрации CO₂. В качестве объекта исследования выбрана теплица ангарно-туннельного типа площадью 200 м² для выращивания томатов. Основные результаты работы включают разработанную архитектуру интеллектуальной системы управления, которая в реальном времени на основе данных сенсоров регулирует работу систем отопления, вентиляции, полива, досветки и внесения CO₂. Представлен детальный алгоритм поддержания оптимального микроклимата в течение суток. Особое внимание уделено автоматизированной системе полива, использующей расчет эвапотранспирации и данные спектрального анализа для адаптивного орошения, что позволяет экономить до 50% воды. Проведены расчеты по подбору насосного оборудования, подтверждающие эффективность предложенных решений. Делается вывод о том, что интеграция оптико-электронных методов позволяет перейти от реактивного к прецизионному управлению, существенно повышая урожайность, качество продукции и рентабельность тепличного производства, делая его доступным для хозяйств разного масштаба.

Ключевые слова: теплица, микроклимат, оптико-электронные методы, спектральный анализ, фотосинтез, прецизионное земледелие, фитомониторинг, гиперспектральная съемка, NDVI.

Для цитирования: Рожков Е.А., Джалагония С.Г. Применение оптико-электронных методов контроля и управления микроклиматом теплицы // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2 (127). С. 89-102 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-89-101>

IMPLEMENTATION OF OPTOELECTRONIC TECHNOLOGIES FOR GREENHOUSE ENVIRONMENT MONITORING AND CONTROL

Evgeniy A. Rozhkov ^{1✉}, Sofiko G. Jalagonia ²
I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

¹zhenyacool31@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8607-0252>

²jalagonia05@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7710-5658>

Abstract. The article addresses the pressing issue of automating greenhouse complexes using modern optoelectronic monitoring and control methods. The research is driven by global challenges such as population growth, the reduction of arable land, and climate change. These necessitate a transition to high-tech and resource-efficient agriculture. The aim of this work is to develop and substantiate an algorithm for the operation of an optoelectronic system for precision control and management of greenhouse microclimate, designed to maximize crop productivity. The research materials and methods involve a range of modern optoelectronic systems: pyranometers for measuring solar radiation, multispectral cameras for calculating vegetation indices (NDVI), and sensors for temperature, humidity, and CO₂ concentration. The object of study is a 200 m² tunnel-type greenhouse for tomato cultivation. The key results include an architecture of an intelligent control system that regulates the operation of heating, ventilation, irrigation, lighting, and CO₂ enrichment systems in real-time based on sensor data. The article presents a detailed algorithm for maintaining the optimal microclimate throughout the day. We particularly focus on the automated irrigation system, which uses evapotranspiration calculations and spectral analysis data for adaptive watering. This enables water savings of up to 50%. Calculations for selecting pump equipment confirm the effectiveness of the proposed solutions. The conclusion is that the integration of optoelectronic methods facilitates a shift from reactive to precision management, significantly increasing yield, product quality, and production profitability, thereby making this approach accessible for farms of various scales.

Key words: greenhouse, microclimate, optoelectronic methods, spectral analysis, photosynthesis, precision agriculture, phytomonitoring, hyperspectral imaging, NDVI.

For citation: Rozhkov E.A., Jalagonia S. G. Implementation of optoelectronic technologies for greenhouse environment monitoring and control. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 89-102 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-89-101>

Введение. Актуальность автоматизации тепличных комплексов в АПК сегодня невозможно переоценить. Это не просто тенденция, а стратегическая необходимость для обеспечения продовольственной безопасности, устойчивого развития и экономической эффективности аграрного сектора. Автоматизация является ключевым драйвером перехода от трудоемкого и зависимого от природы сельского хозяйства к высокотехнологичной, наукоемкой и прогнозируемой отрасли [1, 2, 3].

По прогнозам ООН, к 2050 году население Земли достигнет 9,7 млрд человек, что потребует увеличения объемов производства продовольствия на 60-70% [4, 5]. Уменьшаются площади плодородных земель, пригодных для традиционного земледелия. Теплицы позволяют выращивать продукты на неплодородных почвах и вблизи мегаполисов, сокращая логистические цепочки. Учащение экстремальных погодных явлений (засухи, заморозки, град) делает традиционное земледелие все более рискованным. Защищенный грунт обеспечивает стабильность производства независимо от внешних условий.

Системы капельного полива и влагочувствительные датчики экономят до 50% воды по сравнению с традиционными методами. Умное управление отоплением, вентиляцией и досветкой на основе прогноза погоды и реальных потребностей растений снижает энергозатраты – одну из крупнейших статей расходов. Прецизионное внесение питательных растворов и пестицидов строго по потребности минимизирует расходы и экологическую нагрузку. Круглогодичное производство, идеальные условия для роста и максимальная реализация генетического потенциала культуры приводят к увеличению урожайности в 3-5 раз и получению стандартизированной, высококачественной продукции [6, 7, 8].

Развитие и удешевление технологий (IoT, сенсоры, облачные вычисления, AI) сделали автоматизацию доступной не только для крупных агрохолдингов, но и для средних хозяйств. Современные системы на основе искусственного интеллекта и больших данных не просто реагируют на изменения, но и прогнозируют их [9, 10]. Они могут предсказать вспышку болезни, рекомендовать оптимальный режим подкормки или спрогнозировать урожайность. Автоматизация эволюционирует от простого поддержания температуры к управлению фотосинтезом. Это высшая форма автоматизации, когда система в реальном времени по состоянию растений (через оптические датчики) регулирует все параметры среды для максимизации скорости роста.

Эффективное управление водными и энергетическими ресурсами становится ключевым фактором успешной работы как тепличных комплексов, так и всего агропромышленного комплекса. Применяемые временные схемы полива зачастую игнорируют физиологические потребности культур и микроклиматические условия, приводя к избыточному расходу ресурсов, вымыванию удобрений и падению продуктивности растений. Современные оптико-электронные системы мониторинга обеспечивают бесконтактное определение физиологического состояния растений и параметров окружающей среды с высокой точностью. Автоматизированные комплексы управления поливом на основе интеллектуальных алгоритмов позволяют организовать подачу воды в строгом соответствии с потребностями культур [11]. Внедрение подобных технологических решений способствует существенному повышению рентабельности тепличного производства при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду.

Цель исследования – разработка и обоснование алгоритма работы оптико-электронной системы для прецизионного контроля и управления микроклиматом теплицы, направленного на максимизацию продуктивности сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. Комплексное изучение современных оптико-электронных измерительных систем, применяемых для мониторинга тепличных комплексов, легло в основу исследовательской работы. Анализ подверглись сенсорные устройства определения влажности грунта, функционирующие посредством замера диэлектрической проницаемости с оптической калибровкой. Проведена оценка пиранометров и фотодиодных измерителей, измеряющих уровень фотосинтетически активной радиации и суммарного солнечного излучения.

Пиранометр — это высокоточный прибор для измерения суммарной и рассеянной солнечной радиации (солнечного излучения), падающей на горизонтальную поверхность. Для проведения исследования был выбран пиранометр ICBCOM ICB200-03, который может быть использован для точного расчета фотосинтетически активной радиации (ФАР), управления досветкой в теплицах, оценки испарения и планирования полива. Данный пиранометр широко применяется и описан как в российской, так и в зарубежной литературе

[12, 13]. Нелинейность прибора составляет 2%, класс точности – первый. Стандартный диапазон работы выбранного прибора от 285 до 3000 нм и охватывает весь диапазон солнечного излучения, достигающего поверхности Земли [14, 15]. Для измерения ФАР (400-700 нм) используются специальные квантометры (фотодиодные PAR-сенсоры), которые калибруются в микромолях на м²/с.

Значительный акцент сделан на исследовании спектрорадиометрических приборов и мультиспектральных камер, обеспечивающих расчет вегетационных показателей, включая NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), отражающих концентрацию хлорофилла, степень стресса растений, объем биомассы и стадии развития [16]. Использование мультиспектральных камер трансформирует теплицу из объекта, где микроклимат контролируется по косвенным параметрам (температура, влажность), в биофизическую систему с обратной связью. Главное преимущество – переход от реактивного к предиктивному и прецизионному управлению, где микроклимат адаптируется не по графику, а под реальные, объективно измеренные потребности каждого участка посева. Это прямой путь к максимизации урожайности, качества продукции и ресурсной эффективности. Рассмотрены измерительные приборы температурного режима воздушной среды и почвенного слоя.

В качестве объекта исследования выбрана теплица площадью 200 м² ангарно-туннельного типа для выращивания томатов. Она относительно недорогая, простая в монтаже, хорошо подходит для сезонного производства. Основные параметры теплицы приведены в таблице.

Таблица. Ключевые параметры теплицы для выращивания томатов и оптимального микроклимата, поддерживаемого в ней

Table. Key parameters of a greenhouse for growing tomatoes and the optimal microclimate maintained in it

Параметр	Рекомендуемое значение	Примечание
Конструкция	Ангарная, высота от 3 м	Высота критична для климата
Покрытие	Сотовый поликарбонат (4-6 мм)	Лучшая теплоизоляция и долговечность
Вентиляция	Автоматические форточки (20-25% от площади)	Обязательно для избегания перегрева
Температура (день)	+22...+26°C	Не выше +30°C
Температура (ночь)	+16...+18°C	
Влажность	60-70%	Контроль для профилактики болезней
Световой день	10-12 часов	Зимой обязательна досветка
Концентрация CO₂	800-1000 мг/м ³	Существенно повышает урожайность
Система	Малообъемная (на субстрате)	Максимальный контроль и эффективность
Полив	Капельный, 1-5 л/растение/день	

Для успешного выращивания томатов важно не просто построить теплицу, а создать управляемую среду, где вы можете точно поддерживать указанные параметры. Поэтому рассмотрим использование методов оптико-электронного контроля для управления

ключевыми параметрами микроклимата в рассматриваемой теплице.

Результаты. Создание и поддержание оптимального микроклимата в теплице для обеспечения максимальной урожайности и качества продукции включают в себя: поддержание оптимальной температуры воздуха и почвы; регулирование влажности воздуха и почвы; оптимизацию уровня освещенности; контроль концентрации CO₂; минимизацию потребления энергии; предотвращение экстремальных условий (перегрев, переохлаждение, засуха, избыточная влажность).

Предлагаемая система использует следующие датчики для мониторинга параметров микроклимата: датчики температуры воздуха и почвы, датчик влажности, освещенности, концентрации CO₂, пирометр и фотокамеру.

В результате анализа литературных источников, была предложена система автоматического управления поливом растений в теплице, технологическая схема которого приведена на рисунке. Данная схема является типовой и достаточно широко применяется в России компанией Профит Агро [17]. Представленная типовая система климат-контроля представляет собой комплекс независимых модулей, каждый из которых специализируется на управлении конкретным параметром среды. Автоматизация работы насосного оборудования в тепличных комплексах требует комплексного мониторинга множества параметров посредством оптико-электронных систем контроля. Влагосодержание почвенного субстрата в зоне корневой системы определяется высокоточными оптико-электронными методами. Солнечная радиация, особенно фотосинтетически активная, служит определяющим фактором транспирации растений – повышенная освещенность увеличивает потребление воды. Спектральный анализ вегетационных индексов, включая NDVI, выявляет признаки водного дефицита на ранних стадиях, сигнализируя системе об изменении режима орошения.

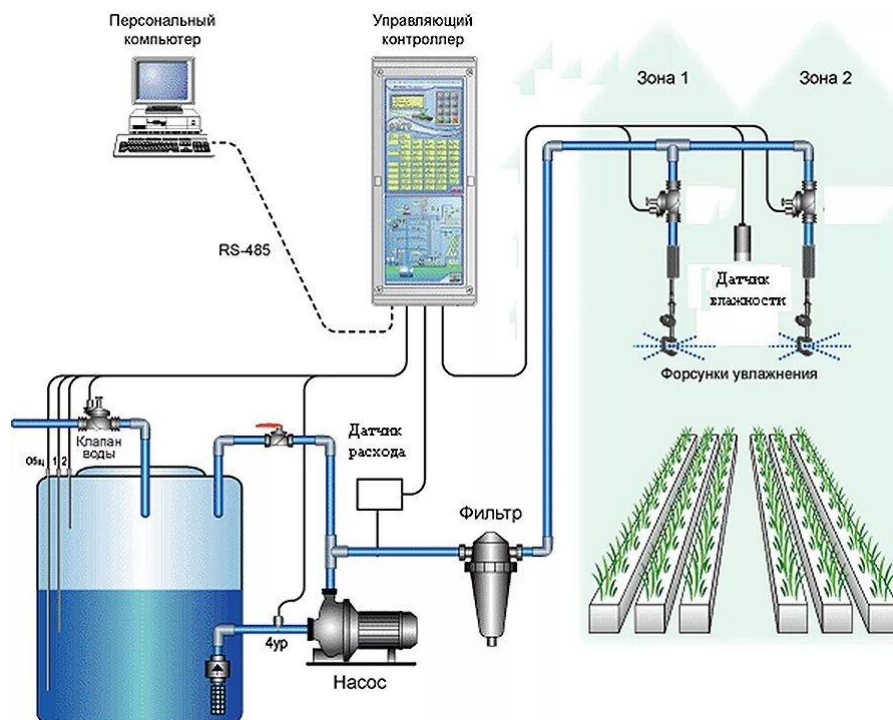


Рис. Технологическая схема управления работой насосом в теплице
Fig. Technological scheme for controlling the operation of a pump in a greenhouse

Мониторинг спектральных характеристик позволяет определять потребность культур в элементах питания, влияющих на водный баланс. Температурные показатели воздушной и почвенной среды корректируют скорость влагоиспарения и метаболические процессы. Автоматизированная система формирует несколько режимов работы насосного оборудования на основе анализируемых параметров. Адаптивный полив активируется при снижении влажности ниже расчетного порога с учетом текущей освещенности и показателей NDVI.

Также рациональна интеграция мультиспектральных камер и нейронных сетей, которая представляет собой не просто модернизацию, а смену парадигмы управления – от кибернетической системы, стабилизирующей параметры среды, к когнитивной агрофизиологической системе. Использование такого комплекса технологических решений помогает воспринимать состояние растений напрямую через спектральные портреты, принимать превентивные и прецизионные управляющие решения, а также самообучаться на основе достигнутого агрономического результата.

Программный полив применяется на начальных этапах вегетации определенных культур, корректируясь по данным оптико-электронного мониторинга освещенности и температуры. Импульсный режим обеспечивает поддержание оптимальной влажности короткими включениями насоса при минимальных отклонениях показателей. Режим минимальной производительности включается при неблагоприятных условиях – недостаточном освещении, повышенной влажности воздуха, выявленных стрессовых состояниях растений. Частотное регулирование скорости насоса позволяет точно дозировать подачу воды согласно расчетной потребности. Результативность системы определяется корректной калибровкой датчиков, установкой пороговых значений параметров для конкретных культур и качеством алгоритма обработки данных.

Применение оптико-электронного контроля значительно превосходит системы с простыми датчиками влажности благодаря учету физиологического состояния растений и условий окружающей среды.

Для проверки эффективности предложенной схемы автоматического управления работой насосом с применением средств оптико-электронного контроля, были проведены испытания на выделенном участке теплицы агрокомбината «Тепличный». Проведенные опытные испытания доказали результативность разработанной автоматизированной системы управления. Внедрение технологических решений при культивировании томатных культур в зимних тепличных комплексах позволило получить следующие количественные показатели эффективности.

Эталонная эвапотранспирация (ET_0) характеризует максимально допустимое испарение влаги с земельного участка при заданных параметрах растительного покрова. Методология определения референтной эвапотранспирации позволяет оценивать потенциальное испарение эталонного растительного покрова вне зависимости от видового состава и стадии вегетации. Метеорологические и климатические параметры выступают определяющими факторами формирования референтной эвапотранспирации. Количественная оценка референтной эвапотранспирации отражает влияние погодных условий на процессы влагообмена.

Суточная потребность в воде рассчитывается по следующей формуле:

$$ET_0 = \frac{K_c \cdot (0,8 \cdot R_g + 2 \cdot T_a)}{100} = \frac{0,85 \cdot (0,8 \cdot 185 + 2 \cdot 22)}{100} = 1,632, \quad (1)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация, мм/сут; R_g – суммарная солнечная радиация (ФАР) (185 Вт/м^2); T_a – среднесуточная температура воздуха ($22 \text{ }^\circ\text{C}$); K_c – биологический коэффициент (для томата 0,85).

Исходя из расчетов суточной потребности тепличного комплекса в воде можно более точно подобрать насосное оборудование с оптимальными эксплуатационными характеристиками. Для расчета используем характеристика консольного моноблочного насоса Ливгидромаш КМ50-32-125а-т, 1,5 кВт. Производительность насоса рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{P \cdot 3600}{\rho \cdot g \cdot H} = \frac{1,5 \cdot 3600}{1000 \cdot 9,81 \cdot 16} = 0,034 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где Q – производительность насоса, $\text{м}^3/\text{ч}$; P – мощность насоса (1,5 кВт); ρ – плотность жидкости (1000 кг/м^3); H – напор жидкости, (16 м).

Обсуждение. Проводя анализ полученных результатов испытания автоматической оптико-электронной системы управления работой насоса, были сделаны выводы о конструктивных особенностях системы и алгоритме ее работы. В качестве датчика температуры воздуха возможно использование термистора или термопары, которая преобразует температуру в электрический сигнал, может быть установлен в разных зонах теплицы для мониторинга градиента температуры. Датчик температуры почвы аналогичен датчику температуры воздуха, но предназначен для измерения температуры почвы на различной глубине.

Датчик влажности воздуха (гигрометр) преимущественно используется емкостный, резистивный или психрометрический и измеряет относительную влажность воздуха. Датчик освещенности (люксметр) обычно представлен фотодиодом или фототранзистором, который преобразует интенсивность света в электрический сигнал. Может измерять как общий уровень освещенности, так и спектральный состав света (для контроля качества света). Пирометр (инфракрасный термометр) способен дистанционно измерять температуру поверхности растений, не повреждая их. Позволяет оценить водный стресс и состояние растений. Фотокамера позволяет проводить визуальный мониторинг состояния растений (рост, цвет, наличие болезней) с использованием алгоритмов машинного зрения [19, 20].

На основе данных, полученных от датчиков, система управляет следующими устройствами:

1. Система отопления: тепловые пушки, инфракрасные обогреватели, водяные системы отопления; необходима для поддержания оптимальной температуры воздуха и почвы.

2. Система охлаждения: вентиляторы, системы испарительного охлаждения (туманообразование), системы зашторивания, которые используются для снижения температуры воздуха в жаркое время.

3. Система вентиляции: вентиляторы, фрамуги, которые обеспечивают циркуляцию воздуха, удаление избыточной влаги и регулирование концентрации CO_2 .

4. Система полива: капельный полив, дождевание, системы гидропоники.

5. Система освещения: фитолампы (LED, натриевые, металлогалогенные), обеспечивающие дополнительное освещение в периоды недостаточной естественной освещенности.

6. Система зашторивания: механические шторы или пленки, необходимые для регулировки уровня освещенности и теплоизоляции.

7. Система внесения CO_2 : газовые баллоны с CO_2 и система дозирования, необходимая для повышения концентрации CO_2 для стимулирования фотосинтеза.

Проведённые испытания в тепличном комплексе позволили выявить и обосновать наиболее рациональный алгоритм его функционирования. Внедрение этого алгоритма способствует повышению урожайности томатов на 12,30% при одновременном снижении энерго- и водопотребления на 5,32%. Рассмотрим пример работы алгоритма по поддержанию оптимального микроклимата в теплице для выращивания томатов в течение дня в летнее время. Утром в 06:00 система считывает данные со всех датчиков. Когда температура воздуха в теплице 14°C (ниже ночной уставки), а влажность воздуха 85% (в пределах ночной уставки) при низкой освещенности, включается система отопления (тепловые пушки на минимальной мощности) для повышения температуры воздуха до 16°C . Боковые фрамуги должны быть закрыты для сохранения тепла. Включается система освещения на 50% мощности (для компенсации недостатка естественного света). Полив не требуется, потому что влажность почвы в пределах уставки. Система внесения CO_2 не включается, так как в утреннее время уровень CO_2 в пределах нормы.

В 10:00 система также должна проверить данные со всех датчиков. Если температура воздуха 20°C (в пределах дневной уставки), влажность воздуха 75% (выше дневной уставки), освещенность достаточная или выше порогового значения, система отопления отключается, так как температура достигла уставки. Открываются боковые фрамуги на 20% для снижения влажности. Система освещения отключается, потому что достаточно естественного света, полив не требуется, а вот система внесения CO_2 включается на 30% мощности для поддержания уровня CO_2 .

Днем в 14:00 происходит анализ данных со всех датчиков. При температуре воздуха 30°C (выше дневной уставки), влажности воздуха 65% (в пределах дневной уставки), очень высокой освещенности, включается система вентиляции, то есть вытяжные вентиляторы работают на 70% мощности и фрамуги открыты на 80% для снижения температуры. Затеняющие шторы закрываются на 50% для снижения освещенности и температуры. Полив включается на 15 минут до установления оптимальной влажности почвы. Система внесения CO_2 выключается.

Вечером в 18:00 если температура воздуха 25°C (в пределах дневной уставки), влажность воздуха 60% (в пределах дневной уставки), освещенность низкая (ниже порогового значения), то система вентиляции уменьшает мощность вытяжных вентиляторов на 30% мощности и фрамуги открыты на 30%. Затеняющие шторы открываются полностью. Система освещения включается на 50% мощности. Полив не требуется, система внесения CO_2 выключается.

Ночью в 22:00 система считывает данные со всех датчиков. Если температура воздуха 15°C (ниже ночной уставки), влажность воздуха 80% (в пределах ночной уставки), освещенность отсутствует, то включается система отопления (тепловые пушки на минимальной мощности) для поддержания температуры воздуха на уровне 16°C . Боковые фрамуги закрываются. Система освещения выключается. Полив не требуется.

Результаты проведенных по формулам 1 и 2 расчетов показали, что производительность выбранного насосного агрегата полностью соответствует вычисленным показателям расхода воды при орошении растений, гарантируя стабильную работу системы полива. Комплексная оптимизация параметров водоснабжающего оборудования

обеспечивает максимальную энергоэффективность всей гидротехнической системы теплицы при сохранении высокой надёжности эксплуатации.

Выводы. Автоматизация тепличных комплексов на основе оптико-электронных методов является стратегически важным направлением для повышения продуктивности и устойчивости сельского хозяйства. Внедрение таких систем позволяет перейти от реактивного управления к прецизионному контролю микроклимата в режиме реального времени. Применение современных датчиков (пиранометров, спектрометров, мультиспектральных камер, термопар, гигрометров) позволяет точно оценивать, как параметры окружающей среды, так и физиологическое состояние растений. Это обеспечивает возможность управления процессами фотосинтеза, полива и питания на основе объективных данных.

Разработанная система управления микроклиматом для теплицы площадью 200 м² демонстрирует высокую эффективность за счёт поддержания оптимальных параметров (температура, влажность, освещённость, концентрация CO₂); автоматического регулирования работы систем отопления, вентиляции, полива и досветки; адаптации режимов работы к изменяющимся условиям в течение суток.

Внедрение алгоритмов управления поливом на основе расчёта эвапотранспирации и данных оптико-электронного мониторинга позволяет значительно сократить расход воды (до 50%) и минимизировать стресс у растений. Подбор насосного оборудования с учётом реальных потребностей обеспечивает энергоэффективность и надёжность системы.

Результаты испытаний подтвердили, что использование предложенных решений позволяет увеличить урожайность томатов, улучшить качество продукции и снизить эксплуатационные затраты. Проведенные испытания на выделенном участке в 25 м² тепличного комплекса по выращиванию томатов «Тепличный», установили, что использование автоматической системы контроля полива с применением средств оптико-электронного контроля, увеличивает урожайность и снижает энерго- и водопотребление. Так, урожайность томатов сорта «Гелиос F1» повысилась с 350 кг до 394 кг, что составляет прирост около 12,30 %. Водопотребление снизилось с 550 л за один полив до 520 л, что составляет снижение в 5,32%. Это делает автоматизированные тепличные комплексы доступными не только для крупных агрохолдингов, но и для малых фермерских хозяйств.

Таким образом, интеграция оптико-электронных методов контроля в системы управления теплицами открывает новые возможности в сфере АПК, где ключевую роль играют точность, адаптивность и эффективность использования ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адамень Ф. Ф., Коковихин С. В., Сташкина А. Ф. Научное обоснование агротехнологий на неполивных и орошаемых землях Северного Причерноморья в современных эколого-мелиоративных и хозяйственно-экономических условиях // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2024. № 38(201). С. 180-198. EDN: TRNHRM
2. Лебедев Д. В., Рожков Е. А. Исследование зараженности семян пшеницы фузариозом оптико-электронным методом // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сб. науч. статей по итогам десятой межд. науч. конф. (Казань, 30 ноября 2019 г.). Казань: КОНВЕРТ. 2019. Часть 1. С. 165-167. EDN: YVWPMC

3. Taleghani A., Almassi M., Ghahderijani M. Energy sources analysis and optimization of energy efficiency and greenhouse gases in production of farm crops // *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2025. Vol. 47(1). P. 1611-1625. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1832160>
4. Бабицкий Л. Ф., Османов Э. Ш. Бионический подход к созданию устройств биологического метода борьбы с вредителями сельскохозяйственных растений // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025. № 41(204). С. 134-140. EDN: CQYNUG
5. Гербер Ю. Б., Красовский В. В. Технологии интеллектуального анализа и принятия решений в садоводстве // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2024. № 37(200). С. 186-198. EDN: DOAPNV
6. Li X., Aftab S., Mukhtar M., Kabir F., Khan M. F., Hegazy H. H., Akman E. Exploring nanoscale perovskite materials for next-generation photodetectors: a comprehensive review and future directions // *Nano-Micro Letters*. 2025. Vol. 17 (1), 28. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01501-6>
7. Рожков Е. А. Параметры и режимы работы оптико-электронной установки для сортировки семян пшеницы в селекционных центрах: дис. ... канд. техн. наук. Краснодар: КубГАУ. 2024. 174 с. EDN: PJVFGR
8. Сташкина А. Ф. Агролесомелиорация и моделирование процессов накопления углерода в экосистемах Крыма // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2024. № 39(202). С. 133-146. EDN: HRPHT
9. Zhu L., Liu Y.-Q., Wan J.-Yi., Sun Z.-J., Han D.-D., Chen Q.-D., Zhang Y.-L. Ultra-compact on-chip camera based on optoelectronic compound eyes with nonuniform ommatidia // *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2025. Vol. 7(1), 015502. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad8738>
10. Лебедев Д. В., Рожков Е. А. Многоуровневая оптико-электронная система контроля жизнедеятельности соболей // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2020. Т. 67, № 4(41). С. 68-74. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-68-74>
11. Воложанинов С. С., Завалий А. А., Ржевская В. С., Воложанинова Н.В., Волобуев Д.Д. Экспериментальное исследование влияния нагрева массива почвы сверхвысокочастотным излучением на количество микроорганизмов // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2025. № 41(204). С. 153-167. EDN: PGWAXG
12. Sainju U. M., Stevens W. B., Jabro J. D., Allen B. L., Iversen W.M., Chen C., Alasinrin S. Y.
13. Greenhouse gas emissions from tillage practices and crop phases in a sugarbeet-based crop rotation // *Soil Science Society of America Journal*. 2025. Vol. 89 (1), e20786 <https://doi.org/10.1002/saj2.20786>
14. Рожков Е. А. Применение оптико-электронных сепараторов для сортировки семян пшеницы по заданным физическим параметрам // *Теоретический и практический потенциал современной науки. Сб. науч. статей. М.: Издательство «Перо». 2019. Часть V. С. 147-150. EDN: MITGCE*
15. Milosevic M., Converse P. D., Moon N. A., Fedele D., McFerran M.W., al-Qallawi S. The process model of self-control: Developing a measure of self-control strategies // *Applied Psychology*. 2025. Vol. 74(1), e12566. <https://doi.org/10.1111/apps.12566>

16. Лебедев Д. В., Рожков Е. А., Рудь Е. Е. Зависимость качества изображения объекта от угла наклона камеры фотосепаратора // Сельский механизатор. 2022. № 1. С. 28-29. EDN: MMQQYE

17. Юдаев, И. В., Рожков Е. А. Исследование методов обнаружения дефектов семян пшеницы по изображению современными фотосепараторами // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4(76). С. 76-84. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2023_4_76-84

18. Рожков Е. А. Расчет экономической эффективности оптико-электронной установки для сортировки семян различных зерновых культур // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 4(49). С. 25-30. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-25-30>

REFERENCES

1. Adamen F. F., Kokovikhin S. V., Stashkina A. F. Scientific justification of agricultural technologies on non-irrigated and irrigated land of the Northern Black Sea Region in modern ecological-reclamation and economic conditions. *Izvestiya sel'skokhozyaistvennoi nauki Tavridy* = Transactions of Taurida Agricultural Science. 2024;38(201): 180-198. (In Russ.) EDN: TRHHRM

2. Lebedev D. V., Rozhkov E. A. Investigation of infection of wheat seeds with fusarium by optical-electronic method. In: *Advanced Innovative Developments. Prospects and Experience of Use, Problems of Introduction into Production. Proc. 10th Int. Sci. Conf. (Kazan, November 30, 2019)*. Kazan: KOVERT Publ. 2019;1:165-167. (In Russ.) EDN: YVWPMC

3. Taleghani A., Almassi M., Ghahderijani M. Energy sources analysis and optimization of energy efficiency and greenhouse gases in production of farm crops. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2025; 47(1): 1611-1625. (In Eng.) <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1832160>

4. Babitsky L. F., Osmanov E. Sh. Bionic approach to the creation of biological pest control devices for agricultural plants. *Izvestiya sel'skokhozyaistvennoi nauki Tavridy* = Transactions of Taurida Agricultural Science. 2025; 41(204): 134-140. (In Russ.) EDN: CQYNUG

5. Gerber Y. B., Krasovskiy V. V. Technologies of intellectual analysis and decision-making in horticulture. *Izvestiya sel'skokhozyaistvennoi nauki Tavridy* = Transactions of Taurida Agricultural Science. 2024; 37(200): 186-198. (In Russ.)

6. Li X., Aftab S., Mukhtar M., Kabir F., Khan M. F., Hegazy H. H., Akman E. Exploring nanoscale perovskite materials for next-generation photodetectors: a comprehensive review and future directions. *Nano-Micro Letters*. 2025; 17(1), 28. (In Eng.) <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01501-6>

7. Rozhkov E. A. Parameters and operating modes of an optoelectronic plant for sorting wheat seeds in breeding centers: diss ... Candidate of Technical Sciences. Krasnodar: KubGAU. 2024. 174 p. (IIIrd Russ.) EDN: PJVFGH

8. Stashkina A. F. Agroforestry reclamation and modeling of carbon accumulation processes in Crimean ecosystems. *Izvestiya sel'skokhozyaistvennoi nauki Tavridy* = Transactions of Taurida Agricultural Science. 2024;39(202):133-146. (In Russ.) EDN: HRPHTV

9. Zhu L., Liu Y.-Q., Wan J.-Yi., Sun Z.-J., Han D.-D., Chen Q.-D., Zhang Y.-L. Ultra-compact on-chip camera based on optoelectronic compound eyes with nonuniform ommatidia. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2025; 7(1), 015502. (In Eng.) <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad8738>

10. Lebedev D. V., Rozhkov E. A. Multi-level optical-electronic system for monitoring the vital activity of sables. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK = Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2020; 67(4(41));68-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-68-74>
11. Volozhaninov S. S., Zavaly A. A. Rzhevskaya V. S., Volozhaninova N.V., Volobuev D.D. Experimental study of the effect of heating of a soil mass by ultrahigh frequency radiation on the number of microorganisms. *Izvestiya sel'skokhozyaistvennoi nauki Tavridy = Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2025;41(204):153-167. (In Russ.) EDN: PGWAXG
12. Sainju U. M., Stevens W. B., Jabro Ja. D., Allen B. L., Iversen W.M., Chen C., Alasinrin S. Y.
13. Greenhouse gas emissions from tillage practices and crop phases in a sugarbeet-based crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*. 2025; 89 (1), e20786 (In Eng.) <https://doi.org/10.1002/saj2.20786>
14. Rozhkov E. A. Application of optoelectronic separators for sorting wheat seeds according to specified physical parameters. In: *Theoretical and Practical Potential of Modern Science. Coll. Sci. Articles*. Moscow: Pero Publishing House. 2019. Part V. pp. 147-150. (In Russ.) EDN: MITGCE
15. Milosevic M., Converse P. D., Moon N. A., Fedele D., McFerran M.W., al-Qallawi S. The process model of self-control: Developing a measure of self-control strategies. *Applied Psychology*. 2025;74(1), e12566 (In Eng.) <https://doi.org/10.1111/apps.12566>
16. Lebedev D. V., Rozhkov E. A., Rud E. E. The dependence of the image quality of the object on the angle of inclination of the camera of the photoseparator. *Sel'skii mekhanizator = Rural Specialist on Mechanization*. 2022;1:28-29. (In Russ.) EDN: MMQQYE
17. Yudaev I. V., Rozhkov E. A. Investigation of methods for detecting defects of wheat seeds by image with modern photo separators. *Vestnik Izhevskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2023; 4(76):76-84. (In Russ.) https://doi.org/10.48012/1817-5457_2023_4_76-84
18. Rozhkov, E. A. Economic efficiency of the optoelectronic installation for sorting seeds of various agricultural crops. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK = Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;69(4):25-30. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2022-69-4-25-30>

Об авторах	About the authors
Евгений Александрович Рожков , канд. тех. наук; доцент, кафедра физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, улица им. Калинина, дом 13) zhenyacool31@yandex.ru https://orcid.org/0009-0003-8607-0252	Evgeniy A Rozhkov , Cand. Sc. (Engineering); Associate Professor, Department of Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University” (350044, Krasnodar Krai, Krasnodar, Kalinina Str. 13) zhenyacool31@yandex.ru https://orcid.org/0009-0003-8607-0252
Софико Гелаевна Джалагония , студентка, кафедра физики, Федеральное государственное бюджетное	Sofiko G. Jalagonia , student, Department of Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “I.T. Trublin

образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (350044, Краснодарский край, г. Краснодар, улица им. Калинина, дом 13) jalagonia05@yandex.ru https://orcid.org/0009-0001-7710-5658	Kuban State Agrarian University” (350044, Krasnodar Krai, Krasnodar, Kalinina Str., 13) jalagonia05@yandex.ru https://orcid.org/0009-0001-7710-5658
Заявленный вклад авторов	Stated authors’ contribution
Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.	All authors made an equal contribution to the work/ The authors were equally involved in writing the manuscript. They bear the equal responsibility for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	The authors declare that there is no conflict of interest. The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 20.01.2026	Received: 20.01.2026
Одобрена после рецензирования: 11.04.2026	Approved after reviewing: 11.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Равилл Нуруллович Сафиуллин¹, Артём Эдуардович Пеплер², Иван Андреевич Гасс³,
Никита Андреевич Караваев^{4✉}

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

¹safravi@mail.ru

²artem_pepler@mail.ru

³vangen1504@gmail.com

^{4✉}nikita_karavaev15@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9424-0640

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения нейронных сетей для контроля и прогнозирования технического состояния транспортных средств в режиме реального времени. Традиционная планово-предупредительная система технического обслуживания не учитывает индивидуальные особенности износа агрегатов и не использует данные в реальном времени, что снижает её эффективность. Рассмотрено определение и составные элементы архитектуры нейронных сетей. Установлена возможность применения нейронных сетей при анализе множества данных с различных датчиков транспортных средств, с учетом которых была разработана архитектура нейронной сети для обработки больших данных. В ходе исследования были проанализированы три архитектуры нейронных сетей – линейная, рекуррентная и свёрточная – при одинаковых гиперпараметрах: 8 слоёв, 256 нейронов в скрытых слоях, 1 выходной нейрон и 100 эпох обучения. Определено среднеквадратическое отклонение от истинного значения обучающей выборки и время обработки одного паттерна сигнала датчиков транспортных средств. Установлено, что свёрточная нейронная сеть демонстрирует наименьшую ошибку (0,0764) и успешно выявляет дефекты резистивного слоя датчиков, распознавая отклонения в виде дребезга контактов или скачков напряжения. Разработана структурная модель системы контроля и прогнозирования технического состояния транспортного средства в режиме реального времени с использованием искусственного интеллекта, включающая бортовые нейронные сети, базу данных для накопления и анализа исторической информации, а также канал связи с диспетчерской службой. Предложенная модель обеспечивает замкнутый цикл диагностирования, прогнозирования и принятия управляющих решений, что повышает надёжность и экономическую эффективность эксплуатации автотранспорта.

Ключевые слова: модель, контроль технического состояния, прогнозирование, нейронная сеть, обучающая выборка, диагностирование, искусственный интеллект.

Для цитирования: Сафиуллин Р.Н., Пеплер А.Э., Гасс И.А., Караваев Н.А. Структурная модель системы контроля и прогнозирования технического состояния транспортных средств в режиме реального времени // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2 (127). С. 102-116 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-102-115>

STRUCTURAL MODEL OF A SYSTEM FOR MONITORING AND PREDICTION OF VEHICLE OPERATING STATUS IN REAL TIME

Ravil N. Safiullin¹, Artyom E. Pepler², Ivan A. Gass³, Nikita A. Karavaev⁴✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹safravi@mail.ru

²artem_pepler@mail.ru

³vangen1504@gmail.com

⁴✉nikita_karavaev15@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9424-0640

Abstract. The article discusses the use of neural networks for real-time monitoring and prediction of the vehicle operational status. The traditional scheduled preventive maintenance system ignores the individual characteristics of component wear. It also does not use real-time data thereby reducing its effectiveness. The study reviewed the definition and core architectural components of neural networks. The analysis confirmed that neural networks could effectively process large volumes of data from various sensors installed on vehicles. Based on this analysis, a neural architecture for big data processing was designed. The study compared three neural network architectures — linear, recurrent, and convolutional. They had the same hyperparameters: 8 layers, 256 neurons in hidden layers, 1 output neuron, and 100 training epochs. The study determined the standard deviation from the true value of the training sample and the processing time of one signal pattern of vehicle sensors. The convolutional neural network demonstrated the smallest error (0.0764). It successfully detected defects in the resistive layer of sensors and recognized deviations in the form of contact rattling or voltage surges. A structural model of a system for artificial intelligence-based monitoring and prediction of the vehicle health in real time was developed. The model included on-board neural networks, a database for storing and analyzing historical data, and a communication channel with the dispatch service. The proposed model provides a continuous cycle of diagnosis, prediction and control decision-making. This improves reliability and economic efficiency of vehicle operation.

Keywords: model, technical condition monitoring, forecasting, neural network, training sample, diagnostics, artificial intelligence

For citation: Safiullin R.N., Pepler A.E., Gass I.A., Karavaev N.A. Structural model of a system for monitoring and prediction of vehicle operational status in real time. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 102-116 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-102-115>

Введение. В результате исследования систем контроля технического состояния транспортных средств установлено, что существует объективная научно-техническая проблема создания систем контроля, обеспечивающих не только высокий уровень достоверности получаемых данных, но и возможность прогнозирования технического состояния узлов и агрегатов транспортных средств (ТС) в реальном времени. Что, в свою очередь, является одним из условий эффективной работы автотранспортного предприятия (АТП) в целом. Планово-предупредительная система (ППС) не учитывает индивидуальные

особенности износа и не использует данные в реальном времени, что снижает её эффективность. Системы контроля и прогнозирования должны работать в режиме реального времени, что требует высокой производительности и точности обработки данных. Применение нейронных сетей позволяет решить поставленные задачи. В процессе разработки путей их решения участвует компания Caterpillar, использующая систему SAT Connect, которая собирает данные с оборудования и анализирует их для прогнозирования отказов [1].

Контроль текущего состояния ТС и возможность его прогнозирования позволяет своевременно выявлять потенциальные неисправности, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать период проведения технического обслуживания и ремонта, а также максимально полно использовать ресурс узлов и агрегатов. Задачу контроля и прогнозирования технического состояния ТС можно свести к задаче наблюдения за величинами диагностических признаков и обработке их с использованием нейронных сетей.

На данный момент превалирующее значение имеет планово-предупредительная система. ППС технического обслуживания и ремонта представляет собой систематические и предварительно запланированные мероприятия по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) подвижного состава с целью обеспечения соответствия подвижного состава требованиям безопасности при движении, а также определения воздействия на окружающую среду. ТО и Р при ППС проводятся через установленные пробеги или промежутки времени работы автотранспортных средств.

ППС основывается на принципах планирования, в том числе в вопросах приобретения запасных частей и материалов, диагностики, замены и ремонта узлов и агрегатов, ведении документации и её последующего анализа. Но для планирования необходима большая выборка отказов, которая будет усреднена и не рассматривает процессы износа как индивидуальные процессы для каждого изделия [2, 3].

Поэтому планово-предупредительная система имеет низкую экономическую эффективность, т.к. проводимое техническое обслуживание и ремонт проводятся без учета реального состояния техники. Данные методы не предусматривают использования данных, получаемых в реальном времени для определения технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса, а, как сказано ранее, основывается на использовании ретроспективных усредненных данных [4, 5].

Транспортные средства генерируют огромное количество данных, которые могут быть использованы для определения технического состояния транспортных средств в реальном времени. Для этих целей применяются электронно-вычислительные машины (ЭВМ). Однако, для обработки информации наличия только ЭВМ недостаточно, поскольку необходимо программное обеспечение (ПО). К тому же процессы технического обслуживания и ремонта нередко носят нелинейный характер, что в свою очередь затрудняет их точное математическое моделирование [6, 7]. Для решения данной проблемы применяют подход линеаризации, но для систем с высокой степенью нелинейности добиться удовлетворительных результатов не удастся. В ответ на это, возможно использование большого количества линейных систем, но данный способ не является практичным при создании моделей, работающих в реальном времени с большими объемами данных [8-10]. Процесс создания моделей является сложным, и проверить объективность получаемых результатов достаточно трудно. Именно в таких случаях, когда решение аналитической

задачи в общем виде невозможно, для ее решения можно использовать нейронные сети, которые способны обеспечить достаточно высокое качество [11-13].

Цель исследования: разработка структурной модели контроля и прогнозирования технического состояния транспортных средств в режиме реального времени с использованием нейронных сетей.

Обработка данных с датчиков нейронной сетью позволяет контролировать и прогнозировать техническое состояние транспортных средств в определённый промежуток времени с учетом условий эксплуатации.

Материалы и методы. В исследовании применялся комплексный подход, сочетающий методы сравнительного анализа, математического моделирования и компьютерного эксперимента. За основу взят анализ современных научных публикаций и нормативных документов в области диагностики транспортных средств и применения искусственных нейронных сетей.

Для адекватного сравнения результатов, полученных в данной работе, необходимо, чтобы архитектуры трех оставшихся нейронных сетей были похожи. Поэтому учитываем, что при исследовании архитектуры гиперпараметры одинаковы: число слоев – 8, число нейронов в скрытых слоях – 256, число выходных нейронов – 1, число эпох обучения – 100. Для оценки архитектур построения применялось среднеквадратичное отклонение от истинного значения обучающей выборки:

$$\sigma = \frac{\sum(y - \bar{y})^2}{N}, \#(1)$$

где y – выходное значение нейронной сети;

$\bar{y}$ – истинное значение из обучающей выборки;

N – число элементов, используемое для обучения [23-25].

Учитывалось время обработки одного паттерна t исходя из общего времени обработки всего пакета информации T , количества повторений e и числа паттернов в одном повторении s :

$$t = \frac{T}{e \cdot s}, \#(2)$$

где T – время обработки пакета информации, состоящего из e повторений и s паттернов;

e – количество повторений;

s – количество паттернов.

Результаты. Для проведения исследования были сняты показания резистивных датчиков, таких как датчик положения педали газа, датчик положения дроссельной заслонки. При плавном вращении штока датчика осциллограмма выдаваемых показаний датчиками должна выглядеть в виде плавно изменяющейся кривой, без частотных колебаний, провалов и скачков (дребезга контактов), которые появляются по мере износа резистивного слоя. В ходе эксперимента для обучения нейронной сети использовались как заведомо исправные датчики, так и датчики, имеющие дефекты резистивного слоя.

Для построения нейронной сети необходимо соблюсти строгие принципы организации и взаимодействия нейронов, упорядочения расположения слоёв. Другими словами, задать необходимую архитектуру нейронной сети. Основными компонентами архитектуры нейронной сети являются: принимающий исходные данные входной слой, скрытые слои, выполняющие обработку данных с помощью обучаемых весов и нелинейных функций

активации, а также выходной слой, формирующий результат работы нейронной сети в виде числового значения, класса объекта, вероятности и т.д. Каждый слой нейронной сети представляет собой совокупность нейронов, выполняющих функции передачи и преобразования сигналов.

Архитектура нейронных сетей определяет тип связей между нейронами. Нейронные сети могут быть прямолинейного распространения, свёрточными, рекуррентными. В данной статье рассматривались именно эти три архитектуры как наиболее простые и нетребовательные по аппаратным средствам, что делает их применение на автомобильном транспорте общедоступной практикой.

На рисунке 1 в виде диаграммы слева представлены результаты сравнения трех типов архитектур построения нейронных сетей по среднеквадратическому отклонению при обработке данных. Диаграмма справа отображает время обработки фиксированного объема данных для каждого типа нейронных сетей. Несмотря на значительное отличие во времени при обработке данных, все три типа архитектуры построения нейронных сетей работают в режиме реального времени, что позволяет не учитывать время обработки одного паттерна. Таким образом, из рассматриваемых архитектур построения нейронных сетей, сверточная нейронная сеть является наиболее точной и оптимальной при обработке данных с датчиков автомобиля в режиме реального времени.

Среднеквадратичное отклонение Время обработки одного паттерна сигнала, мс



Рис. 1. Анализ архитектур нейронной сети (составлено авторами)

Fig. 1. Analysis of neuralal architectures (compiled by the authors)

Как видно из рисунка 2, сверточная нейронная сеть на первом же цикле обучения нашла оптимальные параметры для выявления закономерности для исправных и неисправных датчиков. Среднеквадратичное отклонение установилось в диапазоне от 0,0764 до 0,0908. Для дальнейшего сравнения использовалась нейронная сеть с наименьшим отклонением равным 0,0764.

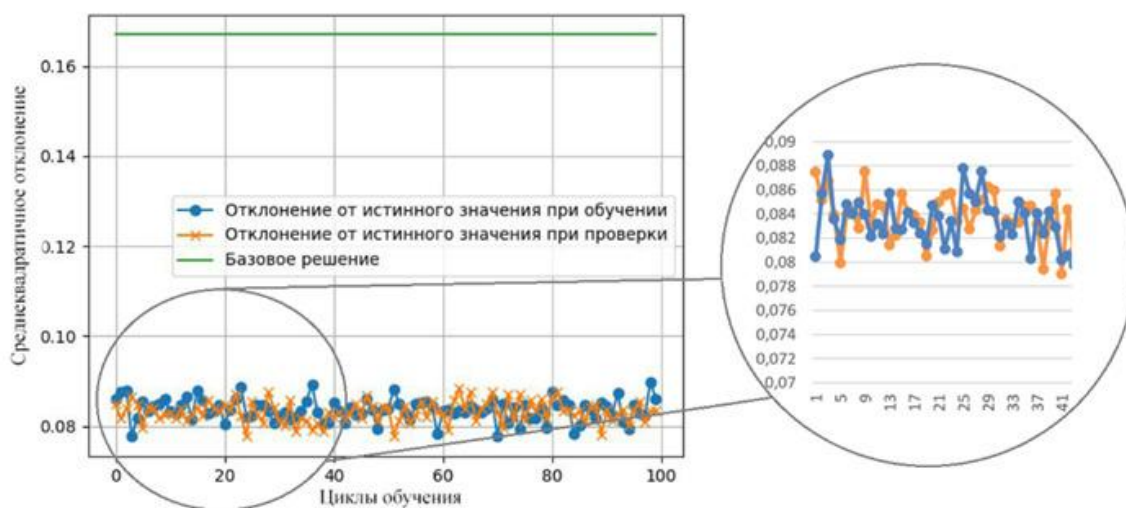


Рис. 2. Результаты исследования средней квадратичной ошибки от числа циклов для сверточной нейронной сети (составлено авторами)

Fig. 2. Study results of the average square error of the number of cycles for a convolutional neural network (compiled by the authors)

Сверточная нейронная сеть успешно находила места отказов, поскольку в основе её реализации лежат сверточные ядра, которые научились распознавать исправную последовательность значений напряжения на числовой прямой от неисправной. Чем больше у нейронной сети подобных ядер, тем больше паттернов она способна запомнить. Таким образом, даже для систем с высокой нелинейностью при достаточном количестве ядер, сверточная архитектура способна выявлять техническое состояние транспорта.

Для обучения и тестирования нейронных сетей использовались данные, полученные с резистивных датчиков транспортного средства: датчика положения педали газа и датчика положения дроссельной заслонки. Сигналы регистрировались с частотой дискретизации 1 кГц в течение 10 минут непрерывной работы двигателя в различных режимах (холостой ход, частичная и полная нагрузка). В результате было получено 600 000 отсчётов на канал.

Данные предварительно сегментировались на паттерны длительностью 100 отсчётов (0,1 с). Для выборки использовались данные с заведомо исправных датчиков, так и данные с датчиков, имеющих дефекты резистивного слоя (дребезг контактов, скачки напряжения, нелинейность характеристики). Разметка данных выполнялась на основе экспертной оценки осциллограмм и известного состояния датчиков.

Рассмотрим возможность разработки модели построения системы контроля и прогнозирования технического состояния транспортных средств в режиме реального времени с использованием нейронных сетей. На рисунке 3 представлена общая схема взаимодействия бортовой нейронной сети, установленной на АТС с подсистемами АТП, включающая в себя следующие элементы:

- АТС – транспортное средство, оборудованное бортовым компьютером, на котором реализованы нейронные сети;
- НС-1, НС-2 – нейронные сети; НС-1 отвечает за контроль технического состояния ТС, НС-2 – за прогнозирование технического состояния ТС;
- База данных (БД) – необходима для хранения исторических данных для последующего обновления и совершенствования нейронных сетей;

– Диспетчер – принимает решение о необходимости вмешательства в работу автотранспортного средства.

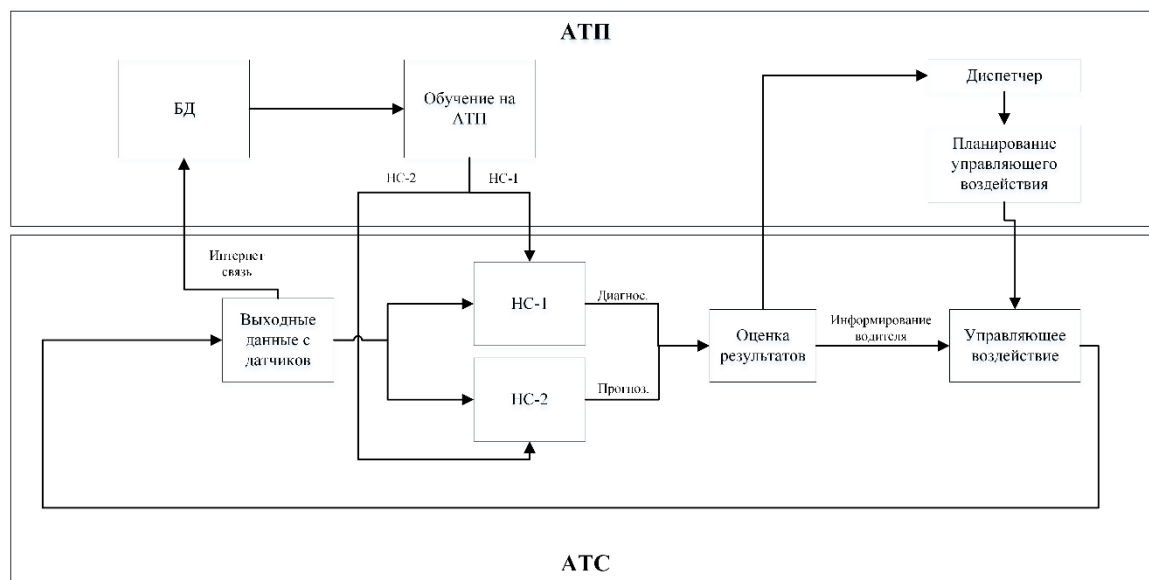


Рис. 3. Структурная модель системы контроля и прогнозирования технического состояния транспортного средства в режиме реального времени на основе использования нейронных сетей (составлено авторами)

Fig. 3. Structural model of a system for monitoring and prediction of the operational status of a vehicle in real time based on the use of neural networks (compiled by the authors)

Принцип взаимодействия следующий. АТС путем постоянного измерения диагностических параметров составляет выходную информацию. Эта информация по единому каналу связи передается в диагностическую и прогнозирующую нейронные сети. Остаточный ресурс и прогноз по состоянию передается по отдельному каналу связи как на приборную панель водителя для информирования, так и в диспетчерскую, где планируется управляющее воздействие, которое после отправляется водителю. Само управляющее воздействие направлено на АТС, а значит его диагностические параметры изменяются. Таким образом, цикл замыкается.

Кроме того, выходная информация передается на АТП, где попадает в БД, для дальнейшей обработки и обучения новых поколений нейронных сетей. Сами же нейронные сети затем устанавливаются на АТС.

Обсуждение. Нейронные сети – это инструмент аппроксимации данных в многомерном пространстве, способный находить скрытые закономерности среди входящих параметров путем самообучения. Состоит нейронная сеть из входного слоя, скрытых слоев и выходного слоя [14-15]. Широкое применение на автомобильном транспорте нашли следующие архитектуры построения нейронных сетей: линейные, рекуррентные, сверточные и трансформеры. Однако, реализация архитектуры построения типа трансформер является сложной задачей [16-18]. К тому же, для работы такой архитектуры требуются большие вычислительные мощности, которые занимают значительный объем пространства в транспорте. Из-за этого ее реализация возможна не на всех видах транспорта, и в данной работе она не рассматривается [19-21].

Нейронные сети уже применяются на автомобильном транспорте. Например, с помощью их на колесах заменили датчик давления на датчик вибрации, вывод которого

подключили сначала к конвейеру данных, а затем уже в систему оповещения автомобиля [22]. Конвейер данных представляет из себя преобразование вибрации в радар-график, т.е. из одномерного пространства в двумерное, чтобы затем загрузить в следующий этап конвейера – нейронную сеть. В данном случае рассматривали четыре варианта глубоких нейронных сетей, где лучшей оказалась ResNet-50. Она показала точность классификации по четырем типам в 93,8%.

Стоит отметить, что данная модель достаточно требовательна к аппаратной составляющей, что делает её дорогой в повсеместном применении на автомобильном транспорте.

Кроме одного датчика, используют и многоканальный вход. Например, для оценки технического ресурса подшипника через его нагрев и вибрации [23] применяли также глубокие нейронные сети, но с использованием физически информированного блока, который учитывал особенности протекания деградации подшипникового узла. В итоге модель была проще интерпретируемая, а также обобщаемая благодаря учету физики контролируемых процессов, но результат показал среднеквадратичную ошибку в 0,241. Такая точность в некоторых узлах недопустимо мала.

Кроме простого прямолинейного использования нейронных сетей, есть возможность использовать их лишь для оценки текущего состояния, а не для оценки технического ресурса. Так, в работе [24] представлена методика, в которой текущее состояние преобразуется через нейронную сеть в многомерный вектор. Сам многомерный вектор затем сравнивается с такими же по размерности векторами, которые записаны для работоспособных БПЛА. В конце сравнивается взвешенное значение векторов работоспособных средств с текущим вектором, на основе чего дается вывод о состоянии. Средняя квадратичная ошибка составила 0,0284. В этой же статье говорится о времени вычисления равном 11 секундам. Это нельзя назвать режимом реального времени, но этого времени достаточно, чтобы заметить неисправность вовремя. Стоит отметить, что данный метод подразумевает достаточно большой набор первичных векторов – работоспособного состояния.

Однако, анализ технического состояния – это не единственное, для чего можно применять нейронные сети. На автомобильном транспорте они могут использоваться как инструмент прогнозирования отказов, утомляемости водителя и т.д. [25,26-29].

Заключение. В ходе исследования были рассмотрены несколько архитектур нейронных сетей. Выбрана наиболее подходящая для обработки данных с датчиков автомобилей для выявления устойчивых комбинации признаков и отклонений с целью контроля, и прогнозирования технического состояния транспортного средства в режиме реального времени.

Экспериментальные исследования проводились при идентичных гиперпараметрах: 8 слоёв, 256 нейронов в скрытых слоях, 1 выходной нейрон, 100 эпох обучения. В качестве критериев эффективности использовались среднеквадратичное отклонение от истинных значений обучающей выборки и время обработки одного паттерна сигнала. Выявлено, что свёрточная нейронная сеть демонстрирует наименьшую ошибку (0,0764) и успешно выявляет дефекты резистивного слоя, распознавая аномалии в виде дребезга контактов или скачков напряжения. Линейная и рекуррентная архитектуры показали более высокую погрешность и меньшее быстродействие при обработке нелинейных сигналов датчиков. На основе полученных результатов предложена структурная модель системы контроля и

прогнозирования технического состояния транспортного средства в режиме реального времени с применением нейронных сетей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколова О. И., Зырянкина К. Э. Методы анализа и синтеза интеллектуальных транспортных систем, их архитектуры и алгоритмов восстановления работоспособности // Интеллектуальный транспорт. 2025. Т. 9, № 2(34). С. 30-42. EDN: EQHELRL
2. Васенин А. С., Шумков А. Г. Оценка систем организации ТО и Р автомобилей // Молодой ученый. 2016. № 15 (119). С. 160-163. EDN: WHJKEH
3. Терентьев А. В., Капустин А. А. Оценка качества автомобиля // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 449-454. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.449>
4. Сафиуллин Р. Н., Ефремова В. А., Караваев Н. А. Многокритериальный подход рационального внедрения бортовой информационно-управляющей системы в высокоавтоматизированное транспортное средство // Транспорт России: проблемы и перспективы: сб. матер. межд. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 14-15 ноября 2023 г.) СПб.: ИПТ РАН. 2023. Т.2. С. 148-152. EDN: STFGHH
5. Менухова Т. А., Солодкий А. И. Экономическая эффективность эксплуатации автомобиля // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 444-448. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.444>
6. Терентьев А. В., Прудовский Б. Д. Метод оперативного анализа технического состояния автомобиля // Записки Горного института. 2014. Т. 209. С. 197.
7. Саенко И. Б., Скорик Ф. А., Котенко И. В. Мониторинг и прогнозирование состояния компьютерных сетей на основе применения гибридных нейронных сетей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. № 59 (10). С. 795-800. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800>
8. Нгуен М. Т. Диагностика механической системы на основе технологии искусственного интеллекта // Молодой ученый. 2024. № 24 (523). С. 35-39. EDN: KWOQIU
9. Манькова Ю. В. Инновационные методы и технологии для автоматизации и оптимизации технологических процессов // Образование. Наука. Производство: сб. докл. XV Межд. молодеж. форума (Белгород, 23-24 октября 2023 г.). Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. С. 111-113.
10. Абрамкин Р. В., Педан А. В., Винограденко А. М. Методика контроля и прогнозирования технического состояния системы вторичного электропитания полевых объектов связи на основе нейросетевого подхода // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. № 13 (3). С. 4-18. <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2021-13-3-4-18> EDN AINLJV.
11. Горева Т. И., Порнягин Н. Н., Пюкке Г. А. Нейросетевые модели диагностики технических систем // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2012. № 1 (4). С. 31-43. EDN: PEUMIF
12. Хаханов В. И., Щерба О. В. Применение искусственных нейронных сетей для диагностирования цифровых сетей // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2010. № 5 (46). С. 15-20.
13. Кувайскова Ю. Е., Федорова К. А. Прогнозирование состояния технического объекта на основе нечёткого логического вывода // Радиоэлектронная техника. 2016. № 1 (9). С. 183-188. EDN: UZUHIG

14. Нгуен М. Т. Диагностика автомобильного двигателя на основе нейронной сети // Молодой ученый. 2019. № 26 (264). С. 76-81. EDN: TDDFUD
15. Bushuev S., Kotenko I., Saenko I., Skorik F. Neural network approach to forecast the state of Internet of Things elements // Proceedings of XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (Saint Petersburg, 19-21 May 2015). Saint Petersburg: IEEE. 2015:140-148. URL: <https://www.proceedings.com/content/027/027092webtoc.pdf>
16. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need // Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems – NIPS 2017 (Long Beach, USA, 4-9 December 2017). Red Hook, NY: Curran Associates Inc., 2017. P. 6000-6010. URL: <https://inspirehep.net/conferences/2702853>
17. Britz D., Goldie A., Luong M.-T., Le Q. V. Massive exploration of neural machine translation architectures (arXiv preprint) // Computer Science. Computation and Languages. Ithaca, USA; Cornell University. 2017. URL: arXiv:1703.03906
18. Викторова Е. В. Применение нечетких нейронных сетей для технической диагностики дорожных машин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2012. № 56. С. 98-102. EDN: PCRSST
19. Gehring J., Auli M., Grangier D., Yarats D., Dauphin Y. N. Convolutional sequence to sequence learning (arXiv preprint) // Computer Science. Computation and Languages. Ithaca, USA; Cornell University. 2017. URL: arXiv:1705.03122v2
20. Кацуба Ю. Н., Григорьева Л. В. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования технического состояния изделий // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 3-2 (45). С. 19-21. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.008>
21. Vasan V., Sridharan N. V., Sreelatha A. P., Vaithyanathan S. Tire condition monitoring using transfer learning-based deep neural network approach // Sensors. 2023. Vol. 23 (4), 2177. <https://doi.org/10.3390/s23042177>
22. Chen X., Ma M., Zhao Z., Zhai Z., Mao Z. Physics-informed deep neural network for bearing prognosis with multisensory signals // Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics. 2022. Vol. 1 (4). P. 200-207. <https://doi.org/10.37965/jdmd.2022.54>
23. Zhou H., Zhou J., Li Y., Cai F. Research on the condition monitoring method of unmanned aerial vehicle based on improved multivariate state estimation technique // Scientific Reports. 2025. Vol. 15, 9511. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93343-4>
24. Батыршин Е. М., Вивчарь Р. М., Пачин А. В. Концепция управления техническим состоянием оборудования на основе нейросетевых технологий искусственного интеллекта // Вооружение и экономика. 2024. № 1 (67). С. 49-55. EDN: BDANFS
25. Иванов С. Л., Иванова П. В., Кувшинкин С. Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 228-233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.228>
26. Иванова И. В. Классификация понятий конечной алгебры для описания элементов нейронной сети // Записки Горного института. 2014. Т. 208. С. 222-231. EDN: SJUDDL
27. Зубрицкас И. И. Прогнозирование параметров технического состояния тормозных систем автомобилей // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-5. С. 978-982. EDN: SWOEXX

28. Григоров С. Ю., Лебедев В. В., Казьменко А. В., Митрофанова С. В. Прогнозирование технического состояния объекта с учетом стратегии технического обслуживания при эксплуатации сложных технических систем с периодическим контролем // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2018. № 8. С. 108-118. EDN: YSARYT
29. Клячкин В. Н., Кувайскова Ю. Е., Алешина А. А., Кравцов Ю. А. Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4 (4). С. 919-923. EDN: RGZZEH

REFERENCES

1. Sokolova O.I., Zyryankina K.E. Methods of analysis and synthesis of intelligent transport systems, their architecture and algorithms for restoring functionality. *Intellektual'nyi transport = Intelligent Transport*. 2025;9(2(34)):30-42. (In Russ.) EDN: EQHELR
2. Vasenin A. S., Shumkov A. G. Evaluation of systems for organization of maintenance and repair of vehicles. *Molodoy Ucheniy = Young Scientist*. 2016;15 (119):160–163. EDN: WHJKEH (In Russ.).
3. Terentev A. V., Kapustin A. A. Quality assessment of the car. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;219: 449-454. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.449>
4. Safiullin R. N., Efremova V. A., Karavaev N. A. Multicriteria approach to the rational implementation of an onboard information and control system in a highly automated vehicle. In: *Transport of Russia: Problems and Prospects. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. (Saint Petersburg, 14-15 November 2023)*. Saint Petersburg: Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences. 2023;2:148-152. (In Russ.) EDN: STFGHH
5. Menukhova T. A., Solodkii A. I. Economic efficiency of car. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;219:444-448. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.3.444>
6. Terentiev A. V., Prudovskiy B. D. Method of operative analysis of the technical condition of the car. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 209, pp. 197. (In Russ.) EDN: SOALKL
7. Saenko I. B., Skorik F. A., Kotenko I. V. Monitoring and forecasting of computer network state based on the use of hybrid neural networks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroyeniye = Journal of Instrument Engineering*. 2016;59(10):795-800. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-10-795-800>
8. Nguyen M. T. Diagnostics of a mechanical system based on artificial intelligence technology. *Molodoy Ucheniy = Young Scientist*. 2024;24 (523): 35–39. (In Russ.) EDN: KWOQIU
9. Mankova Yu. V. Innovative methods and technologies for automation and optimization of technological processes. In: *Education. Science. Production. Proc. XV Int. Youth Forum (Belgorod, October 23-24, 2023)*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov. 2023:111-113. (In Russ.)
10. Abramkin R. V., Pedan A. V., Vinogradenko A. M. Methodology for monitoring and predicting the technical condition of the secondary power supply system of field communication objects based on a neural network campaign. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = High Technologies in Earth Space Research. H&Es Research*. 2021;13(3): 4-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.36724/2409-5419-2021-13-3-4-18>

11. Goreva T. I., Portnjagin N. N., Pjukke G. A. Neural network model for diagnostics of technical systems. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki = Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences.* 2012;1 (4): 31-43. (In Russ.) EDN: PEUMIF
12. Khakhanov V. I., Shcherba O. V. Application of artificial neural networks for diagnosis of digital networks. *Radioelektronnye i komp'yuternye sistemy = Radioelectronic and Computer Systems.* 2010; 5 (46):15-20. (In Russ.)
13. Kuvaiskova Yu. E., Fedorova K. A. Forecasting the state of a technical object based on fuzzy logical inference. *Radioelektronnaya tekhnika = Radio-Electronic Equipment.* 2016;1 (9):183-188. (In Russ.) EDN: UZUHIG
14. Nguyen M. T. Automobile engine diagnostics based on a neural network. *Molodoy Ucheniy = Young Scientist.* 2019; 26 (264):76-81. (In Russ.) EDN: TDDFUD
15. Bushuev S., Kotenko I., Saenko I., Skorik F. Neural network approach to forecast the state of Internet of Things elements. In: *Proc. XVIII Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (Saint Petersburg, 19-21 May 2015).* Saint Petersburg: IEEE. 2015:140-148. (In Eng.) URL: <https://www.proceedings.com/content/027/027092webtoc.pdf>
16. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. In: *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems – NIPS 2017 (Long Beach, USA, 4-9 December 2017).* Red Hook, NY: Curran Associates Inc., 2017: 6000-6010. (In Eng.) URL: <https://inspirehep.net/conferences/2702853>
17. Britz D., Goldie A., Luong M.-T., Le Q. V. Massive exploration of neural machine translation architectures (arXiv preprint). In: *Computer Science. Computation and Languages.* Ithaca, USA; Cornell University. 2017. (In Eng.) URL: [arXiv:1703.03906](https://arxiv.org/abs/1703.03906)
18. Viktorova O. Use of fuzzy neural networks for technical diagnostics of road machinery. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta = Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University.* 2012;56: 98-102. (In Russ.) EDN: PCRSST
19. Gehring J., Auli M., Grangier D., Yarats D., Dauphin Y. N. Convolutional sequence to sequence learning (arXiv preprint). In: *Computer Science. Computation and Languages.* Ithaca, USA; Cornell University. 2017. (In Eng.) URL: [arXiv:1705.03122v2](https://arxiv.org/abs/1705.03122v2)
20. Katsuba Yu. N., Grigorieva L. V. Application of artificial neural networks for predicting state of engineering. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal.* 2016;3-2(45):19-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.45.008>
21. Vasan V., Sridharan N. V., Sreelatha A. P., Vaithyanathan S. Tire condition monitoring using transfer learning-based deep neural network approach. *Sensors.* 2023;23(4), 2177. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/s23042177>
22. Chen X., Ma M., Zhao Z., Zhai Z., Mao Z. Physics-informed deep neural network for bearing prognosis with multisensory signals. *Journal of Dynamics, Monitoring and Diagnostics.* 2022;1(4):200-207. (In Eng.) <https://doi.org/10.37965/jdmd.2022.54>
23. Zhou H., Zhou J., Li Y., Cai F. Research on the condition monitoring method of unmanned aerial vehicle based on improved multivariate state estimation technique. *Scientific Reports.* 2025;15, 9511. (In Eng.) <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93343-4>
24. Batyrshin E. M., Vivchar R. M., Pachin A. V. The concept of equipment technical condition management based on AI neural network technology. *Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics.* 2024;1 (67):49-55. (In Russ.) EDN: BDANFS

25. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Y. Promissing model range of quarry excavator operating time assessment in real operating conditions. Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute. 2020;242:228-233. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.228>
26. Ivanova I. V. Classification of the finite algebra concepts for the description of neural network elements. Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute. 2014;208:222-231. (In Russ.) EDN: SJUDDL
27. Zubritskas I. I. Forecasting of parameters of technical condition of brake system. Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research. 2014;9:978-982. (In Russ.) EDN: SWOEXX
28. Grigorov S. Yu., Lebedev V. V., Kazmenko A. V., Mitrofanova S. V. Object technical condition forecasting taking into account the maintenance strategy in the operation of complex technical systems with periodic control. Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice. 2018;8:108-118. (In Russ.) EDN: YSARYT
29. Klyachkin V. N., Kuvayskova Yu. E., Alyoshina A. A., Kravtsov Yu. A. Information- mathematical early warning system about an emergency. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013;15(4-4):919-923. (In Russ.) EDN: RGZZEH

Об авторах	About the authors
Равилл Нуруллович Сафиуллин д-р техн. наук, профессор кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 21-я линия Васильевского острова, 2-4/45Г, Санкт-Петербург, Россия safravi@mail.ru	Ravil N. Safiullin Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University 21st line of Vasilyevsky Island, 2-4/45G, Saint Petersburg, Russia safravi@mail.ru
Артём Эдуардович Пеплер Аспирант кафедры транспортно- технологических процессов и машин, Санкт- Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 21-я линия Васильевского острова, 2-4/45Г, Санкт-Петербург, Россия artem_pepler@mail.ru	Artyom E. Pepler Postgraduate student of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University 21st line of Vasilyevsky Island, 2-4/45G, Saint Petersburg, Russia artem_pepler@mail.ru
Иван Андреевич Гасс Студент кафедры транспортно- технологических процессов и машин, Санкт- Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 21-я линия Васильевского острова, 2-4/45Г, Санкт-Петербург, Россия vangen1504@gmail.com	Ivan A. Gass Student of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University 21st line of Vasilyevsky Island, 2-4/45G, Saint Petersburg, Russia vangen1504@gmail.com
Никита Андреевич Караваев Студент кафедры транспортно-	Nikita A. Karavaev Student of the Department of Transport and

технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 21-я линия Васильевского острова, 2-4/45Г, Санкт-Петербург, Россия nikita_karavaev15@mail.ru ORCID: 0000-0002-9424-0640	Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University 21st line of Vasilyevsky Island, 2-4/45G, Saint Petersburg, Russia nikita_karavaev15@mail.ru ORCID: 0000-0002-9424-0640
Заявленный вклад авторов Все авторы внесли равный вклад в работу, в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность	Stated 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 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи к публикации.	Conflict of interest The authors declare that there is no conflict of interest. The authors have read and approved the final version of the manuscript for publication.
Статья поступила в редакцию: 26.05.2026	Received: дата: 26.05.2026
Одобрена после рецензирования: 13.04.2026	Approved after reviewing: 13.04.2026
Принята к публикации: дата: 15.04.2026	Accepted for publication: дата: 15.04.2026

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО РАЗВИТИЯ И ИНТЕГРАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Василий Николаевич Гутман¹, Илья Евгеньевич Плаксин²,
Алексей Валериевич Трифанов²✉

¹Барановичский государственный университет, Барановичи, Беларусь

²Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

¹✉gutman.v.n@gmail.com

Аннотация. Индикаторами энергетической безопасности государства являются энергетическая самостоятельность и энергоемкость ВВП. В 2020 году энергетическая самостоятельность Республики Беларусь находилась на уровне 17,1%, ввиду чего страна входила в двадцатку наиболее энергозависимых стран мира. Запуск Белорусской атомной электростанции позволил сократить импорт природного газа на 9,5 млрд. кубометров и достичь показателя энергетической самостоятельности в 22,8%. Несмотря на положительную динамику основным источником энергии является импортируемый природный газ, доля которого в общем объеме потребления превышает 65%. Для снижения доли импорта в энергообеспечении Республики Беларусь планируется строительство второй атомной электростанции, либо запуск нового энергоблока БелАЭС. Кроме того, правительством Беларуси поставлена задача обеспечить к 2030 году 10% от общего производства электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии. Достижение указанных значений возможно только при условии внедрения наиболее эффективных способов генерации энергии из возобновляемых источников для определённых регионов Республики Беларусь, учитывающих их природные, географические и метеорологические условия. Целью работы была систематизация существующих способов генерации энергии из возобновляемых источников, проведение анализа и индивидуальной оценки каждого из них, а также формулировка практических рекомендаций по их внедрению в Республике Беларусь с учетом региональных особенностей. В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что для успешного развития предприятий, генерирующих энергию из возобновляемых источников, необходима комплексная государственная поддержка. Ключевыми мерами должны стать восстановление дифференцированной системы "зеленых" тарифов до 2035 года, сокращение сроков подключения с 18 до 6 месяцев, введение 10-летних налоговых каникул по НДС. Долгосрочное развитие возобновляемых источников энергии открывает новые возможности для энергетического сектора. К 2035 году уровень энергетической самостоятельности страны может достичь 30%. Появится потенциал экспорта «зеленой» энергии объемом до 1 млрд кВт·ч в год.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, энергетическая самостоятельность, возобновляемый источник энергии, систематизация

Для цитирования: Гутман В.Н., Плаксин И.Е., Трифанов А.В. Повышение энергетической безопасности Республики Беларусь на основе комплексного развития и интеграции возобновляемых источников энергии // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 116-136 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-116-135>

Research article

Universal Decimal Code 338.28

IMPROVING THE ENERGY SECURITY OF THE REPUBLIC OF BELARUS ON THE BASIS OF COMPREHENSIVE DEVELOPMENT AND INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Vasily N. Gutman¹, Ilya E. Plaksin², Alexey V. Trifanov^{2✉}

¹Baranovich State University, Baranovich, Belarus

²Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

^{1✉}gutman.v.n@gmail.com

Abstract. The indicators of a country's energy security include energy self-sufficiency and energy intensity of gross domestic product. In 2020, the Republic of Belarus had an energy self-sufficiency rate of 17.1%, making it one of the twenty most energy-dependent countries in the world. The launch of the Belarusian Nuclear Power Plant has reduced natural gas imports by 9.5 billion cubic meters and increased energy self-sufficiency to 22.8%. Despite this positive trend, the main source of energy is an imported natural gas. It accounts for more than 65% of total consumption. To reduce the share of imports in the energy supply, Belarus plans to construct a second nuclear power plant or launch a new power unit at the operating one. In addition, the Belarusian government has set a goal of achieving 10% of total electricity production from renewable energy sources by 2030. Meeting these targets is only possible through the introduction of the most efficient methods of generating energy from renewable sources in specific regions of the Republic of Belarus considering their natural, geographical, and meteorological conditions. The purpose of this work was to classify available methods of generating energy from renewable sources, analyze and estimate each method, and make practical recommendations for their introduction in the Republic of Belarus as tailored to regional specifics. The conclusion from the research conducted is that the successful development of renewable energy generation enterprises requires comprehensive government support. The key measures should include restoring a differentiated system of green tariffs until 2035, reducing the connection time from 18 to 6 months, and introducing 10-year VAT holidays. The long-term development of renewable energy sources opens up new opportunities for the energy sector. By 2035, the country's energy self-sufficiency could reach 30%. There is potential for exporting up to 1 billion kWh of green energy per year.

Keywords: energy security, energy self-sufficiency, renewable energy sources, systematization.

For citation: Gutman V.N., Plaksin I.E., Trifanov A.V. Improving the energy security of the Republic of Belarus on the basis of comprehensive development and integration of renewable

energy sources. AgroEcoEngineering. 2026; 2(127): 116-136 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-116-135>

Введение. Энергетическая безопасность государства является одним из ключевых факторов его устойчивого развития, экономической стабильности и национального суверенитета. В условиях глобализации, геополитической нестабильности и растущих экологических рисков, обеспечение стабильного производства собственных энергоресурсов становится стратегической задачей для каждой страны.

Важнейшими индикаторами энергетической безопасности государства являются:

- энергетическая самостоятельность (отношение объема производства первичной энергии к валовому потреблению топливно-энергетических ресурсов), характеризующая способность страны обеспечивать свои энергетические потребности за счет внутренних ресурсов, сводя к минимуму зависимость от внешних поставок;
- энергоемкость ВВП, отражающая количество энергии, необходимое для производства единицы валового внутреннего продукта.

В 2020 году энергетическая самостоятельность Республики Беларусь находилась на уровне 17,1%, ввиду чего страна входила в двадцатку наиболее энергозависимых стран мира^{22,23} [1].

Фактический показатель энергоемкости ВВП Беларуси в 2020 году составил 0,141 т нефтяного эквивалента на \$1 тыс. ВВП, что обосновывало необходимость разработки программ по повышению энергетической безопасности Республики [2].

Главная роль в реализации данных программ принадлежит вводу в эксплуатацию с ноября 2020 года Белорусской атомной электростанции (БелАЭС), которая к первому октября 2024 года выработала более 35 млрд. кВт.ч. электроэнергии, что позволило сократить импорт природного газа на 9,5 млрд. кубометров и достичь показателя энергетической самостоятельности в 22,8%

Также в период с 2020 по 2024 год снижение энергоемкости ВВП составило 2,6%, что говорит о слаженной работе всех отраслей экономики в этом направлении и экономическом развитии при умеренном потреблении энергоресурсов.

Но несмотря на наращивание энергетической самостоятельности основным источником энергии является импортируемый природный газ, доля которого в общем объеме потребления превышает 65%.

Для снижения доли импорта в энергообеспечении Республики Беларусь планируется строительство второй атомной электростанции либо запуск нового энергоблока БелАЭС. Кроме того правительством Беларуси поставлена задача обеспечить к 2030 году 10% от общего производства электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что в свою очередь приведет к сокращению выбросов парниковых газов на 25-30 % по сравнению с аналогичным показателем 1990 года²⁴.

²²Валовое потребление топливно-энергетических ресурсов в 2020 году [Электронный ресурс] https://www.belstat.gov.by/upload-belsta/upload-belstat-pdf/official_statistika/2020/TEB_2020.pdf (дата обращения: 19.01.2026)

²³Энергетический баланс Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Минск. 2021. 220 с. [Электронный ресурс] <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/f95/f9542712a4280bd9fdf28f825e97bf03.pdf> (дата обращения 06.02.2026)

²⁴Анализ размера и доли рынка возобновляемой энергии в Беларуси – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс] <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/belarus-renewable-energy-market> (дата обращения: 19.01.2026).

По состоянию на первое января 2025 года в Республике Беларусь действовало 645,4 МВт установленной электрической мощности установок ВИЭ^{25,26,27}, из которых

- на солнечную энергию приходится 42,3% или 273,4 МВт, получаемую с 86 фотоэлектрических станций (ФЭС), крупнейшими из которых являются Чериковская ФЭС ООО «Солар Лэнд» – 109 МВт, Речицкая ФЭС ПО «Белоруснефть» – 56 МВт;
- на энергию ветра – 18,9% или 122 МВт, получаемую со 108 ветроэнергетических установок (ВЭУ), крупнейшими из которых являются РУП «Гродноэнерго» – 9 МВт (6 ВЭУ в Новогрудском районе); ЧПУП «Базальтум» – 9 МВт (9 ВЭУ, д. Пудовня, Дрибинский р-н, Могилевская область).
- на биоэнергию – 17,6% или 113,7 МВт, получаемую с 12 мини-ТЭЦ на древесном топливе;
- на энергию воды – 14,9% или 96,17 МВт, получаемую с 52 гидроэлектростанций (ГЭС) крупнейшими из которых являются Полоцкая (21,6 МВт) и Витебская (40 МВт) ГЭС введены в эксплуатацию в 2017 году;
- на энергию анаэробного сбраживания – 6,2% или 40,2 МВт, получаемую с 31 биогазового комплекса, крупнейшим из которых является СПК «Рассвет им. Орловского» – 4,8 МВт.

Установленная электрическая мощность установок ВИЭ позволяет покрыть не более 7% валового потребления энергии, но к 2030 году данный показатель должен достичь 10% от валового потребления энергии, которое по прогнозам дойдет до 47 млрд кВт·ч, и составить порядка 1,7 ГВт, то есть в 2,6 раза больше имеющейся на сегодняшний день мощности.

Достижение указанных значений возможно только при условии внедрения наиболее эффективных способов генерации энергии из возобновляемых источников для определённых регионов Республики Беларусь, учитывающих их природные, географические и метеорологические условия.

Цель работы – систематизировать существующие способы генерации энергии из возобновляемых источников, провести анализ и индивидуальную оценку каждого из них с формулировкой практических рекомендаций по их внедрению в Республике Беларусь с учетом региональных особенностей.

Материалы и методы. Для проведения анализа и индивидуальной оценки способов генерации энергии из возобновляемых источников с последующей формулировкой практических рекомендаций по их внедрению в Республике Беларусь с учетом региональных особенностей был применен метод поисковых исследований. Метод предусматривал системный анализ существующих технологий генерации, оценку их технико-экономических показателей (экономичность, экологичность, масштабируемость) и потенциала применения в природно-климатических условиях конкретных регионов страны, на основе чего были сформулированы комплексные практические рекомендации. Разработана матрица SWOT анализа для оценки сильных и слабых внутренних и внешних факторов.

²⁵Оценка готовности к возобновляемой энергии. Республика Беларусь. [Электронный ресурс] <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/RRA-Belarus-RU> (дата обращения 06.02.2026)

²⁶Крепкий: строительство энергоисточников на местных ТЭР помогает регионам устойчиво развиваться. <https://belta.by/economics/view/kretskij-stroitelstvo-energoistochnikov-na-mestnyh-ter-pomogaet-regionam-ustojchivo-razvivatsja-562228-2023> (дата обращения 06.02.2026).

²⁷Люди. Планета. Процветание. [Электронный ресурс] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_People_Planet_Prospersity_2019_RU.pdf (дата обращения 06.02.2026)

Результаты. Солнечная энергетика – это направление возобновляемой энергетики, в основе которого находится преобразование солнечного излучения в тепловую, механическую и электрическую энергию [3].

Согласно оценкам ученых, возобновляемые источники энергии обладают наибольшим и доступным потенциалом для человечества с прогнозом покрытия мирового энергетического рынка более чем на 57% к 2050 году [4].

Учитывая географическое положение – Республика Беларусь находится на одной широте с Германией, Японией и Канадой, странами, активно использующими солнечную энергию, а также характер климатических условий, а именно среднесуточный уровень солнечной инсоляции, и метеорологические данные по количеству облачных, частично облачных и солнечных дней составляющих 150, 185 и 30 дней соответственно, можно заключить, что страна обладает значительным потенциалом для развития солнечной энергетики [9,10].

Приоритетными направлениями для Республики Беларусь являются следующие способы использования солнечной энергии:

- фотоэлектрика (PV системы) – технология, прямого преобразования солнечного излучения в электрический ток с помощью фотоэлектрических элементов (солнечных панелей);
- солнечные тепловые системы (гелиостанции) – технология преобразования солнечного излучения в тепловую энергию для нагрева воды или других жидкостей без промежуточного преобразования в электричество.

Фотоэлектрические системы (PV) обладают рядом преимуществ: они экологичны (нулевые выбросы CO₂ при эксплуатации), используют неисчерпаемый солнечный ресурс с интенсивностью 100-250 Вт/м² в умеренных широтах, и отличаются модульностью – от компактных 1-5 кВт бытовых установок до промышленных солнечных ферм мощностью 100+ МВт. Современные PV-панели имеют срок службы 25-30 лет с ежегодной деградацией всего 0,5-1%, а их стоимость снизилась с 14,88 BYN/Вт в 2000 году до 0,672-1,68 BYN/Вт в 2023 году, обеспечивая окупаемость за 5-10 лет в большинстве регионов. Однако технология имеет существенные ограничения: КПД коммерческих кремниевых панелей составляет лишь 15-22%, для генерации 1 МВт требуется 1-1,5 га площади, а выработка колеблется на 50-80% в зависимости от облачности. Кроме того, системы требуют дорогостоящих аккумуляторов (\$200-500/кВт·ч) для автономной работы, а утилизация отработанных панелей (содержащих свинец и кадмий) пока решается лишь на 10-15%. Несмотря на это, при среднегодовой инсоляции 1000-1200 кВт·ч/м² (характерной для Беларуси, Германии и северных штатов США) PV-системы остаются рентабельным и перспективным решением [7-9].

Солнечные тепловые системы (солнечные водонагреватели) предлагают эффективное решение для теплоснабжения с рядом преимуществ. Они способны обеспечивать 50-80% годовой потребности в горячей воде для домохозяйства при средних капитальных затратах 3 361-10 083 BYN на систему производительностью 200-300 л/сутки. Современные вакуумные трубчатые коллекторы достигают КПД 60-80% и могут нагревать воду до 90-120°C даже при отрицательных температурах, тогда как более простые плоские коллекторы с КПД 50-70% оптимальны для сезонного использования при температурах до 80°C. Срок службы таких систем составляет 15-25 лет при минимальном обслуживании, а экономия на энергоносителях достигает 60-80% по сравнению с электрическими бойлерами. Однако технологии присущи и ограничения: производительность снижается на 30-50% в зимний

период, требуя резервного источника нагрева, а оптимальная работа возможна только при прямой солнечной радиации интенсивностью не менее 500 Вт/м². Для семьи из 4 человек обычно требуется коллектор площадью 4-6 м² и бак-накопитель 300-400 л, что занимает значительное пространство на крыше. Несмотря на это, в регионах с годовой инсоляцией 1000-1400 кВт·ч/м² (включая Беларусь, центральную Россию и северную Европу) солнечные водонагреватели демонстрируют отличную окупаемость за 3-7 лет, особенно при использовании в комбинации с существующими системами отопления [10-12].

С точки зрения географического расположения солнечную энергетику в Республике Беларусь наиболее целесообразно развивать в Гомельской области благодаря сочетанию ряда факторов:

- высокий уровень инсоляции (1100 - 1200 кВт·ч/м² в год), что на 10-15% превышает показатели северных регионов;
- наличие необходимых земельных ресурсов, а именно земель Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (2162 км²), которые, будучи выведенными из хозяйственного оборота после аварии на ЧАЭС, идеально подходят для размещения солнечных электростанций. Уровень радиации на этих территориях (в среднем 0,1-0,3 мкЗв/ч) позволяет безопасно эксплуатировать СЭС с применением вахтового метода;
- наличие в регионе мощной подстанции («Гомельская-330»), что обеспечивает снижение затрат на интеграцию в энергосистему;
- наличие льготных «зелёных» тарифов (до 0,17 BYN за кВт·ч).

Успешным примером уже служит станция «Солар II» в Брагинском районе мощностью 18,48 МВт, которая ежегодно вырабатывает около 20 ГВт·ч электроэнергии, экономя до 7 тыс. м³ газа в час. При средней стоимости строительства 1 МВт солнечной мощности в 2,69-4,03 млн BYN, энергетический потенциал только заброшенных земель Гомельской области оценивается в 2-3 ГВт установленной мощности [5].

Ветроэнергетика – отрасль энергетики, специализирующаяся на преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере в электрическую, механическую, тепловую или в любую другую форму энергии, удобную для использования в народном хозяйстве [13].

Развитие ветроэнергетики осуществляется параллельно солнечной энергетике ввиду взаимокompенсации циклов генерации. В странах с высокой ветровой нагрузкой она способна обеспечить 30-40 % потребности в электроэнергии.

Приоритетными направлениями для Республики Беларусь являются следующие способы использования ветроэнергетики:

- промышленные ветроэлектростанции – технология преобразования кинетической энергии ветра в электрическую энергию с использованием ветрогенераторов мощностью 1-3 МВт, устанавливаемых в зонах с подтвержденной скоростью ветра от 5,5 м/с на высоте 100 м;
- водородные энергетические комплексы – технология производства экологически чистого водорода методом электролиза воды с использованием избыточной электроэнергии от ветрогенераторов в периоды низкого энергопотребления;
- гибридные ветро-солнечные энергосистемы – технология интегрированного использования ветрогенераторов и фотоэлектрических установок с едиными системами

накопления и распределения энергии, обеспечивающая стабильное энергоснабжение за счет взаимной компенсации циклов генерации.

Эти направления выбраны с учётом умеренного ветропотенциала Республики Беларусь и направлены на максимально эффективное, разнообразное и устойчивое использование ветровой энергии для нужд электро-, тепло- и водородоснабжения в различных секторах экономики.

Промышленные ветроэлектростанции обладают значительными преимуществами: они экологичны (нулевые выбросы при эксплуатации), используют возобновляемый ветровой ресурс с интенсивностью 5,5-6,5 м/с на высоте 100 м в перспективных районах Беларуси, имеют длительный срок службы в 20-25 лет. Стоимость ветроэнергии снизилась до 1,12-1,68 BYN за кВт·ч, обеспечивая окупаемость за 7-10 лет при благоприятных условиях. Однако технология имеет ограничения: для эффективной работы требуются скорости ветра не менее 5,5 м/с, что ограничивает зоны размещения 10-15% территории страны. Выработка энергии колеблется на 60-90% в зависимости от сезона, а для интеграции в энергосистему требуются дополнительные резервные мощности. Кроме того, ветрогенераторы создают шумовое воздействие (45-50 дБ). Несмотря на это, при правильном размещении в ветроперспективных районах (Новогрудская, Минская, Ошмянская возвышенности) промышленные ВЭУ остаются перспективным направлением для Беларуси [14-16].

Водородные энергетические комплексы обладают стратегическими преимуществами: позволяют аккумулировать избыточную ветровую энергию в форме «зеленого» водорода с КПД 60-70%, обеспечивают долгосрочное хранение энергии и могут использоваться для декарбонизации транспорта и промышленности. Водородные энергетические комплексы обладают стратегическими преимуществами, однако технология требует значительных капиталовложений (5 041-7 057 BYN за 1 кВт мощности электролизера), имеет низкую общую энергоэффективность (35-45% с учетом обратного преобразования) и нуждается в развитой инфраструктуре хранения и транспортировки. В условиях Беларуси такие проекты могут быть рентабельны только при масштабе не менее 5-10 МВт и наличии гарантированного спроса на водород [17-19].

Гибридные ветро-солнечные системы демонстрируют ключевые преимущества: компенсацию сезонных и суточных колебаний генерации (ветер сильнее зимой и ночью, солнце – летом и днем), увеличение коэффициента использования оборудования на 20-30%, и снижение потребности в аккумуляторах на 35-50%. Современные гибридные решения позволяют достичь 85-90% автономности энергоснабжения. Однако такие системы требуют сложного управления, увеличивают капитальные затраты на 15-20% и нуждаются в тщательном подборе компонентов. Для Беларуси оптимальны гибридные комплексы мощностью 100-500 кВт с долей ветрогенерации 30-40%, что подтверждается успешным опытом пилотных проектов²⁸ [20,21].

Что касается географического расположения, ветроэнергетику в Республике Беларусь наиболее целесообразно развивать на возвышенных территориях (Новогрудская, Минская и Ошмянская гряды) благодаря сочетанию ряда факторов:

- благоприятные ветровые условия (среднегодовая скорость ветра 5,8-6,2 м/с на высоте 100 м), что на 15-20% превышает показатели равнинных регионов;

²⁸ Гибридные ветро-солнечные системы: сочетание ветровой и солнечной энергии [Электронный ресурс] <https://energystock.ru/gibridnye-vetro-solnechnye-sistemy-sochetanie-vetrovoj-i-solnechnoj-energii/> (дата обращения: 19.01.2026).

- наличие перспективных площадок на возвышенностях с минимальным лесным покровом и отсутствием населенных пунктов, что снижает турбулентность воздушных потоков и упрощает размещение ветропарков;
- развитая инфраструктура вблизи возвышенностей, включая мощные подстанции («Новогрудская-110», «Молодечненская-330») и транспортные сети, обеспечивающие снижение затрат на интеграцию в энергосистему;
- действующие «зелёные» тарифы (до 0,15 BYN за кВт·ч) для ветроэнергетических проектов.

Успешным примером уже служит Новогрудская ВЭС (9 МВт), расположенная на высоте 280 м над уровнем моря, которая ежегодно вырабатывает около 18-20 ГВт·ч электроэнергии, экономя до 5,5 тыс. тонн условного топлива в год. При средней стоимости строительства 1 МВт ветроэнергетической мощности в 4,03-5,04 млн BYN, потенциальный энергетический потенциал только Новогрудской возвышенности оценивается в 50-70 МВт установленной мощности, что могло бы покрыть до 1,5% потребностей страны в электроэнергии [22, 23].

Перспективы развития включают создание ветроэнергетических кластеров на возвышенностях с поэтапным вводом мощностей и разработку специализированных ветроустановок, адаптированных к умеренным скоростям ветра, характерным для белорусских условий.

Биоэнергия – это технология комбинированного производства тепловой и электрической энергии (когенерация) на локальных теплоэлектроцентралях малой мощности (обычно 0,1-10 МВт), использующих в качестве топлива биомассу (древесные отходы, щепу, пеллеты, агроотходы).

Учитывая природно-ресурсный потенциал Республики Беларусь – страна обладает значительными запасами биомассы (ежегодный объем древесных отходов составляет около 5 млн тонн, а сельскохозяйственных отходов – до 3 млн тонн), а также развитой агропромышленной и лесоперерабатывающей отраслями, можно заключить, что Беларусь обладает существенным потенциалом для развития биоэнергетики на базе мини-ТЭЦ [24, 25].

Приоритетными направлениями для Республики Беларусь являются следующие способы использования биоэнергии от мини-ТЭЦ:

- мини-ТЭЦ на древесной биомассе – технология комбинированного производства тепловой и электрической энергии путем сжигания древесных отходов (щепа, опилки, кора) с КПД до 85%;
- мини-ТЭЦ на сельскохозяйственных отходах – технология утилизации агроотходов (солома, лузга, отходы растениеводства) для генерации энергии.

Мини-ТЭЦ на древесной биомассе обладают рядом преимуществ: они обеспечивают высокий КПД (80-85%) за счет когенерации тепла и электроэнергии, используют местное возобновляемое сырье (ежегодный потенциал древесных отходов в Беларуси составляет ~5 млн тонн), и снижают выбросы CO₂ на 75-90% по сравнению с ископаемым топливом. Стоимость энергии составляет 1,68-2,35 BYN/кВт·ч, а срок окупаемости проектов — 5-8 лет при мощности 1-5 МВт. Однако технология имеет ограничения: требуются значительные капитальные вложения (4033-7057 BYN/МВт), стабильные поставки сырья (влажность биомассы должна быть <30%), и очистка выбросов (NO_x до 200 мг/м³, СО до 500 мг/м³). В

Беларуси такие системы наиболее рентабельны для лесхозов и деревообрабатывающих предприятий, где есть прямой доступ к отходам [26,27].

Мини-ТЭЦ на сельскохозяйственных отходах предлагают значительные преимущества: они обеспечивают утилизацию до 3 млн тонн агроотходов Беларуси, производя энергию с КПД 75-80% и себестоимостью 2,02-3,03 BYN/кВт·ч. Технология особенно эффективна для крупных агрокомплексов, сокращая их энергозависимость на 60-70% и обеспечивая окупаемость за 6-9 лет при мощности 0,5-3 МВт. Однако существуют и ограничения: сезонность поставок сырья (пик – после уборки урожая), необходимость предварительной подготовки топлива (измельчение, сушка до влажности <25%), а также относительно высокие капитальные затраты (5,04-7,78 тыс. BYN/МВт). Дополнительные сложности связаны с повышенным содержанием золы (до 15-20% для соломы) и необходимостью очистки выбросов (особенно KCl и SO₂). Наиболее перспективны такие системы для предприятий зернового и масложирового комплексов, где образуются стабильные объемы лузги, соломы и других отходов²⁹ [28].

Беларусь успешно эксплуатирует мини-ТЭЦ на биомассе, включая установку «Гродноэнерго» (2 МВт), обеспечивающую теплом 500 домохозяйств, и биогазовый комплекс СПК «Рассвет» (1,5 МВт). Эти объекты демонстрируют эффективную утилизацию отходов (20 тыс. т щепы/год и 50 т навоза/сутки соответственно) при КПД 75-85%. Проекты подтверждают экономическую целесообразность технологии для агропромышленных и деревообрабатывающих предприятий.

Перспективы включают: внедрение газификации (КПД до 90%), создание энергокластеров и комплексную переработку отходов. К 2030 году мощность мини-ТЭЦ может достичь 300-350 МВт (5% энергобаланса). Для реализации требуется совершенствование нормативной базы и логистики биомассы.

Гидроэнергия – это технология преобразования кинетической энергии водных потоков в электрическую энергию с помощью гидроэлектростанций (ГЭС). Учитывая гидрографический потенциал Республики Беларусь – страна обладает более чем 20,8 тыс. рек общей протяженностью около 90 тыс. км, можно заключить, что Беларусь обладает определенным потенциалом для развития малой гидроэнергетики

Технически возможный объем выработки гидроэлектроэнергии в Республике Беларусь оценивается в 850 млн кВт·ч в год, однако на сегодня освоено лишь около 15% этого потенциала. Основная часть гидроэнергетических мощностей сосредоточена на трех крупнейших ГЭС: Витебской (40 МВт, годовая выработка 138 млн кВт·ч), Полоцкой (22,4 МВт, 98 млн кВт·ч) и Гродненской (17 МВт, 75 млн кВт·ч). Эти объекты демонстрируют высокую эффективность использования водных ресурсов страны [29,30].

Малые ГЭС мощностью от 0,1 до 10 МВт показывают особую перспективность для белорусских условий. Их технико-экономические показатели включают КПД 78-85%, себестоимость электроэнергии 0,080-0,121 BYN/кВт·ч и срок окупаемости 7-10 лет при капитальных затратах 5,175-6,900 млн BYN/МВт. Микро-ГЭС мощностью до 100 кВт характеризуются удельной стоимостью 9,963-12,075 тыс. BYN/кВт и годовой выработкой

²⁹ Три плюса ТЭЦ на отходах переработки агросырья: экономичное энергоснабжение, снижение платежей НВОС, сокращение выбросов CO₂ [Электронный ресурс] <https://www.agroinvestor.ru/business-pages/37007-3-plyusa-tets-na-otkhodakh-pererabotki-agrosyrya-ekonomichnoe-energосnabzhenie-snizhenie-platezhey-n/?ysclid=megvrm4gcg768324295> (дата обращения 19.01.2026)

150-300 тыс. кВт·ч на объект, что делает их идеальными для автономного энергоснабжения сельских районов без необходимости постоянного обслуживающего персонала.

Перспективы развития гидроэнергетики Беларуси до 2030 года включают комплексную модернизацию существующих мощностей (+15-20% производительности), строительство 12-15 новых малых ГЭС на основных реках и ввод 50-60 микро-ГЭС. Реализация этих планов потребует инвестиций порядка 941-1075 млн. BYN и позволит увеличить общую мощность до 120-150 МВт (3-4% энергобаланса). Особое внимание будет уделено разработке современных рыбозащитных систем и внедрению цифровых технологий управления. Наиболее перспективными районами развития остаются Витебская, Гродненская и Минская области, где сосредоточено 65% гидропотенциала страны.

Энергетика на основе анаэробного сбраживания – это технология преобразования органических отходов (навоз, помёт, растительные остатки, пищевые отходы) в биогаз (смесь метана 50-75% и CO₂) и биоудобрения через процесс микробиологического разложения в бескислородных условиях.

Республика Беларусь обладает значительным потенциалом для развития биоэнергетики на основе анаэробного сбраживания. Ежегодно сельское хозяйство страны производит около 30 млн кубометров отходов, биогазовый потенциал которых оценивается в 4 млрд кубометров газа, что эквивалентно 800 МВт электрической мощности. По данным на 2021 год, в стране уже функционируют 38 биогазовых установок общей мощностью 48 МВт, наибольшая концентрация которых наблюдается в Минской (17 установок, 23,14 МВт) и Брестской (9 установок, 10,75 МВт) областях [31,32].

Биогазовые технологии демонстрируют высокую эффективность в белорусских условиях, предлагая тройную выгоду: использование постоянно возобновляемой сырьевой базы, экологичную утилизацию отходов и существенную экономию энергоресурсов. Расчеты показывают, что полное использование энергетического потенциала сельскохозяйственных отходов могло бы обеспечить экономию 3,87 млн тонн условного топлива в год. Особые перспективы имеет Гомельская область, где благоприятные климатические условия (вегетационный период 191-209 дней, осадки 550-650 мм/год) и наличие 300 тыс. га свободных земель создают идеальные условия для выращивания энергетических культур [33,34].

Однако отрасль сталкивается с рядом проблем, включая относительно высокую себестоимость производимой энергии (по сравнению с традиционными источниками) и недостаток технологий, адаптированных к местным видам сырья. Ярким примером стала недозагрузка мощнейшего в стране биогазового комплекса в СПК «Рассвет», работающего на половину своей мощности из-за нехватки сырья. Для решения этих проблем требуется тщательный расчет сырьевой базы при проектировании новых комплексов и разработка специализированных технологических решений.

Перспективы развития биогазовой энергетики в Беларуси на ближайшие годы включают оптимизацию работы существующих установок и разработку новых технологических решений.

Сравнительную оценку приоритетных направлений использования возобновляемых источников энергии приведём в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная оценка приоритетных направлений использования возобновляемых источников энергии

Table 1. Comparative assessment of priority areas for using renewable energy sources

Направление возобновляемой энергетики	Стоимость внедрения	Потенциал внедрения	КПД, %	Потребность размещения, га
Солнечная – фотоэлектрические системы	2,69-4,03, млн. BYN/МВт	до 8% потребностей страны в электроэнергии	15-22	1 - 1,5 га на 1 МВт
Солнечная – тепловые системы	3361-10083 BYN на систему производительностью 200-300 л/сутки	50-80% годовой потребности в горячей воде для домохозяйств	50-80	Отсутствует, размещение на крышах зданий
Ветроэнергетика	4,03-5,04, млн. BYN/МВт	до 1,5% потребностей страны в электроэнергии	60-90	1 - 2 га на 1 МВт, могут быть размещены на 10-15% территории страны
Водородные энергетические комплексы	5,04-7,05, млн. BYN/МВт	нет данных	60-70	
Биоэнергетика на древесных отходах	4033-7057, BYN/МВт	до 5% потребностей страны в электроэнергии	80-85	Отсутствует, размещение на территории предприятия
Биоэнергетика на отходах АПК	5040-7780, BYN/МВт		75-85	Отсутствует, размещение на территории предприятия
Гидроэнергетика	5,1-6,9, млн. BYN/МВт	до 4% потребностей страны в электроэнергии	78-85	Отсутствует, размещение на территории предприятия
Биогазовые станции	10,1-13,5, млн. BYN/МВт	4 млрд кубометров газа или 800 МВт электрической мощности	25-70	Отсутствует, размещение на территории предприятия

Для принятия решения для внедрения направления ВИЭ необходим анализ ресурсов, которые можно экономически и экологически обосновано использовать.

Обсуждение. Республика Беларусь обладает значительным потенциалом для развития возобновляемых источников энергии.

Разработана матрица SWOT анализа для оценки сильных и слабых внутренних и внешних факторов.

Таблица 2. Матрица SWOT анализа для оценки сильных и слабых внутренних и внешних факторов внедрения ВИЭ.

Table 2. SWOT analysis matrix for assessing the strengths and weaknesses of internal and external factors affecting the implementation of renewable energy sources

Сильные стороны	Слабые стороны
– использование развитой инфраструктуры современного инновационного агропромышленного комплекса под комплексные проекты строительства биогазовых установок; – использование господдержки и «зелёные» тарифы для развития и масштабирования биоэнергетики.	– регулирование нормативных документов для подачи электроэнергии от ВИЭ в общие энергосети; – привлечение международных кредитов для модернизации электросетей, чтобы они могли больше принимать от ВИЭ
Возможности	Угрозы
– разработать свои технологии и оборудование для ВИЭ, чтобы снизить риски логистических разрывов и санкций; – разработать программы софинансирования проектов внедрения ВИЭ.	– разработать долгосрочную и стабильную тарифную политику для компенсации высоких рисков инвестиций в ВИЭ; – развивать собственное производство оборудования для снижения зависимости от внешних поставок.

Решение сильных и слабых сторон внедрения ВИЭ осуществляется на местном и государственном уровне.

Для оптимального использования потенциала предлагается создать шесть специализированных региональных энергокластеров, которые будут сочетать различные виды ВИЭ с учетом местных особенностей. В Гомельской области планируется размещение Южного энергокластера с преобладанием солнечной генерации мощностью до 1,8 ГВт (60%), дополненной биоэнергетикой (300 МВт) и ветроэнергетикой (200 МВт). Этот проект потребует инвестиций в размере 4174-5565 млн. белорусских рублей. В Гродненской области будет создан Западный энергокластер с упором на гидроэнергетику (80 МВт, 40%) в сочетании с ветровой (120 МВт, 30%) и биоэнергетикой (150 МВт, 30%), для которого потребуется 2 087-2 783 млн белорусских рублей инвестиций.

Общий объем необходимых инвестиций в развитие ВИЭ до 2030 года оценивается в 11209-15693 млн BYN. Эти средства распределяются следующим образом: 8067-10756 млн BYN для солнечной энергетики, 1513-2017 млн BYN для ветроэнергетики, 2823-3361 млн BYN для биоэнергетики и 941-1075 млн BYN для гидроэнергетики. Проекты демонстрируют различную окупаемость: солнечные станции окупятся за 5-7 лет при тарифе 0,17 BYN/кВт·ч, ветропарки – за 7-9 лет (0,15 BYN/кВт·ч), биогазовые установки – за 6-8 лет (0,14 BYN/кВт·ч), а мини-ГЭС – за 8-12 лет (0,12 BYN/кВт·ч).

Для успешной реализации этих проектов необходима комплексная государственная поддержка. Ключевыми мерами должны стать восстановление дифференцированной системы «зеленых» тарифов до 2035 года, сокращение сроков подключения с 18 до 6 месяцев, введение 10-летних налоговых каникул по НДС и создание гарантийного фонда для инвесторов объемом 200 млн евро. Эти меры призваны значительно улучшить инвестиционный климат в секторе возобновляемой энергетики.

Реализация программы развития ВИЭ до 2035 года позволит достичь следующих результатов. По видам генерации планируется ввести: солнечные электростанции общей мощностью 3,5-4 ГВт (12-14 млрд кВт·ч/год), ветропарки на 400-500 МВт (1,2-1,5 млрд кВт·ч/год), биоэнергетические установки мощностью 600-700 МВт (4,2-4,9 млрд кВт·ч/год) и гидроэлектростанции на 180-200 МВт (0,7-0,8 млрд кВт·ч/год). Это обеспечит сокращение импорта природного газа на 1,8-2,2 млрд м³ в год с экономией 1513-1848 млн BYN ежегодно, создаст 22-25 тысяч новых рабочих мест и сформирует новую отрасль экономики с годовым оборотом 4,175-5,219 млрд BYN.

Экологические преимущества программы включают снижение выбросов CO₂ на 6-млн тонн в год, утилизацию 95% органических отходов агропромышленного комплекса и сокращение площадей свалок на 15-20%. Реализация будет проводиться поэтапно: в 2026 годах планируется разработка цифровой карты потенциала ВИЭ и создание Национального центра ВИЭ с бюджетом 50 млн. евро; в 2027-2030 годах – ввод 70% запланированных мощностей с локализацией 40% оборудования; а в 2031-2035 годах – полная реализация программы с созданием научно-технологического хаба и организацией экспорта избыточной энергии.

Выводы: 1. Беларусь обладает значительным потенциалом для развития возобновляемой энергетики. По оценкам экспертов, к 2030 году доля ВИЭ в общем энергопотреблении страны может достичь 10%. Это потребует увеличения установленной мощности объектов возобновляемой энергетики до 1,7 ГВт, что в 2,6 раза превышает текущие показатели (645,4 МВт по состоянию на 2025 год). Для реализации такого сценария потребуются инвестиции в размере 23,2-27,7 млрд белорусских рублей.

2. Развитие возобновляемой энергетики обеспечит существенную экономию валютных средств. Ежегодный эффект от сокращения импорта природного газа оценивается в 1,8-2,2 млрд рублей при уменьшении закупок на 2-2,5 млрд м³. Проекты в области ВИЭ демонстрируют хорошую окупаемость: солнечные станции – 5-7 лет при тарифе 0,17 BYN/кВт·ч, ветропарки – 7-9 лет (0,15 BYN/кВт·ч), биоэнергетические установки – 6-8 лет (0,14 BYN/кВт·ч), мини-ГЭС – 8-12 лет (0,12 BYN/кВт·ч).

3. Реализация программы развития ВИЭ окажет положительное влияние на экономику и занятость. Ожидается создание 24-26 тысяч новых рабочих мест в различных регионах страны. Формирование новой отрасли обеспечит годовой оборот в размере 4,2-5,1 млрд белорусских рублей. Особое значение имеет развитие местной промышленности через локализацию производства оборудования, уровень которой может достичь 40%.

4. Переход на возобновляемую энергетику принесет значительные экологические выгоды. Ежегодное сокращение выбросов CO₂ составит 6,5-7,5 млн тонн, что соответствует 25-30% от уровня 1990 года. Дополнительно будет обеспечена утилизация 95% органических отходов агропромышленного комплекса и сокращение площадей свалок на 15-20%.

5. Долгосрочное развитие ВИЭ открывает новые возможности для энергетического сектора. К 2035 году уровень энергетической самостоятельности страны может достичь 30%. Появится потенциал экспорта «зеленой» энергии объемом до 1 млрд кВт·ч в год. Возобновляемая энергетика превратится в полноценную отрасль национальной экономики, способствующую устойчивому развитию страны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ледницкий А. В., Протас П. А., Мисуно Ю. И. Использование возобновляемых источников энергии в целях развития зеленой экономики в Республике Беларусь //

Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС. Сб. статей VI Межд. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2023» (Минск, 06-08 декабря 2023 г.) Минск: БГТУ. 2023. Т. 3. С. 160-165. EDN: AZZGTQ

2. Рудченко Г. А., Ермалинская Н. В. Основные тенденции развития возобновляемой энергетики в Республике Беларусь в контексте глобальных трендов // Экономика и банки. 2023. №. 1. С. 46-59. EDN: XSJQGC

3. Новикова В. А., Дрюков В. В., Котов А. А. Солнечная энергетика и ее экологическая оценка // Тезисы докладов 57-й Межд. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов. Витебск: ВГТУ. 2024. С. 149-150. URL: <https://nic.vstu.by/nic/conferences/conference-materials/materialiy-konferencij/#>

4. Яппаров Р. Р. Потенциал мировой электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии и системы интеллектуальных сетей для обеспечения энергетической безопасности // Научно-исследовательские публикации. 2023. № 1. С. 37-39. EDN: OXXQVE

5. Ракуевич А. О. Солнечная энергетика в Республике Беларусь // Актуальные проблемы энергетики 2018. Матер. студенческой науч.-техн. конф. Минск: БНТУ. 2018. С. 162-164. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/50531>

6. Русан В. И., Казакевич Д. М. Солнечная энергетика: состояние и перспективы ее использования в Республике Беларусь // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК. Матер. межд. науч.-техн. конф. (Минск, 24-25 ноября 2011 г.). Минск: БГАТУ. 2011. С. 180-183

7. Усков А. Е., Дайбова Л.А., Кравченко Н.А., Самойлов А.Н. Фотоэлектрические станции: перспективы, достоинства, недостатки и особенности работы // Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. №. 124. С. 450-460. <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-025>

8. Березовская В. В., Кочисова Э. Р., Лысова Е. П. Анализ способов утилизации фотоэлектрических панелей // Актуальные проблемы науки и техники. 2024. Матер. Всеросс. (нац.) науч.-практ. конф. (Ростов-на-Дону, 19-21 марта 2024 г.) Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. С. 1031. URL: <https://ntb.donstu.ru/conference2024>

9. Чубуков Б. А. Виды фотоэлектрических систем для зданий, их достоинства и недостатки // Наука и молодежь. Матер. XIX Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Барнаул, 18–22 апреля 2022 г.). Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2022. Т. 1. Часть 2. С. 104-107. EDN: XKCWEJ

10. Гаврилова Е. С., Гаврилов М. В. Применение энергии солнечного излучения в инженерных системах здания // Дни науки студентов ИАСЭ – 2022. Матер. науч.-практ. конф. (Владимир, 21 марта – 8 апреля 2022 г.). Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. 2022. С. 214-220. EDN: AEXLLI

11. Крюкова Н. А. Альтернативные источники энергии. Солнечные коллекторы // Научные горизонты. 2021. № 1(41). С. 108-112. EDN: NZPSVV

12. Гараева В. Р. Применение солнечных коллекторов в системах отопления и горячего водоснабжения жилого дома // Актуальные вопросы фундаментальных и прикладных научных исследований. Сб. науч. статей по матер. II Межд. науч.-практ. конф. (Уфа, 19 мая 2023 г.). Уфа: Вестник науки. 2023. Т. 1. С. 7-10. EDN: CDIMYR

13. Бахур Е.П., Гомон Т. В., Грабар Р. Н. Развитие энергии ветра в Республике Беларусь // Теоретические и прикладные исследования социально-экономических систем в условиях интеграции России в мировую экономику. Матер. V межд. заочной науч.-практ. конф. (Тюмень, 1 ноября 2016 г.). Тюмень: Тюменский государственный университет. 2016. С. 592-597. EDN: GCGARS
14. Кулаго Ю. В., Журавлёв Д. Д. Альтернативные источники энергии в Беларуси. Их преимущества и недостатки // Актуальные проблемы геотехники, экологии, защиты населения в чрезвычайных ситуациях и строительной механики. Матер. 78-й студенческой науч.-техн. конф. (Минск, 20 апреля 2022 г.). Минск: БНТУ. 2022. С. 16-18. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/113766>
15. Колесень А. А., Колесень Е. А. Развитие альтернативной энергетики с использованием механизмов государственно-частного партнерства // Современные тенденции в развитии экономики энергетики. Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию БНТУ (Минск, 3 декабря 2020 г.). Минск: БНТУ. 2021. С. 158-160. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/90895/Sovremennye_tendencii.pdf?sequence=1
16. Семененя И. Н., Переверзев В. А. Экологические последствия мировой энергетики: возобновляемые источники энергии // Военная медицина. 2024. № 3(72). С. 89-106. <https://doi.org/10.51922/2074-5044.2024.3.89>
17. Колбина Т. Ю., Набиева И. К., Абдысадыкова А. Н. Водородная энергетика как новый этап мировой энергетики // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 40. С. 266-269. EDN: YFKEQF
18. Мазько Е. В., Евщик П. В. Водородное топливо в сфере логистики: преимущества, проблемы и перспективы // Экология, Человек. Бизнес. Сб. матер. II Межд. науч.-практ. конф. (Минск, 7 декабря 2022 г.). Минск: БГЭУ. 2023. С. 70-73. URL: http://edoc.bseu.by:8080/bitstream/edoc/101322/1/Mazko_70_73.pdf
19. Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества: Монография. СПб.: Наукоемкие технологии. 2021. 151 с. EDN: LIMMQQ
20. Григораш О. В., Денисенко Е. А., Грищенко Д. Н., Барышев П. М. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2023. №23(1). С. 48-55. <https://doi.org/10.14529/power230105>
21. Кузнецов П. Н., Чебоксаров В. В., Якимович Б. А. Гибридные ветро-солнечные энергетические установки // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. 2020. № 23 (1). С. 45-53. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-45-53>
22. Рудченко Г. А., Вежновец Е. М., Герасенко К. П. Оптимизация энергообеспечения субъектов хозяйствования на основе применения распределенной генерации энергии // Наука, техника и развитие инновационных технологий. Матер. науч. конф., посвященной 30-летию юбилею независимости Туркменистана (Ашхабад, 12-13 июня 2021 г.). Ашхабад. 2021. С. 108-110. <https://elib.gstu.by/handle/220612/25970>
23. Германович Г. В., Германович Т. М. Энергетическая безопасность: состояние, перспективы и методы оценки // Экономический бюллетень Научно-исследовательского экономического института Министерства экономики Республики Беларусь. 2021. № 8(290). С. 53-59. URL: <https://niei.by/uploads/files/Ekonomicheskij-bjulleten/bjulleten-8-2021.pdf>

24. Вавилов А. В. К вопросу использования древесных отходов в энергетике Беларуси //Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2022. №. 1 (252). С. 93-104. <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2022-252-1-93-104>
25. Смольская Н. А., Резанович М. А. Система управления древесными отходами в Беларуси: принципы функционирования и направления совершенствования // Вестник Белорусского государственного экономического университета. 2023. № 4. С. 84-91. URL: <http://edoc.bseu.by:8080/handle/edoc/99383>
26. Духовник А. А. Совершенствование лесозаготовительного производства рациональным освоением труднодоступного лесосечного фонда лесопользователями различных форм собственности // НИРС 2020. Сб. науч. работ студентов Республики Беларусь. Минск: Изд. центр БГУ. 2021. С. 78-82
27. Левковская А. В. Оценка местных видов топлива в Республике Беларусь // Современные тенденции в развитии экономики энергетики. Сб. матер. Межд. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию БНТУ (Минск, 3 декабря 2020 г.). Минск: БНТУ. 2021. С. 49-50. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/90895/Sovremennye_tendencii.pdf?sequence=1
28. Седнин В.А., Игнатович Р.С., Иокова И.Л. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Часть 2. Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси // Наука и техника. 2023. № 22(6). С.508-518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>
29. Голуб В. В. Электростанции: ГЭС, ГЭАС. Оборудование, технологии. Программа развития ГЭС в Беларуси // Актуальные проблемы энергетики. Матер. 77-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (апрель 2021 г.). Минск: БНТУ. 2021. Ч. 3. С. 63-66. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/266280>
30. Радюк, Е. В., Слесарев В. Д. Альтернативные источники энергии Республики Беларусь // Актуальные проблемы энергетики. Матер. 78-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (апрель 2022 г.). Минск: БНТУ. 2022. С. 12-15. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/266280>
31. Кляусова Ю. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В. Перспективы развития биогазовых технологий в Республике Беларусь // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. №. 4. С. 52-56. EDN: RKGZCW
32. Капустин Н. Ф. Биогазовые установки в Республике Беларусь // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2020. №. 54. С. 182-185. URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/676>
33. Кляусова Ю. В., Цыганова А. А., Бельская Г. В. Применение биогазовых технологий для управления органическими отходами // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №. 3. С. 85-89. EDN: НУТBLM
34. Михайлов С. В. Альтернативная энергетика: потенциал использования биогазовых комплексов в Республике Беларусь // Актуальные проблемы науки и техники. Сб. науч. статей по матер. VII Межд. науч.-практ. конф. (Уфа, 14 января 2022 г.). Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки». 2022. С. 7-16. EDN: UKLFYX

REFERENCES

1. Lednitskiy A. V., Protas P. A., Misuna Yu. I. Using renewable energy sources to develop a green economy in the Republic of Belarus. In: Technological Independence and Competitiveness of the Union State, CIS Countries, EAEU and SCO. Proc. VI Int. Sci. Tech. Conf. "Minsk

Scientific Readings – 2023” (Minsk, December 06-08, 2023). Minsk: BSTU. 2023; 3:160-165. (In Russ.) EDN: AZZGTQ

2. Rudchenko G. A., Yermalinskaya N. V. The main trends of the development of renewable energy in the Republic of Belarus in the context of global trends. *Ekonomika i banki = Economy and Banks*. 2023; 1: 46-59. (In Russ.) EDN: XSJQGC

3. Novikova V. A., Dryukov V. V., Kotov A. A. Solar energy and its environmental assessment. In: Abstracts of the 57th Int. Sci. Tech. Conf. of Lectures and Students. Vitebsk: Vitebsk State Technical University. 2024:149-150. (In Russ.) URL: <https://nic.vstu.by/nic/conferences/conference-materials/materialy-konferenczij/#>

4. Yapparov R. R. The potential of global electricity generation based on renewable energy sources and intelligent grid systems for energy security. *Nauchno-issledovatel'skie publikatsii = Journal of Scientific Research Publications*. 2023; 1: 37-39. (In Russ.) EDN: OXXQVE

5. Rakusevich A. O. Solar energy in the Republic of Belarus. In: Current Energy Problems 2018. Proc. Student Sci. Tech. Conf. Minsk: BNTU. 2018:162-164. (In Russ.) URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/50531>

6. Rusan V. I., Kazakevich D. M. Solar energy: status and prospects for its use in the Republic of Belarus. In: Energy Saving Is the Most Important Condition for Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. (Minsk, November 24-25, 2011). Minsk: BGATU. 2011:180-183. (In Russ.)

7. Uskov A. E., Daibova L.A., Kravchenko N.A., Samoilov A.N. Photovoltaic plants: prospects, advantages, disadvantages and their characteristics. *Nauchnyi zhurnal KubGAU = Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; 124: 450-460. (In Russ.) <https://doi.org/10.21515/1990-4665-124-025>

8. Berezovskaya V. V., Kochisova E. R., Lysova E. P. Analysis of ways to recycle photovoltaic panels. In: Current Problems of Science and Technology: 2024. Proc. All-Russian (Nat.) Sci. Prac. Conf. (Rostov-on-Don, March 19-21, 2024). Rostov-on-Don: DSTU. 2024: 1031. (In Russ.) URL: <https://ntb.donstu.ru/conference2024>

9. Chubukov B. A. Types of photovoltaic systems for buildings, their advantages and disadvantages // *Science and Youth: Proc. XIX All-Russian Sci. Tech. Conf. of students, postgraduates and young scientists* (Barnaul, April 18-22, 2022). Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. 2022;1(2):104-107. (In Russ.) EDN: XKCWEJ

10. Gavrilova E. S., Gavrilov M. V. Application of solar radiation energy in building engineering systems. In: IASE Students' Science Days - 2022: Proc. Sci. Prac. Conf. (Vladimir, March 21 – April 8, 2022). Vladimir: Vladimir State University named after Aleksandr and Nikolay Stoletov. 2022: 214-220. (In Russ.) EDN: AEXLLI

11. Kryukova N. A. Alternative energy sources. Solar collectors // *Nauchnye gorizonty = Science Horizons*. 2021. № 1(41). 2021. P. 108-112. (In Russ.) EDN: NZPSVV

12. Garaeva V. R. The use of solar collectors in heating and hot water supply systems of residential buildings. In: Current Issues of Fundamental and Applied Scientific Research. Proc. II Int. Sci. Prac. Conf. (Ufa, May 19, 2023). Ufa: Bulletin of Science Publ. 2023;1: 7-10. (In Russ.) EDN: CDIMYR

13. Bakhur E.P., Gomon T. V., Grabar R. N. Development of wind energy in the Republic of Belarus. In: Theoretical and Applied Research of Socio-Economic Systems in the Context of Russia's Integration into the World Economy. Proc. V Int. Virtual Sci. Prac. Conf. (Tyumen November 1, 2016). Tyumen: Tyumen State University. 2016:592-597. (In Russ.) EDN: GCGARS

14. Kulago Yu. V., Zhuravlev D. D. Alternative energy sources in Belarus. Their advantages and disadvantages. In: Current Problems of Geotechnics, Ecology, Protection of the Population in Emergencies and Construction Mechanics. Proc. 78th Student Sci. Tech. Conf. (Minsk, April 20, 2022). Minsk: BNTU, 2022:16-18. (In Russ.) URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/113766>
15. Kolesen A. A., Kolesen E. A. The development of alternative energy using public-private partnership mechanisms. In: Current Trends in the Development of the Energy Economy. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. dedicated to the 100th anniversary of BNTU (Minsk, December 3, 2020). Minsk: BNTU. 2021: 158-160. (In Russ.) URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/90895/Sovremennye_tendencii.pdf?sequence=1
16. Semeneya I. N., Pereverzev V. A. Environmental consequences of global energy: renewable energy sources. Voennaya meditsina = Military Medicine. 2024;3(72):89-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.51922/2074-5044.2024.3.89>
17. Kolbina T. Yu., Nabieva I. K., Abdysadykova A. N. Hydrogen energy as a new stage of world energy. Innovatsii. Nauka. Obrazovanie = Innovation. Science. Education. 2021;40: 266-269. (In Russ.) EDN: YFKEQF
18. Mazko E. V., Evshchik P. V. Hydrogen fuel in logistics: advantages, problems and prospects. In: Ecology. Humanity. Business. Proc. II Int. Sci. Prac. Conf. (Minsk. December 7, 2022). Minsk: BSEU. 2023:70-73. (In Russ.) URL: http://edoc.bseu.by:8080/bitstream/edoc/101322/1/Mazko_70_73.pdf
19. Beloborodov S. S., Gasho E. G., Nenashev A. V. Renewable energy sources and hydrogen in the energy system: Problems and advantages. Monograph. Saint Petersburg: High Tech Publishing House. 2021. 151 p. (In Russ.) EDN: LIMMQQ
20. Grigorash O. V., Denisenko E. A., Grishchenko D. N., Baryshev P. M. Mobile wind and solar power plants: status, prospects and design features. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. 2023;23 (1): 48-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power230105>
21. Kuznetsov P. N., Cheboxarov V. V., Yakimovich B. A. Hybrid wind-solar power plants. Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova = Bulletin of IzhSTU named after M. T. Kalashnikov. 2020;23 (1): 45-53. (In Russ.) <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2020-1-45-53>
22. Rudchenko G. A., Vezhnovets E. M., Gerasenko K. P. Optimization of energy supply of businesses on the basis of application of distributed energy generation. In: Science, Technology and Development of Innovative Technologies. Proc. Sci. Conf. dedicated to the 30th anniversary of independence of Turkmenistan (Ashgabat, June 12-13, 2021). Ashgabat. 2021:108-110. (In Russ.) <https://elib.gstu.by/handle/220612/25970>
23. Germanovich G. V., Germanovich T. M. Energy security: status, prospects and assessment methods. Ekonomicheskii byulleten' Nauchno-issledovatel'skogo ekonomicheskogo instituta Ministerstva ekonomiki Respubliki Belarus. = Economic Bulletin of the Scientific Research Economic Institute of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus. 2021;8(290):53-59. (In Russ.) URL: <https://niei.by/uploads/files/Ekonomicheskij-byulleten/bjulleten-8-2021.pdf>
24. Vavilov A. V. On the use of wood waste in the energy sector of Belarus. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management, Processing of Renewable Resources. 2022; 1 (252): 93-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2022-252-1-93-104>

25. Smolskaya N. A., Rezanovich M. A. Wood waste management system in Belarus: Principles of functioning and directions of improvement. Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta = Bulletin of the Belarusian State Economic University. 2023; 4: 84-91. (In Russ.) URL: <http://edoc.bseu.by:8080/handle/edoc/99383>

26. Dukhovnik A. A. Improving logging production through the rational use of hard-to-access logging areas by forest users of various forms of ownership. In: Students' Research Work-2020. Collection of scientific papers by students of the Republic of Belarus. Minsk: Publishing Center of BSU. 2021: 78-82 (In Russ.)

27. Levkovskaya A. V. Assessment of local fuels in the Republic of Belarus. In: Current Trends in the Development of the Energy Economy. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. dedicated to the 100th anniversary of BNTU (Minsk, December 3, 2020). Minsk: BNTU. 2021: 49-50. (In Russ.) URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/90895/Sovremennye_tendencii.pdf?sequence=1

28. Sednin V.A., Ignatovich R.S., Iokova I.L. On the feasibility of building mini-thermal power plant using local fuels in the conditions of the Republic of Belarus. Part 2. Role of mini-thermal power plant in heat supply systems of cities and settlements in Belarus. Nauka i tekhnika = Science & Technique. 2023;22(6):508-518. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>

29. Golub V. V. Power plants: HPP, GEAS. Equipment and technologies. The program for the development of hydroelectric power plants in Belarus. In: Current Energy Problems. Proc. 77th Sci. Tech. Conf. of Students and Postgraduates. (April 2021). Minsk: BNTU. 2021;3: 63-66. (In Russ.) URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/266280>

30. Radyuk E. V., Slesarev V. D. Alternative energy sources of the Republic of Belarus. In: Current Energy Problems. Proc. 78th Sci. Tech. Conf. of Students and Postgraduates. (April 2022). Minsk: BNTU. 2022: 12-15. (In Russ.)

31. Klyausova Yu. V., Tsyganova A. A., Bel'skaya G. V. Prospects for the development of biogas technologies in the Republic of Belarus // Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy. 2023;4: 52-56. (In Russ.) EDN: RKGZCW

32. Kapustin N. F. Biogas plants in the Republic of Belarus. Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva = Mechanization and Electrification of Agriculture. 2020; 54: 182-185. (In Russ.) URL: <https://mechel.belal.by/jour/article/view/676>

33. Klyausova Yu. V., Tsyganova A. A., Belskaya G. V. Application of biogas technologies for organic waste management. Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy. 2024; 3:85-89. (In Russ.) EDN: HYTBLM

34. Mikhailov S. V. Alternative energy: the potential of using biogas complexes in the Republic of Belarus. In: Current Problems of Science and Technology. Proc. VII Int. Sci. Prac. Conf. (Ufa, January 14, 2022). Ufa: Scientific Publishing Center "Bulletin of Science". 2022:7-16. (In Russ.) EDN: UKLFYX

Об авторах	About the authors
Василий Николаевич Гутман , канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии, Барановичский	Vasily N. Gutman , Cand.Sc. (Engineering), Associate professor, Department of Technical Support of Agricultural Production, Associate professor, Baranovichi State University, 62

государственный университет, ул. Парковая, д. 62, г. Барановичи, 225401, Республика Беларусь, gutman.v.n@gmail.com https://orcid.org/0009-0009-5277-5135	Parkowaya Str., Baranovichi, 225401, Belarus, gutman.v.n@gmail.com https://orcid.org/0009-0009-5277-5135
Илья Евгеньевич Плаксин , канд. техн. наук, научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Филътровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; ilyaplaxin@gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820	Ilya E. Plaksin , Cand. Sc. (Engineering), researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia ilyaplaxin@gmail.com https://orcid.org/0000-0002-3695-0820
Алексей Валериевич Трифанов , канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отдел агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Филътровское шоссе, д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия; trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148	Alexey V. Trifanov , Cand. Sc. (Engineering), Assistant Professor, leading researcher, Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production - branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russia, trifanovav@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3503-6148
Заявленный вклад авторов	Authors' contribution
В.Н. Гутман – идея обобщения опыта Беларуси в развитии возобновляемых источников энергии. Написание первичного материала статьи. И.Е. Плаксин – теоретические предпосылки, создание черновика рукописи. А.В. Трифанов – создание окончательной версии (доработка) рукописи, администрирование данных.	V.N. Gutman – the idea to analyze the experience of Belarus at the development of renewable energy sources; writing initial variant of the manuscript. I.E. Plaksin – theoretical background, drafting the manuscript. A.V.Trifanov – revision and finalizing the manuscript, data administration.
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 одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 07.11.2025	Received: 07.11.2025
Одобрена после рецензирования: 02.03.2026	Approved after reviewing: 02.03.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

ОПЫТ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ОРГАНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Олеся Викторовна Слинько

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

inform-iko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1401-7327>

Аннотация. Актуальность кластерного подхода в развитии органического сельского хозяйства обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности отечественных производителей, обеспечения продовольственной безопасности, а также устойчивого развития сельских территорий. Целью исследования является анализ опыта формирования органических кластеров в России и за рубежом, а также выявление условий их эффективного функционирования. В работе использованы методы системного и сравнительного анализа, обобщения эмпирических данных, а также результаты собственных исследований, проведённых в 2023–2025 годах в 12 регионах Российской Федерации. Установлено, что в Европейском союзе более 70 % органических хозяйств интегрированы в кластеры, тогда как в России подобные структуры охватывают менее 5 % производителей. Наиболее успешные российские примеры реализованы в Белгородской, Калужской и Ленинградской областях. Объём сертифицированной органической продукции в стране вырос с 12 тыс. тонн в 2020 году до 48 тыс. тонн в 2024 году, однако её доля на внутреннем рынке не превышает 0,6 %. Выявлены ключевые барьеры: фрагментарность нормативно-правовой базы, высокая стоимость сертификации (до 350 тыс. рублей), дефицит квалифицированных кадров (менее 300 специалистов в стране) и низкая потребительская осведомлённость (только 28 % граждан понимают термин «органика»). Предложены меры по преодолению ограничений через развитие кооперации, стандартизацию маркировки и цифровизацию цепочек добавленной стоимости. Сделан вывод о том, что кластеризация способна стать драйвером устойчивого развития органического сектора при условии комплексной государственной поддержки и участия частного сектора.

Ключевые слова: органическое сельское хозяйство, кластеризация, агропромышленный комплекс, устойчивое развитие, кооперация, сертификация, продовольственная безопасность.

Для цитирования: Слинько О.В. Опыт кластеризации производства органической продукции // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 136-145 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-136-144>

Research article
Universal Decimal Code 338.43:631.5

EXPERIENCE IN ORGANIC PRODUCTION CLUSTERS

Olesya V. Slinko

Abstract. The cluster approach is important in developing organic agriculture, as there is a need to increase the competitiveness of domestic producers, ensure food security, and promote sustainable development of rural areas. This study aimed to examine the experience of organic clusters in Russia and other countries and to identify the conditions for their effective functioning. This research applied systematic and comparative analysis, generalization of empirical data, and the results of original research conducted in 2023-2025 across 12 Russian regions. Results demonstrate that in the European Union over 70% of organic farms are integrated into clusters, while in Russia such structures cover less than 5% of producers. The most successful Russian cases are located in the Belgorod, Kaluga, and Leningrad Regions. Although certified organic production in the country increased from 12,000 tons in 2020 to 48,000 tons in 2024, its domestic market share remains below 0.6%. The study identified the key barriers: a fragmented regulatory framework, high certification costs (up to 350,000 rubles), a shortage of qualified personnel (fewer than 300 specialists nationwide), and low consumer awareness (only 28% of citizens understand the term “organic”). To overcome these limitations, the study proposes such measures as enhanced cooperation, standardized labeling, and the digitalization of value chains. Ultimately, clustering can become a driver for the sustainable development of organic sector, provided there is comprehensive state support and private sector engagement.

Keywords: organic agriculture, clustering, agro-industrial complex, sustainable development, cooperation, certification, food security

For citation: Slinko O.V. Experience in organic production clusters. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 136-145 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-136-144>

Введение. Современные вызовы глобальной аграрной системы – деградация почв, изменение климата, рост спроса на экологически чистую продукцию – требуют перехода к устойчивым моделям сельскохозяйственного производства [1, 2].

Одним из таких направлений является органическое сельское хозяйство, основанное на принципах биологизации, экологичности, биоразнообразия и запрета синтетических удобрений и пестицидов, а также внедрении современных автоматизированных, роботизированных и цифровых технологий, которые позволяют повысить основные показатели производства органической продукции. [3, 4, 5]. Наиболее трудоемкими, с учетом требований к органическому земледелию, считаются процессы в системе питания растений и почвообрабатывающие операции, в том числе для удаления сорной растительности [6, 7, 8].

В условиях политики импортозамещения и санкционных ограничений особую значимость приобретает организация эффективных производственно-сбытовых цепочек, в том числе на основе кластерного подхода. Международный опыт (ЕС, США, Китай) демонстрирует высокую эффективность кластеров в органическом секторе [9].

В России подобные модели находятся на начальной стадии развития. Анализ научных работ показывает, что вопросы кластеризации органического производства остаются недостаточно изученными, особенно в контексте взаимодействия институциональных, финансовых и цифровых факторов, определяющих устойчивость кластеров в условиях санкционной экономики [10].

Цель исследования. Целью настоящего исследования является систематизация опыта кластеризации производства органической продукции в России и за рубежом, а также формулирование рекомендаций по созданию и развитию органических кластеров в российских регионах.

Материалы и методы. В работе использованы данные из научных публикаций, отчетов Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, материалов Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) и Международной федерации органических движений (International Federation of Organic Agriculture Movements, IFOAM), а также результаты собственных исследований, проведённых в 2021-2025 годах. Применены методы системного анализа, сравнительного анализа и обобщения. Сбор информации осуществлялся за период 2019-2025 годов. Статистическая обработка включала описательные методы и трендовый анализ.

Результаты исследования. Эмпирическое исследование охватило 12 регионов РФ, где реализуются пилотные проекты по созданию органических кластеров. По состоянию на конец 2024 г. в России функционировало 27 формализованных органических кластеров, из них 18 – в Центральном, Северо-Западном и Южном федеральных округах. Наиболее развитыми признаны три кластера [11]:

Белгородский кластер «Эко-Агро»: объединяет 9 хозяйств, 1 перерабатывающее предприятие и логистический центр. Объём сертифицированной продукции – 6 200 т/год (в основном зерновые, масло подсолнечное, молочная продукция). Уровень кооперации – 82 % участников используют общую платформу сбыта.

Калужский кластер «Зелёный пояс»: включает 12 фермерских хозяйств и розничную сеть из 7 точек. Доля продукции с маркировкой «органика» в региональных сетях – 3,1 % (против среднероссийских 0,6 %).

Ленинградский кластер «Северная органика»: специализируется на тепличных культурах и ягодах. Выручка от продаж за 2024 г. – 187 млн руб., рентабельность – 22 % (на 8 п.п. выше средней по АПК региона) [11].

В совокупности площадь земель, используемых под органическое производство, составила 110 тыс. га (рост на 267 % с 2020 г.), а объём сертифицированной продукции – 48 тыс. тонн (рост в 4 раза). Однако доля этой продукции на внутреннем рынке не превышает 0,6 %, что свидетельствует о низкой рыночной интеграции³⁰.

Ключевой проблемой остаётся высокая стоимость входа в кластер: средняя цена сертификации одного предприятия – 280-350 тыс. руб., обучение персонала — от 45 тыс. руб./чел., внедрение системы прослеживаемости – до 1,2 млн руб. Только 37 % участников получают частичную компенсацию от региональных властей [11].

Обсуждение. Полученные результаты позволяют провести содержательное сопоставление с международным опытом. В ЕС, согласно отчёту Европейской комиссии (2023), более 70 % сертифицированных органических хозяйств интегрированы в формальные или неформальные кластерные структуры – от локальных кооперативов до региональных агроэкологических платформ [12]. Такая интеграция охватывает не только производителей, но и перерабатывающие предприятия, логистические компании, розничные сети и даже

³⁰Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Отчёт о состоянии и развитии органического сельского хозяйства в Российской Федерации. Москва. 2025. 45 с.

туристические сервисы, что создаёт устойчивые вертикально и горизонтально связанные цепочки создания стоимости.

Одним из ключевых факторов, способствующих массовому вовлечению хозяйств в кластеры, является система государственной поддержки, предусмотренная в рамках общей аграрной политики Европейского союза (Common Agricultural Policy, CAP). В большинстве стран действуют механизмы компенсации расходов до 70 %, связанных с переходом на органическое земледелие: это включает затраты на сертификацию, обучение персонала, разработку планов управления почвой и биоразнообразием, а также внедрение цифровых систем прослеживаемости. Например, в Германии, Франции и Италии фермеры получают ежегодные выплаты за гектар сертифицированных органических угодий в течение 5 лет после перехода, что значительно снижает финансовые риски [12].

Дополнительным стимулом выступает единая система маркировки «EU Organic Leaf», обязательная для всей органической продукции, продаваемой на территории ЕС. Этот логотип, введённый в 2010 году и активно продвигаемый через информационные кампании Еврокомиссии, обеспечивает высокий уровень доверия со стороны потребителей: по данным Eurobarometer (2023), 86 % граждан ЕС узнают этот знак, а 74 % считают его гарантией качества и экологичности [12]. Это напрямую стимулирует спрос и позволяет кластерам эффективно позиционировать свою продукцию на рынке.

Благодаря совокупности этих мер – институциональной поддержки, стандартизации и рыночного доверия – средний срок окупаемости инвестиций в переход на органическое производство в странах ЕС составляет всего 3-4 года, несмотря на более высокие первоначальные издержки и снижение урожайности в переходный период (обычно на 15-30 % в первые 2-3 года). При этом кластерные формы организации позволяют дополнительно снизить транзакционные издержки, оптимизировать логистику и совместно использовать дорогостоящую инфраструктуру (например, мобильные перерабатывающие модули или лаборатории контроля качества) [12].

Особенно показателен опыт Дании, где с 2016 года реализуется проект «Økologisk landsby» (Органическая деревня), на острове Фюн. Кластер объединяет более 40 фермерских хозяйств, перерабатывающие предприятия, местные магазины, рестораны и туристические объекты в единую экосистему устойчивого развития. Все участники используют общий бренд «Organic Fyn» и единую логистическую платформу, что обеспечивает высокую степень вертикальной интеграции. Государство компенсирует до 65 % расходов на сертификацию и модернизацию, а предприятия, работающие исключительно с органическим сырьём, получают налоговые льготы [13].

Ключевым элементом успеха стал переход на цифровые технологии: внедрена блокчейн-система прослеживаемости, доступная потребителям через QR-коды на упаковке. По данным Danish Agriculture and Food Council, это повысило доверие к продукции на 31 % [14]. Кроме того, при кластере функционирует обучающий центр, ежегодно готовящий свыше 500 специалистов из стран ЕС и СНГ. Экономическая эффективность модели подтверждается средней рентабельностью участников в 26 % и долей органической продукции в региональном ритейле на уровне 12,4 %, что значительно выше среднего показателя по Дании (2,1 %). Проект интегрирован в национальную стратегию достижения 100 % органического общественного питания к 2030 году и демонстрирует, как кластер может одновременно решать экономические, экологические и социальные задачи.

В России поддержка фрагментарна: лишь 5 субъектов РФ имеют региональные программы поддержки органики. Отсутствие единых требований к маркировке и низкая информированность потребителей (по данным ВЦИОМ, 2024, только 28 % россиян понимают, что означает термин «органическая продукция») снижают доверие к продукции и сдерживают спрос [15].

Особое внимание заслуживает роль цифровых технологий. В Германии и Нидерландах кластеры используют блокчейн-платформы для трассировки продукции от поля до прилавка. В России цифровизация цепочек создания стоимости в органическом секторе находится на начальной стадии, однако уже демонстрирует значимый потенциал. На конец 2024 года блокчейн-технологии для полной прослеживаемости продукции «от поля до прилавка» были внедрены лишь в двух пилотных органических кластерах: Ленинградском кластере «Северная органика», специализирующемся на ягодах и тепличных овощах, и Калужском кластере «Зелёный пояс», ориентированном на молочную продукцию и фруктово-овощную корзину.

В рамках этих проектов каждая партия продукции сопровождается цифровым паспортом, зафиксированным в распределённом реестре. Потребитель может отсканировать QR-код на упаковке и получить доступ к информации о дате и месте сбора урожая или доения, составе почвы и применённых органических удобрениях, сертификатах соответствия, маршруте логистики (включая температурный режим при транспортировке), фотографиях фермы и команды производителей.

Такой подход не только повышает прозрачность, но и формирует эмоциональную связь между потребителем и производителем, что особенно важно на рынке с низким уровнем доверия к маркировке «органика». Согласно внутренним исследованиям, проведённым в рамках проектов в 2023-2024 годах, уровень лояльности потребителей (измеряемый через повторные покупки, рекомендации и вовлечённость в соцсетях) вырос на 18-22 % по сравнению с аналогичными продуктами без цифровой трассировки [11].

Однако масштабирование таких решений сдерживается рядом факторов: высокой стоимостью внедрения (от 800 тыс. до 1,5 млн руб. на кластер); отсутствием унифицированных технических стандартов для аграрных блокчейн-платформ; недостаточной цифровой зрелостью малых фермерских хозяйств, составляющих основу органического сектора.

Тем не менее, опыт этих двух кластеров подтверждает, что цифровая прозрачность может частично компенсировать институциональные дефициты – такие как отсутствие единой государственной маркировки и низкая осведомлённость населения. В перспективе развитие национальной платформы прослеживаемости органической продукции, возможно, на базе существующих систем (например, «Честный ЗНАК» или «Меркурий»), могло бы стать важным шагом к повышению доверия и конкурентоспособности российской органики [11].

Сравнительный анализ также выявил, что эффективность кластера напрямую зависит от степени вертикальной интеграции: в моделях, где производители, переработчики и дистрибьюторы работают в единой экосистеме, себестоимость продукции на 12-15 % ниже, чем у изолированных хозяйств [2].

Таким образом, барьеры развития органических кластеров в РФ носят институциональный, финансовый и информационный, а не технологический характер [16]. Это подтверждает выводы Willer & Lernoud [1] о том, что успех органического сектора

определяется не столько агротехникой, сколько политической волей и инфраструктурой доверия.

Выводы. Успех зарубежных кластеров во многом обусловлен государственной поддержкой: субсидирование сертификации, налоговые льготы, создание информационных платформ. В России поддержка носит фрагментарный характер. Кроме того, отсутствует единая система маркировки органической продукции, что снижает доверие потребителей. Ключевыми барьерами также являются: дефицит квалифицированных кадров (менее 300 сертифицированных специалистов в стране); высокая стоимость сертификации (до 350 тыс. рублей); слабая кооперация между участниками цепочки.

В то же время пилотные проекты в Белгородской, Калужской и Ленинградской областях демонстрируют экономическую эффективность: рентабельность до 22 %, снижение себестоимости на 12-15 %, рост объёмов выпуска в 4 раза за 4 года.

Основными ограничениями масштабирования выступают: фрагментарность нормативно-правовой базы и отсутствие единой системы маркировки³¹; высокая стоимость сертификации и цифровизации (до 1,5 млн руб. на участника); дефицит квалифицированных кадров (менее 300 специалистов в стране); низкая осведомлённость потребителей (только 28 % понимают термин «органика»).

Для преодоления барьеров необходимо унифицировать законодательство и ввести обязательную маркировку «Органика РФ»; расширить механизм субсидирования до 50-70 % затрат на сертификацию и ИТ-инфраструктуру; развивать образовательные программы в вузах и на базе кластеров; внедрять цифровые платформы прослеживаемости (блокчейн, QR-коды) как инструмент повышения доверия.

Кластерный подход является стратегически значимым инструментом обеспечения продовольственной безопасности, импортозамещения и устойчивого развития сельских территорий. Его потенциал может быть реализован только при условии долгосрочной, системной поддержки со стороны государства и активного участия частного сектора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Willer H., Trávníček J., Schlatter B. The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2024. Bonn: FiBL. 2024. 356 p. URL: https://orgprints.org/id/eprint/52272/1/1747-organic-world-2024_light.pdf

2. 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> EDN GORCAQ.

3. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-13-21>

³¹ Федеральный закон от 03.08.18 № 280-ФЗ «Об органической продукции и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/550835238> (дата обращения 18.02.2026)

4. 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. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-56-64>
5. Новикова И.И., Захаров А.М., Минин В.Б., Максимов Д.А., Титова Ю.А., Устроенов А.А., Хютти А.В., Мурзаев Е.А. Биологизация производства картофеля в условиях Северо-Западного региона РФ. Санкт-Петербург. – 2024. – 156 с.
6. Захаров А.М., Мурзаев Е.А., Иванов Д.Ю. Обоснование конструктивных параметров дозирующей системы машины для внесения компостов // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 2 (111). С. 73-83. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-2111-73-83>
7. Zakharov A.M., Minin V.B., Murzaev E.A., Mishanov A.P., Ivanov D.Y. Effect of deep loosening of inter-rows on physical properties of sod-podzolic soil and yield of organic potato // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series. 2022. Т. 60. № 4. С. 372-379. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-4-372-379>
8. Юнин В.А., Захаров А.М., Кузнецов Н.Н., Слизков А.М., Зыков А.В. Способ и техническое средство для локального внесения твердых органических удобрений при посадке картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4 (105). С. 62-79. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10267>
9. Padilla M., Pinto-Correia T., Guzmán G.I. Organic farming clusters in Europe: Drivers and impacts // Journal of Rural Studies. 2021. Vol. 85. P. 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.003>
10. Войтюк В.А. Глобализация рынка органической продукции: институциональные ограничения и стратегии их преодоления // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Матер. XVII Межд. науч.-практ. интернет-конференции, (Москва, 05 июня 2025 г.). М.: Росинформагротех. 2025. С. 46-52. EDN: DIFMCG
11. Войтюк В.А., Слинько О.В. Кооперация в органическом сельском хозяйстве: преодоление вызовов и возможности для России // Молодые ученые в аграрной науке: Сб. матер. VIII Межд. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Луганск, 23-24 апреля 2025 г.) Луганск: Луганский ГАУ. 2025. С. 432-433. EDN: HNYHHZ
12. European Commission. EU Organic Market Report 2023. Brussels. 2023. 88 p.
13. Danish Agriculture and Food Council. Organic Village Fyn: A Model for Integrated Rural Development. Copenhagen. 2023. 32 p.
14. Jensen A.K., Nielsen T.R. Blockchain-based traceability in Danish organic clusters: Consumer trust and market impact // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 398, 136621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.136621>
15. Войтюк В.А., Кондратьева О.В., Романова В.В. Роль органического сельского хозяйства в устойчивом развитии аграрных организаций: технологические аспекты формирования биоэкономики в России // Инновационные технологии и технические средства для АПК: Матер. межд. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (Воронеж, 07-08 октября 2025 г.). Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. 2025. С. 12-17. EDN: TDWHSD
16. Кондратьева О.В., Федоренко В.Ф., Войтюк В.А. и др. Комплексная оценка состояния и перспектив развития органического сельского хозяйства в Российской Федерации: Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2024. 92 с. EDN: WTCVCG

REFERENCES

1. Willer H., Trávníček J., Schlatter B. The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2024. Bonn: FiBL. 2024. 356 p. (In Eng.) URL: https://orgprints.org/id/eprint/52272/1/1747-organic-world-2024_light.pdf
2. 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 Areas*. 2024;1(319):2-7. (In Russ.) EDN: GOPCAQ
3. Zakharov A.M., Zastrav A.A., Murzaev E.A., Komoyedov A.D. Methods of designing technologies for organic crop production. *Agricultural machinery and technology*. 2025. Vol. 19. No. 1. pp. 13-21. (In Russ.) EDN: EOWTQK
4. Minin V.B., Zakharov A.M. Tasks and structure of the information and communication system of "smart" organic farming. *Agricultural machinery and technology*. 2021. Vol. 15. No. 4. pp. 56-64. (In Russ.) EDN: WXRMBN
5. Novikova I.I., Zakharov A.M., Minin V.B., Maksimov D.A., Titova Yu.A., Rastroyev A.A., Murzaev E.A. Biologization of potato production in the North-Western region of the Russian Federation. Saint Petersburg, 2024. p. 156. EDN: MYWYLD
6. Zakharov A.M., Murzaev E.A., Ivanov D.Yu. Substantiation of the design parameters of the dosing system of the composting machine. *Agroecoengineering*. 2022. No. 2 (111). pp. 73-83. (In Russ.) EDN: NYVNYH
7. Zakharov A.M., Minin V.B., Murzaev E.A., Mishanov A.P., Ivanov D.Y. Effect of deep loosening of inter-rows on physical properties of sod-podzolic soil and yield of organic potato. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2022. Vol. 60. No. 4. pp. 372-379. (In Russ.) EDN: WUTYRV
8. Yunin V.A., Zakharov A.M., Kuznetsov N.N., Slizkov A.M., Zykov A.V. Method and technical means for local application of solid organic fertilizers during potato planting. *Agroecoengineering*. 2020. No. 4 (105). pp. 62-79. (In Russ.) EDN: CARRVZ
9. Padilla M., Pinto-Correia T., Guzmán G.I. Organic farming clusters in Europe: Drivers and impacts. *Journal of Rural Studies*. 2021;85:112-123. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.003>
10. Voityuk V.A. Globalization of the organic market: Institutional constraints and strategies to overcome them. In: *Scientific and Information Support for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Proc. XVII Int. Sci. Prac. Internet Conf. (Moscow, June 05, 2025)*. Moscow: Rosinformagrotech. 2025: 46-52. (In Russ.) EDN: DIFMCG
11. Voityuk V.A., Slinko O.V. Cooperation in organic agriculture: Overcoming challenges and opportunities for Russia. In: *Young Scientists in Agricultural Science: Proc. VIII Int. Sci. Prac. Conf. of Young Scientists and Specialists (Lugansk, April 23-24, 2025)* Lugansk: Lugansk State Agrarian University. 2025: 432-433. (In Russ.) EDN: HNYHHZ
12. European Commission. EU Organic Market Report 2023. Brussels; 2023. 88 p. (In Eng.)
13. Danish Agriculture and Food Council. Organic Village Fyn: A Model for Integrated Rural Development. Copenhagen; 2023. 32 p. (In Eng.)
14. Jensen A.K., Nielsen T.R. Blockchain-based traceability in Danish organic clusters: Consumer trust and market impact. *Journal of Cleaner Production*. 2024;398:136621. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.136621>
15. Voityuk V.A., Kondratieva O.V., Romanova V.V. The role of organic agriculture in the sustainable development of agricultural organizations: technological aspects of the formation of

bioeconomics in Russia. In: Innovative Technologies and Technical Means for Agriculture. Proc. Int. Sci. Prac. Conf. of Young Scientists and Specialists (Voronezh, October 07-08, 2025). Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I. 2025: 12-17. (In Russ.) EDN: TDWHSD

16. Kondratieva O.V., Fedorenko V.F., Voytyuk V.A. et al. Comprehensive assessment of the state and prospects of organic agriculture development in the Russian Federation: Analytical review. Moscow: Rosinformagrotekh; 2024. 92 p. (In Russ.) EDN: WTCVCG

Об авторах:	About the authors:
Слинько Олеся Викторовна старший научный сотрудник отдела прогнозно-аналитической информации и консультационного обеспечения, ФГБНУ «Росинформагротех». 141261, Московская область, г. о. Пушкинский, р.п. Правдинский, ул. Лесная д. 60 inform-iko@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1401-7327	Olesya V. Slinko Senior Researcher, Department of Predictive Analytical Information and Consulting Support of Rosinformagrotech, 141261, Moscow Region, Urban District Pushkinsky, Industrial Township Pravdinsky, Lesnaya Str., 60 inform-iko@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-1401-7327
Заявленный вклад автора О.В. Слинько – создание черновика, рукописи, создание окончательной версии, (доработка) рукописи и ее редактирование, визуализация, методология, руководство исследованием, концептуализация	The stated author contribution O.V. Slinko – drafting, manuscript, creation of the final version, (revision) of the manuscript and its editing, visualization, methodology, research management, conceptualization translator
Конфликт интересов Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов	Conflict of interest The author declares 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: 16.01.2026	Received: 16.01.2026
Одобрена после рецензирования: 17.03.2026	Approved after reviewing: 17.03.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

РАЗДЕЛ 3. ЭКОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Научная статья

УДК 004.633.2:636.2

DOI 10.24412/2713-2641-2026-2127-145-153

АУГМЕНТАЦИЯ ДАТАСЕТОВ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ В СФЕРЕ МОЛОЧНОГО ЖИВОТНОВОДСТВА

Ирина Ивановна Михайленко^{1✉}, Олег Дмитриевич Мещеряков², Андрей Игоревич Литвинов³

Белгородский федеральный аграрный научный центр РАН, Белгород, Россия

¹ ira-mik86@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3472-0041>

² meshe.64@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8723-1571>

³ zemledele-it@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3030-1895>

Аннотация. Основная задача исследования заключается в формировании датасета с паттернами простых действий коров, характеризующими их функциональные состояния, с целью обучения сверточной нейросети. Анализ данных выявил недостаточность ряда типов действий животных. Для качественного обучения нейронной сети необходимо дополнительно увеличить количество видеоданных по редко проявляемым действиям, чтобы привести в соответствие все рассматриваемые паттерны. Для этого был разработан и применен алгоритм аугментации данных. В работе рассматривается оценка применения различных методов аугментации для качественного увеличения датасетов с отличающимися типами действий животных крупного рогатого скота для обучения сверточной нейронной сети. Выявлено, что алгоритмы аугментации в большинстве случаев повышают эффективность обучения сверточных нейронных сетей класса YOLO. По средним показателям определено, что более эффективными способами аугментации исследуемых паттернов действий животных являются зеркальное отражение изображений ($mAP_{0.5} = 0,645$), мозаичное размещение ($mAP_{0.5} = 0,643$) и повороты ($mAP_{0.5} = 0,642$). Точность датасета, дополненного смешанными методами аугментации, имела наиболее низкий показатель по сравнению с другими датасетами ($mAP_{0.5} = 0,629$). Установлена зависимость метода аугментации от типов действий животных, которая может снизить эффективность обучения.

Ключевые слова: аугментация данных, машинное обучение, детектирование объектов, нейронные сети, датасет.

Для цитирования: Михайленко И.И., Мещеряков О.Д., Литвинов А.И. Аугментация датасетов в машинном обучении при решении задач животноводства // АгроЭкоИнженерия. 2026. № 2(127). С. 145-154 <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-145-153>

Research article

Universal Decimal Code 004.633.2:636.2

DATASETS AUGMENTATION IN MACHINE LEARNING FOR SOLVING DAIRY

Irina I. Mikhailenko^{1✉}, Oleg D. Meshcheryakov², Andrey I. Litvinov³

Belgorod Federal Agricultural Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Belgorod,
Russia

¹ ira-mik86@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3472-0041>

² meshe.64@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8723-1571>

³ zemledel-it@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3030-1895>

Abstract. The main study objective is to create a dataset with patterns of basic cow actions that characterize the animals' functional state in order to train a convolutional neural network. The data analysis revealed under-presentation of certain types of animal actions. To train the neural network effectively, the amount of video data for rare actions needs to be increased to match all the patterns under consideration. To address this data imbalance, the study developed and applied a data augmentation algorithm. The paper examines the application of various augmentation methods to improve the dataset quality across diverse cattle behavior categories for training a convolutional neural network. The study found that augmentation algorithms in most cases increase the training efficiency of convolutional neural networks of the YOLO class. According to the average indicators, the study revealed that the most effective ways to augment the studied patterns of animal actions are mirroring images ($mAP_{0.5} = 0.645$), mosaic augmentation ($mAP_{0.5} = 0.643$), and rotations ($mAP_{0.5} = 0.642$). The accuracy of the dataset supplemented with mixed augmentation methods had the lowest indicator in comparison with other datasets ($mAP_{0.5} = 0.629$). We found that augmentation effectiveness varied by animal action type, which might reduce overall training efficiency.

Keywords: data augmentation, machine learning, object detection, neural networks, dataset

For citation: Mikhailenko I.I., Meshcheryakov O.D., Litvinov A.I. Datasets augmentation in machine learning for solving dairy farming problems. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 145-154 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-145-153>

Введение. Биометрия животных – это перспективное направление в области компьютерного зрения, распознавания образов и когнитивистики, которое играет важную роль в регистрации, уникальной идентификации и верификации крупного рогатого скота [1, 2]. Существующие методы извлечения текстурных признаков и представления признаков на основе внешнего вида не позволяют распознавать животных в произвольной среде. В последнее время все больше внимания уделяется подходам на основе глубокого обучения для распознавания видов или отдельных животных с использованием визуальных признаков [3, 4].

Для обучения нейронной сети необходимо формирование репрезентативного датасета, содержащего тысячи изображений. Поэтому с практической точки зрения возникает сложность собрать такое количество данных, особенно это касается специфических задач. Другая проблема формирования набора данных – аннотирование объектов на изображениях или видеоданных. Данный процесс производится вручную человеком, каждому объекту на изображении присваивается метка, затем проводится проверка аннотаций на корректность, отсюда сложность, трудоемкость и временные затраты [5, 6]. В-третьих, эффективность обучения нейросетей зависит от репрезентативности данных, то есть обучающая выборка

должна состоять не только из четких изображений, но и включать достаточное количество деформированных, зашумленных данных, которые встречаются в реальной жизни. Недостаточное количество качественных данных приведет к переобучению модели.

Решению всех этих проблем может способствовать использование аугментации данных на начальном этапе формирования датасета. Аугментация – это искусственное увеличение обучающей выборки с использованием специфических преобразований, учитывающих суть поставленных задач. Данный процесс позволяет увеличить выборку в несколько раз и в полном объеме выразить генеральную совокупность данных [7, 8].

Существует несколько алгоритмов аугментации: световые зашумления, геометрические перемещения, наложение изображений, проективные искажения, осевые отражения [9]. Применение того или иного типа аугментации зависит от сложности поставленных задач.

Цель работы – исследование эффективности различных подходов аугментации данных при решении задач молочного животноводства, а именно разработки интеллектуальной системы по распознаванию поведения крупного рогатого скота.

Аугментация данных в молочном животноводстве – это не просто «увеличение числа картинок». Это стратегический метод, который делает модели искусственного интеллекта более точными, надежными и пригодными для массового внедрения в разнообразных и непредсказуемых условиях реальных ферм, где сбор идеальных данных невозможен. Данное исследование направлено на решение следующих задач:

1. Борьба с недостаточным и несбалансированным объемом данных.
2. Повышение обучающей способности модели при помощи моделирования разнообразия условий.
3. Решение проблемы классового дисбаланса, т.е. увеличение точности в распознавании редких, но значимых состояний.

Материалы и методы. Основная задача исследования заключается в формировании датасета с паттернами простых действий коров, характеризующими их функциональные состояния. Экспериментальные наблюдения проводили на базе Ериковского молочного комплекса ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН». Для формирования набора данных в одном из помещений фермы на специальных рельсах была установлена видеоаппаратура автоматизированного слежения за поведением животных. В дневное время суток камеры снимали в цветном режиме, в ночное – в черно-белом режиме (ИК-диапазон). Для эксперимента взяли черно-пеструю породу крупного рогатого скота. Период съемок происходил во время привязного содержания коров (ноябрь-апрель). Для исследования взяты 20 суток непрерывных видеоданных с трех видеокамер.

Исходный датасет представлен набором изображений из 7 типов действий (рис. 1): rumination (руминация), no rumination (нет руминации), lying down (лежание), standing still (неподвижное стояние), water consumption (водопотребление), hitting horns on an object (удар рогами о предмет), showing interest in a neighboring cow (проявление интереса к соседней корове). Общий объем датасета составляет 6880 изображений. Количество паттернов по типам следующее:

- rumination – 1412;
- no rumination – 1398;
- lying down – 1355;
- standing still – 957;
- water consumption - 878;

- hitting horns on an object – 315;
- showing interest in a neighboring cow – 565.

Датасет разделен на три выборки:

1. Обучающая – 4816 (70%);
2. Валидационная – 1376 (20%);
3. Тестовая – 688 (10%).



Рис. 1 Примеры паттернов из датасета

Fig. 1 Examples of patterns from the dataset

Предварительный анализ представленных изображений показал, что одни паттерны проявляются часто и их объема достаточно для формирования обучающей выборки. Например, «руминация», «нет руминации», «лежание». Однако, остальные типы действий сформированы не в полном объеме. Для качественного обучения нейронной сети необходимо дополнительно увеличить количество видеоданных по редко проявляемым действиям, чтобы привести в соответствие все рассматриваемые паттерны. Это является необходимым фактором для разработки интеллектуальной роботизированной системы по персональной идентификации коров и автоматическому распознаванию их функциональных состояний на основе обработки фото- и видеоизображений в видимом спектральном диапазоне с помощью технологий глубоких нейросетей.

Для автоматизированной аугментации изображений применяли Tools Roboflow [10].

Результаты. Для эффективной аугментации был разработан алгоритм по трансформации набора изображений в соответствии с заданными параметрами. Применение преобразований в каждом изображении производится в рандомном порядке и количестве. В качестве аугментационных деформаций использовали наиболее частые в практике искажения (рис. 2):

1. Обрезка изображения и доведение до изначального размера (диапазон высоты / ширины обрезки (0,7; 0,9)).

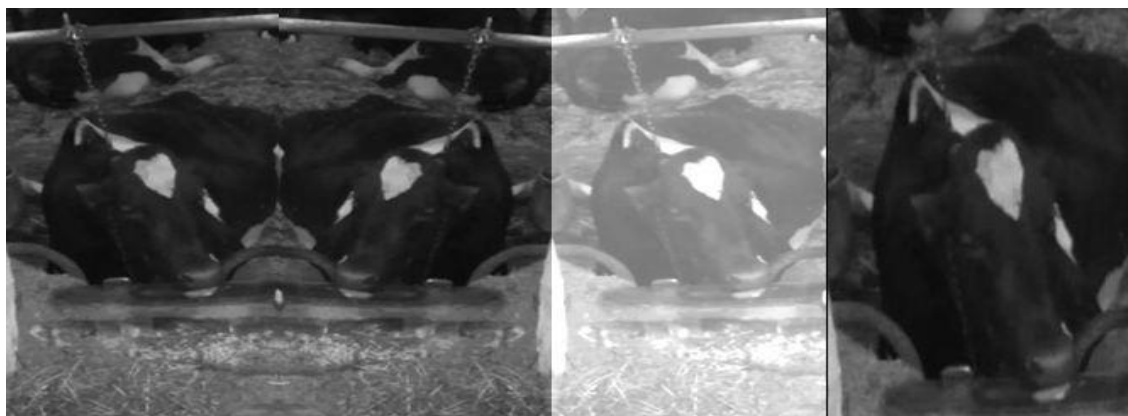
2. Поворот ($\pm 15^\circ$).

3. Добавление шума (интенсивность 0,01;0,05).

4. Варьирование яркости (диапазон $\pm 0,2$) и контраста (0,8; 1,2).

5. Мозаичное размещение.

6. Зеркальное отражение.



а а)

б б)

в в)

Рис. 2 Аугментационные деформации: а – зеркальное отражение; б – варьирование яркости; в – обрезка.

Fig. 2 Augmentation deformations: a – mirroring; b – brightness variation; c – cropping.

Алгоритм аугментации выглядит следующим образом (рис. 3): исходное изображение поступает на вход → устанавливается случайное количество трансформаций → указанные деформации меняют положение и поочередно применяются к изображению → обработка изображения производится с одинаковыми параметрами.



Рис. 3 Блок-схема алгоритма аугментации изображений

Fig. 3 Flowchart of the image augmentation algorithm

В результате процесса аугментации были сформированы 7 вариантов датасетов и увеличено число изображений по редко наблюдаемым паттернам:

1. CroppingDataset – дополнен обрезанными изображениями до 2468.
2. RotationDataset – дополнен повернутыми изображениями – 3296.
3. NoiseDataset – дополнен зашумленными изображениями – 3177.
4. ContrastDataset – дополнен преобразованными по яркости и контрасту изображениями – 4576.
5. MosaicDataset – дополнен мозаично размещенными изображениями – 1334.
6. FlipDataset – дополнен зеркально отраженными изображениями – 2897.
7. MixedDataset – дополнен смешанными методами аугментации – 4125.

Для обучения по аугментированным датасетам использовали аппарат искусственных нейронных сетей со сверточными слоями на базе архитектуры YOLOv10.

Оценка точности детектирования типов действий на аугментированных датасетах проводилась с помощью метрики Average Precision (AP) [8]. Расчет производился для каждого типа действия отдельно и усредненно. Единый заданный порог Intersection over Union (IoU) был равен 0,5 [11]. Число эпох обучения равно 100, доверительный порог – 0,25. Результаты обучения сверточной нейронной сети на тестовой выборке представлены в таблице.

Таблица. Точность детектирования типов действий КРС с помощью нейросети, обученной на аугментированных датасетах

Table. Accuracy of detecting types of cattle actions using a neural network trained on augmented datasets

Датасет / Типы действий	Румина- ция AP _{0.5}	Нет руми- нации AP _{0.5}	Лежа- ние AP _{0.5}	Неподвиж- ное стояние AP _{0.5}	Водо- потреб- ление AP _{0.5}	Удар рогами о предмет AP _{0.5}	Прояв- ление интереса к сосед- ней корове AP _{0.5}	mAP _{0.5}
Оригинал	0,552	0,647	0,567	0,614	0,608	0,715	0,642	0,621
Обрезка	0,548	0,647	0,569	0,621	0,612	0,741	0,710	0,635
Поворот	0,586	0,685	0,547	0,608	0,610	0,736	0,724	0,642
Шум	0,537	0,634	0,568	0,632	0,616	0,745	0,702	0,633
Контраст	0,544	0,621	0,602	0,638	0,622	0,728	0,687	0,634
Мозаика	0,574	0,678	0,536	0,644	0,624	0,745	0,698	0,643
Отражение	0,573	0,658	0,589	0,654	0,634	0,722	0,682	0,645
Смешанный	0,568	0,624	0,548	0,650	0,628	0,724	0,662	0,629

Обсуждение. Сравнительный анализ по оценке точности детектирования типов действий КРС с помощью нейросети, обученной на аугментированных датасетах, показал имеющиеся различия в подходах аугментации. По средним показателям выявлено, что более эффективными методами аугментации исследуемых паттернов действий животных являются зеркальное отражение изображений, мозаичное размещение и повороты. Точность датасета, дополненного смешанными аугментациями, имела наиболее низкий показатель по сравнению с другими датасетами.

Если рассматривать различия датасетов по каждому типу действий животных, то можно разделить их на две группы:

- типы, эффективно аугментированные по всем методам преобразований – «водопотребление», «удар рогами о предмет», «проявление интереса к соседней корове»;
- типы, имеющие неэффективные аугментации. Например, обучение паттерна «руминация» снижается при таких преобразованиях, как обрезка, зашумление и варьирование яркости изображений; обучение паттерна «лежание» снижается при поворотах и мозаичном размещении изображений.

Выводы. Алгоритмы аугментации в большинстве случаев повышают эффективность обучения сверточных нейронных сетей класса YOLO. По средним показателям выявлено, что более эффективными методами аугментации исследуемых паттернов действий животных являются зеркальное отражение изображений ($mAP_{0.5} = 0,645$), мозаичное размещение ($mAP_{0.5} = 0,643$) и повороты ($mAP_{0.5} = 0,642$). Точность датасета, дополненного смешанными методами аугментации, имела наиболее низкий показатель по сравнению с другими датасетами ($mAP_{0.5} = 0,629$). Следует отметить, что установлена зависимость метода аугментации от типов действий животных, которая может снизить эффективность обучения, поэтому возникает необходимость поиска наиболее подходящих преобразований изображений, так как для решения поставленной цели и разработки точной интеллектуальной системы по распознаванию функциональных состояний животных необходимо учитывать весь перечень выбранных действий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галкин А.И. Применение нейросетей и технологий больших данных в сельском хозяйстве: повышение эффективности и устойчивости агропроизводства // Аграрная наука. 2025. №4. С. 167-171. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
2. Dawkins M.S. Does smart farming improve or damage animal welfare? Technology and what animals want // Frontiers in Animal Science. 2021. Vol. 2, 736536. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.736536>
3. Ещин А.В., Дегтярева Е.Д., Старостин И.А., Сысоев Г.В. Анализ состояния и перспективы развития технического обеспечения сельскохозяйственного производства в России // АПК: экономика, управление. 2024. № 8. С. 97-106. <https://doi.org/10.33305/248-97>
4. Егоров М.Ю., Соловьёв С.В., Герасимова О.А., Харитонов С.В. Система мониторинга параметров двигательной активности крупного рогатого скота на пастбищах // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 4(40). С. 33-38. EDN: BQDMQY
5. Sorokina V., Ablameyko S. Neural network training acceleration by weight standardization in segmentation of electronic commerce images // Reliability Engineering and Computational Intelligence. Studies in Computational Intelligence. 2021. Vol. 976. P. 237-244. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_14
6. Михайленко И.И., Нерубенко О.Е., Мещеряков О.Д. Процесс сегментации видеоданных для обучения глубоких нейронных сетей автоматическому распознаванию функциональных состояний КРС // Аграрная Россия. 2024. №4. С. 33-36. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2024-4-33-36>

7. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real time object detectors // 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2023. P. 7454-7475. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00721>
8. Chen Y, Hu V. T., Gavves E. et al. PointMixup: Augmentation for Point Clouds // CCV 2020 Lecture Notes in Computer Science / Vedaldi, A., Bischof, H., Brox, T., Frahm, JM. (eds). 2020. Vol. 12348. P. 330-345. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58580-8_20
9. Li Y., Zhou L., Yan H., Shan Y., Zheng C., Liu Y., Zuo X., Qiao B. Aircraft detection for remote sensing images based on deep convolutional neural networks // Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021. Vol. 2. P. 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/4685644>
10. Ye S., Bohush R., Chen C., Chen H. Person tracking and reidentification for multi-camera indoor video surveillance systems // Pattern Recognition and Image Analysis. 2020. Vol. 30(4). P. 827-837. <https://doi.org/10.1134/S1054661820040136>
11. Musall S., Urai A., Sussillo D., Churchland A. Harnessing behavioral diversity to understand circuits for cognition // Current Opinion in Neurobiology. 2019. Vol. 58. P. 229-238. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.09622>

REFERENCES

1. Galkin A.I. Application of neural networks and big data technologies in agriculture: increasing the efficiency and sustainability of agricultural production. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*. 2025;1(4):167-171. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-393-04-167-171>
2. Dawkins M.S. Does smart farming improve or damage animal welfare? Technology and what animals want. *Frontiers in Animal Science*. 2021; 2, 736536 (In Eng.) <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.736536>
3. Eshchin A.V., Degtiareva E.D., Starostin I.A., Sysoev G.V. Analysis of the state and prospects of development of technical support for agricultural production in Russia. *APK: ekonomika, upravlenie = AIC: Economics, Management*. 2024;8:97-106. (In Russ.) <https://doi.org/10.33305/248-97>
4. Yegorov M.Yu., Solov'yov S.V., Gerasimova O.A., Haritonov S.V. The monitoring system of cattle motor activity's parameters on pastures. *Tekhnika i Tekhnologii v Zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*. 2020;4(40):33-38. (In Russ.) EDN: BQDMQY
5. Sorokina V., Ablameyko S. Neural network training acceleration by weight standardization in segmentation of electronic commerce images. *Reliability Engineering and Computational Intelligence. Studies in Computational Intelligence*. 2021;976:237-244. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-030-74556-1_14
6. Mikhailenko I.I., Nerubenko O.E., Meshcheryakov O.D. Process of segmentation of video data for training deep neural networks to automatically recognize the functional states of cattle. *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2024;4:33-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2024-4-33-36>
7. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real time object detectors. In: *Proc. 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023:7454-7475. (In Eng.) <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00721>
8. Chen Y, Hu V. T., Gavves E. et al. PointMixup: Augmentation for Point Clouds. In: Vedaldi, A., Bischof, H., Brox, T., Frahm, JM. (eds) *Computer Vision – ECCV 2020. Lecture Notes in Computer Science*. 2020;12348: 330-345. (In Eng.) https://doi.org/10.1007/978-3-030-58580-8_20

9. Li Y., Zhou L., Yan H., Shan Y., Zheng C., Liu Y., Zuo X., Qiao B. Aircraft detection for remote sensing images based on deep convolutional neural networks. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2021(2):1-16. (In Eng.) <https://doi.org/10.1155/2021/4685644>
10. Ye S., Bohush R., Chen C., Chen H. Person tracking and reidentification for multi-camera indoor video surveillance systems. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2020;30(4): 827-837. (In Eng.) <https://doi.org/10.1134/S1054661820040136>
11. Musall S., Urai A., Sussillo D., Churchland A. Harnessing behavioral diversity to understand circuits for cognition. *Current Opinion in Neurobiology*. 2019;58:229-238. (In Eng.) <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.09622>

Об авторах:	About the authors
Михайленко Ирина Ивановна канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуальных сельскохозяйственных технологий ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН», 308001 Россия, Белгород, Октябрьская, 58 ira-mik86@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3472-0041	Irina I. Mikhailenko, Cand. Sc. (Biology), researcher, Laboratory of Intellectual Agricultural Technologies, Belgorod Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 308001 Russia, Belgorod, Oktyabrskaya, 58 ira-mik86@yandex.ru ORCID: 0000-0003-3472-0041
Мещеряков Олег Дмитриевич канд. с.-х. наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуальных сельскохозяйственных технологий ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН», 308001 Россия, Белгород, Октябрьская, 58 meshe.64@mail.ru ORCID: 0009-0007-8723-1571	Oleg D. Meshcheryakov, Cand. Sc. (Agriculture), researcher, Laboratory of Intellectual Agricultural Technologies, Belgorod Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 308001 Russia, Belgorod, Oktyabrskaya, 58 meshe.64@mail.ru ORCID: 0009-0007-8723-1571
Литвинов Андрей Игоревич младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных сельскохозяйственных технологий ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН», 308001 Россия, Белгород, Октябрьская, 58 zemledel-it@yandex.ru ORCID: 0009-0009-3030-1895	Andrey I. Litvinov, junior researcher, Laboratory of Intelligent Agricultural Technologies, Belgorod Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 308001 Russia, Belgorod, Oktyabrskaya, 58 zemledel-it@yandex.ru ORCID: 0009-0009-3030-1895
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 declare no conflict of interests regarding the publication of this paper
Статья поступила в редакцию: 11.02.2026	Received: 11.02.2026
Одобрена после рецензирования: 07.04.2026	Approved after reviewing: 07.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА ПРИ АЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТВЕРДОГО НАВОЗА В БИОФЕРМЕНТАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ БАРАБАННОГО ТИПА

Хлопунов Никита Дмитриевич^{1✉}, Эдуард Вадимович Васильев²

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Россия.

¹sznii_nikita_h@mail.ru

²sznii6@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена значительными объемами образования побочных продуктов животноводства, низким уровнем их переработки и необходимостью повышения энергоэффективности процессов утилизации. Показано, что в ходе аэробной биоферментации выделяется значительное количество низкопотенциального тепла, удаляемого с вытяжным воздухом, рациональное использование которого позволяет снизить эксплуатационные затраты и повысить устойчивость агропромышленных предприятий. Целью работы является сравнительная оценка применимости основных типов рекуператоров: пластинчатые, роторные, фреоновые системы и тепловые насосы, а также системы с промежуточным теплоносителем. Исследование выполнено с использованием методов сравнительного и системного анализа по их критериям эффективности, эксплуатационных характеристик, устойчивости к загрязнению, энергетических и экономических показателей применительно к условиям высокой влажности, запыленности и содержания агрессивных газов в вытяжном воздухе биоферментационных установок. В результате установлено, что роторные рекуператоры обеспечивают эффективность 60-90%, однако имеют перетечки между потоками, что недопустимо для кислородного режима биоферментации. Пластинчатые рекуператоры с эффективностью 40–80% чувствительны к загрязнению и требуют частой очистки. Тепловые насосы обладают коэффициентом преобразования 3,0-4,5, но характеризуются высокой стоимостью и низкой устойчивостью к загрязнению испарителя. Системы с промежуточным теплоносителем показывают эффективность 45-60%, обеспечивают полное разделение приточного и вытяжного потоков, исключают перенос аммиака, влаги и биоаэрозолей, что важно для работы с органическими отходами. Сделан вывод, что наиболее предпочтительным техническим решением для барабанных биоферментаторов является рекуператор с промежуточным теплоносителем, обеспечивающий наилучший баланс эксплуатационной надежности, устойчивости к загрязнению и экономической эффективности. Обоснована необходимость дальнейших экспериментальных исследований для уточнения параметров работы систем в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: рекуперация тепла, биоферментация, аэробная переработка навоза, барабанная установка, теплообменник, вытяжной воздух, компостирование, животноводство

Для цитирования: Хлопунов Н.Д., Васильев Э.В. Анализ технологий и технических средств рекуперации тепловой энергии вытяжного воздуха при аэробной переработке

Review article

Universal Decimal Code 662.99

Analysis of technologies and equipment for recovering the energy of exhaust air in aerobic digestion of solid manure in a drum fermenter

Nikita D. Khlopunov^{1✉}, Eduard V. Vasilev²

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) - branch of FSAC VIM, Saint Petersburg, Russia

¹sznii_nikita_h@mail.ru

²sznii6@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793

Abstract. The relevance of the study is determined by the significant volumes of by-products generated in livestock farming, the low level of their processing, and the need to improve the energy efficiency of utilization processes. Aerobic fermentation generates a significant amount of low-grade heat that is removed with the exhaust air. Its rational use can reduce operating costs and improve sustainability of agro-industrial enterprises. The study aimed to make a comparative assessment of applicability of the main types of recuperators: plate, rotary, and vapour compression systems and heat pumps, as well as the systems with a secondary heat transfer fluid. The study used comparative and system analysis methods based on recuperators' performance criteria, operational characteristics, pollution resistance, energy and economic indicators under specific operating conditions of high humidity, dust, and aggressive gases in the exhaust air of fermenters. The study established that rotary heat exchangers had 60-90% efficiency but experienced the leakage between flows that was unacceptable for oxygen-based fermentation. Plate heat exchangers, with 40-80% efficiency, were sensitive to fouling and required frequent cleaning. Heat pumps had a 3.0-4.5 coefficient of performance but featured high cost and low resistance to evaporator fouling. Systems with a secondary heat transfer fluid demonstrated 45-60% efficiency, ensured complete separation of the supply and exhaust flows, and eliminated the transfer of ammonia, moisture, and bioaerosols that was important for organic waste processing. The conclusion was that the most preferable technical solution for drum fermenters was a heat exchanger with a secondary heat transfer fluid. They provided the best balance of operational reliability, fouling resistance, and cost effectiveness. Yet further experimental studies to refine the system's operating parameters under real operating conditions are needed.

Keywords: heat recovery, fermentation, aerobic manure digestion, drum unit, heat exchanger, exhaust air, composting, livestock farming

For citation: Vasilev E.V., Khlopunov N.D. Analysis of technologies and equipment for recovering the thermal energy of exhaust air in aerobic digestion of solid manure in a drum fermenter. *AgroEcoEngineering*. 2026; 2(127): 154-171 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2026-2127-154-171>

Введение. Интенсификация животноводческого сектора в Российской Федерации сопряжена с нарастанием объемов побочной продукции органического происхождения (навоз, помет, подстилочный материал), что ведет к концентрации поголовья и формированию локальных очагов интенсивной нагрузки на окружающую среду. Анализ

эколого-экономического воздействия показывает, что процессы утилизации данных отходов являются главным фактором негативной нагрузки на окружающую среду со стороны АПК, достигая до 85% и более от общего риска ущерба окружающей среды в Северо-Западном агросекторе региона РФ [1].

Ежегодно образуется более 435 миллионов тонн навоза и помета. Однако реальный объем их внесения в почву катастрофически мал – лишь 70,3 миллиона тонн по данным 2022 года. Это означает, что используется около 16,16% потенциального ресурса, а масса, эквивалентная почти 365 миллионам тонн, ежегодно не утилизируется должным образом. Такой разрыв трансформирует ценные органические вещества и питательные элементы (потери только азота превышают миллиона тонн в год) в источник системного экологического ущерба, приводя к загрязнению водоемов, деградации земель и выбросам парниковых газов [2].

Эффективная утилизация побочных продуктов животноводства (ППЖ) выступает ключевой задачей для устойчивого развития агропромышленного комплекса, направленной на замыкание циклов питательных веществ [3]. Традиционные методы обращения с навозом и пометом, такие как прямое внесение в почву без предварительной обработки или консервативное компостирование, обладают значительными недостатками: они сопряжены с низкой эффективностью гумификации, продолжительными циклами обработки, а также ведут к существенным потерям углерода и азота в форме выбросов парниковых газов (CH_4 , N_2O , CO_2) и аммиака (NH_3). Более того, старые способы не справляются с санитарно-паразитарной очисткой и очисткой навоза от вредных веществ – яиц гельминтов, патогенных бактерий, личинок вредителей, тяжелых металлов и остатков лекарств, которые попадают туда из кормов. Из-за этого использование необработанного навоза как удобрения может навредить почве, природе и в итоге здоровью человека [4]. Аэробная биоферментация твердого навоза в установках барабанного типа представляет собой эффективный метод получения высококачественного органического удобрения при одновременной санитарной обработке отходов [5].

Процесс аэробной биоферментации сопровождается интенсивным выделением тепловой энергии вследствие экзотермических биохимических реакций окисления органического вещества микроорганизмами. Температура в активной зоне биоферментационной установки может достигать 60-70°C, что требует организации эффективной вентиляции для отвода избыточного тепла и влаги, а температура отходящих газов составляет около 60°C [5, 6]. Однако эффективное использование этого низкопотенциального тепла требует применения специализированного теплообменного оборудования, способного работать в условиях высокой влажности, запыленности и наличия биоаэрозолей в вытяжном воздухе.

В условиях постоянного роста цен на энергоносители и усиления требований к энергоэффективности производственных процессов актуальность разработки и внедрения систем рекуперации тепловой энергии вытяжного воздуха биоферментационных установок значительно возрастает. Использование тепловой энергии вытяжного воздуха позволяет существенно повысить энергоэффективность биоферментационных установок, снизить эксплуатационные затраты и улучшить экономические показатели производства органических удобрений. Рекуперация тепла позволяет не только снизить энергопотребление на собственные нужды установки (подогрев приточного воздуха, поддержание температурного режима), но и использовать избыточное тепло для отопления

производственных и бытовых помещений, подогрева воды и других технологических целей [7]. Несмотря на очевидные преимущества, системы рекуперации тепла в биоферментационных установках барабанного типа до настоящего времени не получили широкого распространения.

Подача холодного воздуха ниже 10 °С вредна для биоферментации по нескольким ключевым причинам [8]:

- холодный воздух охлаждает субстрат и создает для микроорганизмов температурный шок;
- поддержание стабильной высокой температуры в установке становится затруднительным;
- при холодном воздухе процесс становится менее эффективным и экономически невыгодным, так как требует больше времени и энергии для достижения результата.

Именно поэтому воздух, перед подачей в установку, необходимо предварительно подогревать.

Также использование системы рекуперации имеет актуальность для работы по очистке выбросов [9]. Именно в вытяжном рекуператоре происходит первый ключевой этап – активный забор влаги из горячего газового потока. При охлаждении выбросов до 25-30°С на стенках теплообменного аппарата конденсируется значительный объем водяного пара. Этот конденсат захватывает с собой часть водорастворимых загрязняющих веществ, таких как аммиак, который в виде гидроксида аммония переходит в жидкую фазу.

Барабанный биоферментатор (рис. 1) – это установка для ускоренного компостирования, в которой навоз и другие органические отходы непрерывно перемешиваются и насыщаются воздухом во вращающемся барабане. Это позволяет получить готовый, безопасный и полезный продукт за очень короткие сроки.

Преимущества этой технологии:

- высокая скорость обработки: процесс занимает несколько суток, тогда как традиционные методы требуют от 40-45 суток до нескольких месяцев; это позволяет быстро утилизировать большие объемы отходов;
- сохранение питательных веществ (азот, фосфор, калий): закрытая камера и контролируемый режим значительно снижают потери биогенных элементов по сравнению с открытым хранением или компостированием в буртах, где потери азота могут достигать 55%;
- уничтожение патогенов и паразитов: температура внутри установки достигает 55-70°С, что обеспечивает санитарно-паразитарную чистоту конечного продукта, делая его безопасным для последующего использования;
- экономическая эффективность: при условии работы на проектной мощности и стабильной загрузке технология характеризуется сравнительно низкими удельными капитальными и эксплуатационными затратами на тонну перерабатываемого сырья, что может обеспечивать ее экономическую целесообразность для средних и крупных хозяйств;
- экологическая безопасность: технология сокращает негативное воздействие на окружающую среду, минимизируя выбросы парниковых газов (метан, аммиак) и предотвращая загрязнение почв и водоемов [10-12].

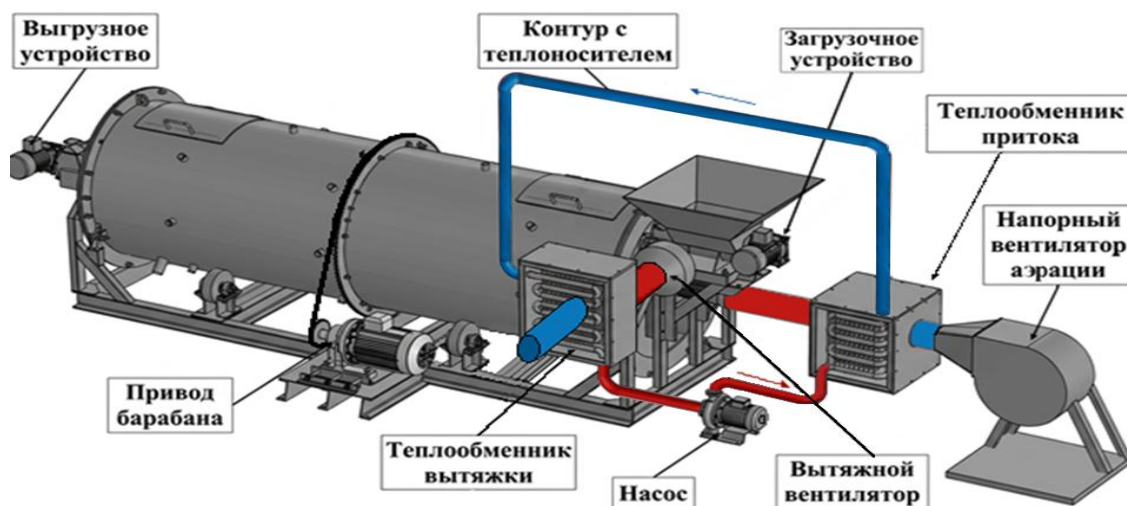


Рис.1. Барабанный биоферментатор с предлагаемой системой рекуперации тепла

Fig. 1. Drum fermenter with the proposed heat recovery system

Разработка эффективных систем утилизации тепла требует учета целого ряда взаимосвязанных факторов: конструктивных особенностей барабанной установки, свойств перерабатываемого субстрата и режимов аэрации; специфики отходящего воздуха (высокая влажность, наличие механических и биологических загрязнений), а также выбора оптимальных методов теплообмена и способов дальнейшего использования извлеченной энергии при соблюдении санитарных норм и исключении перекрестного загрязнения приточного воздуха [13,14]. Эти факторы существенно ограничивают применение стандартных решений, разработанных для систем вентиляции жилых и общественных зданий.

Несмотря на значительный научный и практический интерес к проблеме рекуперации тепла в биоферментационных системах, в литературе отсутствует комплексный анализ технологий и технических средств, специфичных для установок барабанного типа, работающих с твердым навозом. Большинство исследований фокусируется на традиционных системах компостирования или не учитывает особенности работы с высоковлажными и загрязненными воздушными потоками.

Цель работы – провести комплексный анализ современных технологий и технических средств рекуперации тепловой энергии вытяжного воздуха, применимых для аэробной переработки твердого навоза в биоферментационных установках барабанного типа, с оценкой их технических характеристик, преимуществ и недостатков.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе комплексного анализа отечественных и зарубежных научных публикаций, нормативно-технической документации, а также материалов, посвящённых технологиям рекуперации тепловой энергии и особенностям аэробной биоферментации органических отходов.

В ходе работы применялись методы сравнительного и системного анализа, позволяющие выявить основные типы рекуперационных систем (пластинчатые, роторные, фреоновые, с промежуточным теплоносителем и тепловые насосы) и оценить их применимость в условиях биоферментационных установок барабанного типа.

Оценка эффективности рассматриваемых технологий проводилась по следующим критериям: коэффициент рекуперации тепла, энергетическая эффективность, устойчивость к загрязнению, эксплуатационная надежность, капитальные и эксплуатационные затраты.

Дополнительно учитывались специфические условия работы оборудования – повышенная влажность, запылённость и наличие агрессивных газов, характерные для вытяжного воздуха биоферментационных установок.

Сравнительный анализ проводился с использованием обобщения экспериментальных и расчетных данных, представленных в научной литературе, а также их критической оценки с позиции применимости к биоферментационной установке барабанного типа.

Результаты. Рекуператор предназначен для утилизации тепла удаляемого воздуха и передачи его приточному потоку. Это позволяет значительно снизить энергозатраты на подогрев или охлаждение воздуха, особенно в условиях холодного климата.

Принцип работы рекуператора основан на том, что нагретый вытяжной воздух, удаляемый из биоферментационной установки барабанного типа, проходит через теплообменник и передаёт часть своей тепловой энергии холодному наружному воздуху, который подается в установку через вентилятор. При этом потоки, как правило, разделены и не смешиваются напрямую, что обеспечивает сохранение качества приточного воздуха. Эффективность такого теплообмена зависит от конструкции теплообменника, схемы движения потоков, материалов, а также от температурной разницы между приточным и вытяжным воздухом. Основной характеристикой рекуператора является коэффициент полезного действия, показывающий, какую долю потенциально возможного тепла удаётся реально вернуть в систему.

Наиболее распространёнными являются пластинчатые рекуператоры (рис. 2). В них теплообмен осуществляется через тонкие металлические или полимерные пластины, между которыми движутся приточный и вытяжной воздушные потоки.

Пластинчатый рекуператор состоит из пакета параллельных пластин, расположенных с определенным шагом. Пластины могут быть плоскими или иметь профилированную (гофрированную) поверхность для увеличения площади теплообмена и турбулизации потока. Вытяжной и приточный воздух движутся в смежных каналах в противоточной или перекрестноточной схеме, обмениваясь теплом через стенки пластин без смешивания потоков [15,16].

Материалы пластин выбираются в зависимости от условий эксплуатации: алюминий (для чистого воздуха), нержавеющая сталь (для агрессивных сред), полимерные материалы (для высокой влажности). Толщина пластин обычно составляет 0,3-0,8 мм, что обеспечивает низкое термическое сопротивление при достаточной механической прочности [17, 18].

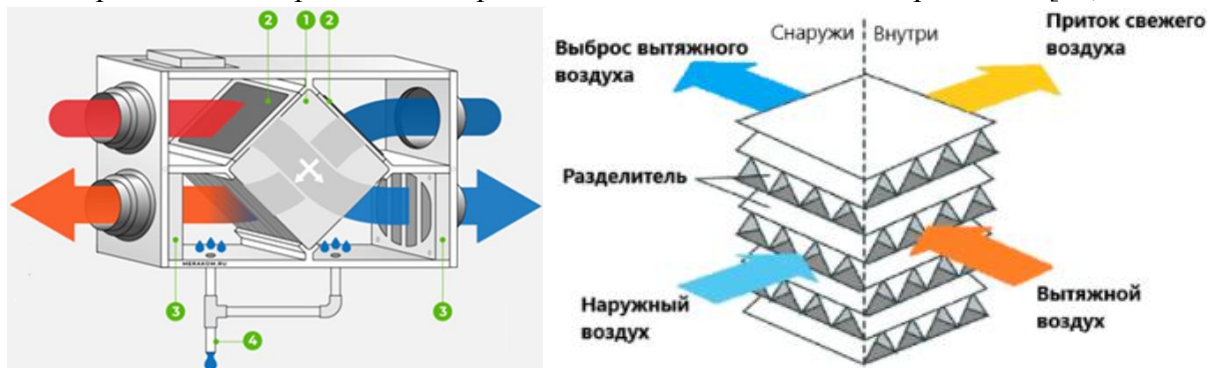


Рис. 2. Пластинчатый рекуператор

1 – рекуператор; 2 – воздушный фильтр; 3 – вентилятор; 4 – дренаж конденсата

Fig. 2. Plate recuperator

1 – recuperator; 2 – air filter; 3 – fan; 4 – condensate drain pipe

Эффективность рекуперации тепла в пластинчатых рекуператорах составляет 40-80% в зависимости от конструкции, схемы движения потоков и соотношения расходов воздуха [15].

Пластинчатые рекуператоры широко применяются в системах вентиляции различных объектов благодаря компактности, надежности и отсутствию движущихся частей [15-18]. Однако для биоферментационных установок их применение ограничено проблемой загрязнения поверхности пластин со стороны вытяжного воздуха.

Органические и минеральные частицы, содержащиеся в вытяжном воздухе, оседают на пластинах, образуя трудноудаляемые отложения, которые снижают эффективность теплообмена [17]. Для предотвращения загрязнения требуется установка эффективных фильтров на входе вытяжного воздуха в рекуператор, что увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты.

Роторные рекуператоры (рис. 3) представляют собой вращающийся барабан с пористой насадкой, который попеременно омывается потоками вытяжного и приточного воздуха, обеспечивая передачу тепла через аккумулирующую массу ротора [15].

Конструктивно устройство выполнено в виде цилиндра. Его внутренняя структура образована системой продольных каналов малого сечения, сформированных гофрированными алюминиевыми лентами, уложенными спирально [19].

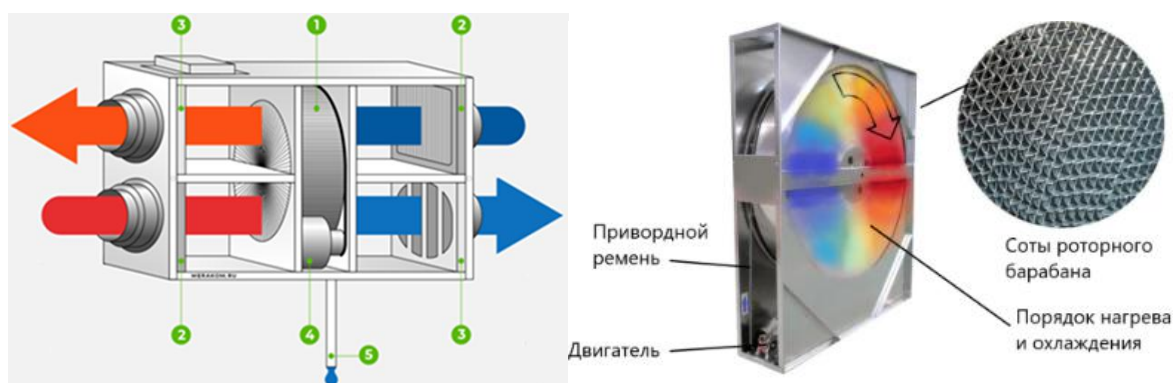


Рис. 3. Роторный рекуператор

1 – рекуператор; 2 – воздушный фильтр; 3 – вентилятор; 4 – ротор; 5 – дренаж конденсата

Fig. 3. Rotary recuperator

1 – recuperator; 2 – air filter; 3 – fan; 4 – rotor; 5 – condensate drain pipe

Привод вращения осуществляется электродвигателем малой мощности, обеспечивающим медленное и равномерное движение ротора. Корпус рекуператора разделен перегородкой на два сектора: в одном секторе ротор омывается горячим вытяжным воздухом и аккумулирует тепло, в другом – отдает его холодному приточному воздуху [19]. Уплотнения между ротором и корпусом минимизируют перетечки воздуха между потоками.

По показателю эффективности данные устройства занимают лидирующее положение среди воздушных теплообменников: коэффициент рекуперации составляет 60-90%. Такой результат достигается за счет развитой поверхности теплообмена и противоточного характера процесса [15].

Вместе с тем применение роторных рекуператоров в биоферментационных установках имеет существенные ограничения. Наличие перетечек между потоками способствует переносу загрязнений и запахов из вытяжного воздуха в приточный, что

приводит к повышению концентрации аммиака и нарушению кислородного режима, важного для поддержания стабильной термофильной фазы аэробной ферментации [20].

Кроме того, пористая структура ротора склонна к загрязнению органическими и минеральными частицами, что постепенно снижает эффективность теплообмена. Очистка ротора затруднена из-за малого сечения каналов и требует специального оборудования или демонтажа рекуператора.

Применение роторных рекуператоров в биоферментационных установках возможно только при наличии высокоэффективной системы фильтрации вытяжного воздуха и организации секторов продувки ротора приточным воздухом для минимизации перетечек. Это усложняет конструкцию и увеличивает стоимость системы.

Фреоновые рекуператоры (рис. 4) используют замкнутые трубки, заполненные легкокипящим хладагентом. В зоне вытяжного воздуха хладагент испаряется, поглощая тепло, пары поднимаются в зону приточного канала, где конденсируются и отдают тепло, после чего жидкость стекает обратно. Такие системы обеспечивают КПД до 70-80%, полностью исключают смешение потоков, работают бесшумно (нет движущихся частей), компактны и энергонезависимы. Однако они наиболее дороги среди рекуператоров, эффективны лишь при значительном перепаде температур, а также имеют ограничения по прочности и долговечности трубок [15,19].

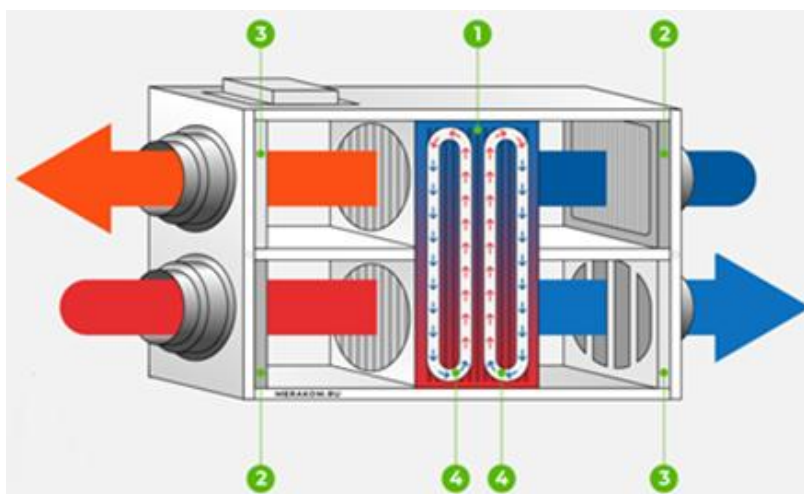


Рис. 4. Фреоновый рекуператор

1 – рекуператор; 2 – воздушный фильтр; 3 – вентилятор; 4 – змеевик

Fig. 4. Vapour compression system

1 – recuperator; 2 – air filter; 3 – fan; 4 – coil

Фреоновые рекуператоры с тепловым насосом типа «воздух-воздух», представляют собой наиболее эффективную технологию рекуперации тепла, позволяющую не только возвращать тепловую энергию вытяжного воздуха, но и дополнительно повышать ее потенциал за счет затрат электроэнергии на работу компрессора [21].

Тепловой насос (рис. 5) работает по обратному циклу Карно и включает четыре основных элемента: испаритель, компрессор, конденсатор и дроссельное устройство. В испарителе хладагент испаряется, отбирая тепло у вытяжного воздуха. Компрессор сжимает пары хладагента, повышая их температуру и давление. В конденсаторе хладагент конденсируется, отдавая тепло приточному воздуху или другому теплоносителю.

Дроссельное устройство снижает давление жидкого хладагента перед подачей в испаритель, замыкая цикл [21].

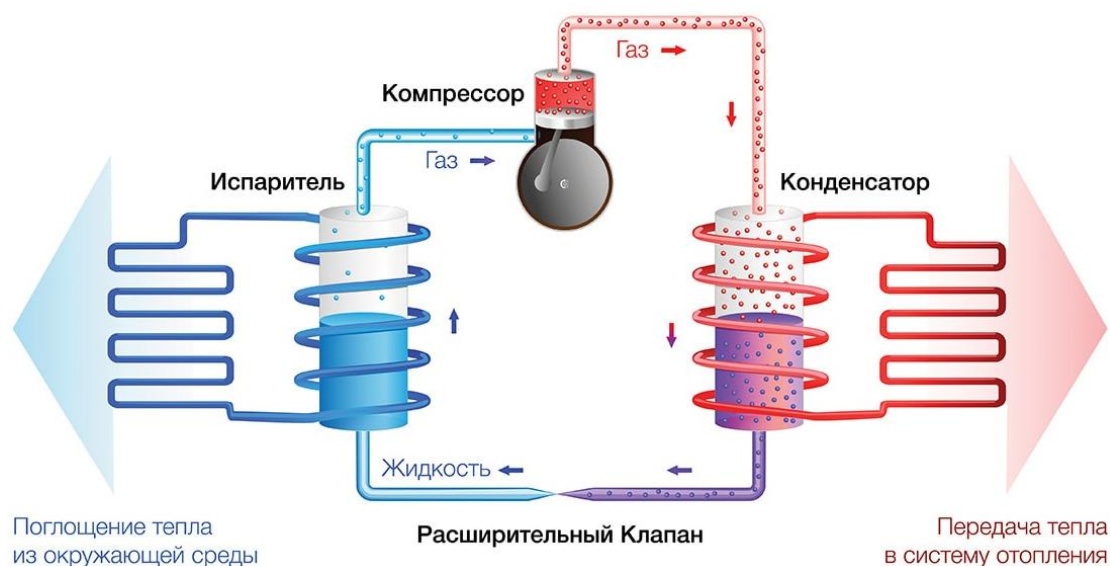


Рис.5. Принцип работы теплового насоса

Fig. 5. Operating principle of a heat pump

Коэффициент преобразования (Coefficient of Performance – COP) современных тепловых насосов для рекуперации тепла вытяжного воздуха составляет 3,0-4,5, что означает получение 3,0-4,5 кВт тепловой энергии на каждый 1 кВт затраченной электроэнергии [22]. Эффективность системы зависит от температурного напора между испарителем и конденсатором – чем меньше разница температур, тем выше COP.

Применение тепловых насосов в биоферментационных установках осложняется высокой влажностью и загрязненностью вытяжного воздуха. Конденсация влаги на поверхности испарителя приводит к образованию отложений органических веществ, что снижает эффективность теплообмена и требует регулярной очистки. Для решения этой проблемы применяются испарители с увеличенным шагом оребрения, гидрофобными покрытиями и системами автоматической промывки.

Несмотря на высокую энергоэффективность, тепловые насосы имеют существенно более высокую стоимость по сравнению с другими типами рекуператоров, что увеличивает срок окупаемости инвестиций. Экономическая целесообразность применения тепловых насосов возрастает при высоких тарифах на энергоносители и круглогодичной работе биоферментационной установки.

Рекуператоры с промежуточным теплоносителем (рис. 6) представляют собой систему из двух теплообменников, соединенных замкнутым контуром циркуляции теплоносителя (обычно водогликолевой смеси). В первом теплообменнике теплоноситель нагревается от вытяжного воздуха, затем насосом подается во второй теплообменник, где отдает тепло приточному воздуху [19].

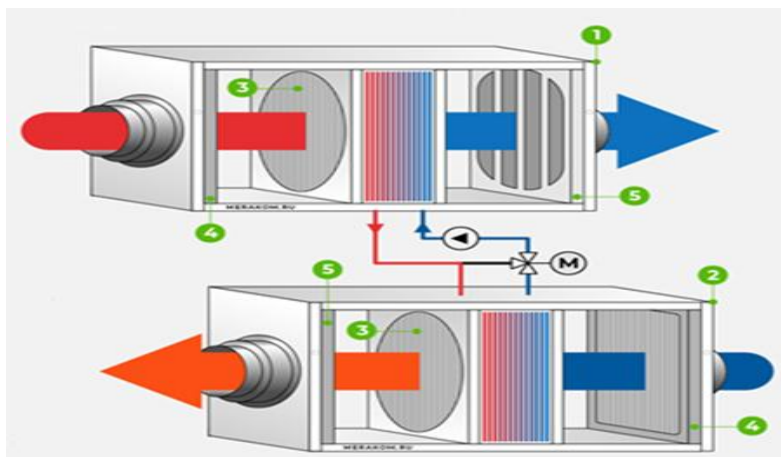


Рис. 6. Рекуператор с промежуточным теплоносителем

1 – вытяжной блок; 2 – приточный блок; 3 – теплообменник; 4 – фильтр; 5 – вентилятор

Fig. 6. Recuperator with secondary heat transfer fluid

1 – exhaust unit; 2 – supply unit; 3 – heat exchanger; 4 – filter; 5 – fan

Теплообменники обычно выполняются в виде оребренных трубных или пластинчатых конструкций. В качестве теплоносителя применяются водные растворы этиленгликоля или пропиленгликоля, обеспечивающие работоспособность системы при отрицательных температурах наружного воздуха [19].

Эффективность рекуперации тепла в системах с промежуточным теплоносителем составляет 45-60% в зависимости от конструкции теплообменников, скорости циркуляции теплоносителя и температурного напора [15,19].

Система требует установки насоса, расширительного бака, предохранительных клапанов и системы автоматического регулирования. Дополнительное энергопотребление на циркуляцию теплоносителя снижает общую энергоэффективность системы на 5-10% [23].

Для биоферментационных установок барабанного типа системы с промежуточным теплоносителем имеют важное преимущество: полное разделение потоков вытяжного и приточного воздуха, что гарантирует полное отсутствие перетечек между воздушными потоками, исключая риск переноса аммиака и влаги в систему вентиляции свежего воздуха. [15,19]. Это особенно актуально при работе с навозом, когда вытяжной воздух содержит аммиак, сероводород и прочие испарения.

Теплообменник на стороне вытяжного воздуха может быть выполнен из коррозионностойких материалов (нержавеющая сталь, алюминиевые сплавы с защитным покрытием) и оснащен системой периодической промывки для удаления загрязнений [17]. Возможность независимого обслуживания и замены теплообменников повышает надежность системы.

На основе проведенного анализа выполнено сравнение основных типов рекуператоров по ключевым техническим и экономическим показателям. Результаты сравнения представлены в таблице.

Таблица. Сравнение рекуператоров по показателям
Table. Comparison of recuperators by indicators

Параметр	С промежуточным теплоносителем	Фреоновый (тепловой насос)	Пластинчатый	Роторный
Эффективность рекуперации, %	45-60	300-450 (COP)	40-80	60-90
Перетечки между потоками	Отсутствуют	Отсутствуют	Отсутствуют	Небольшие
Возможность разнесения потоков	Да	Ограничена	Нет	Нет
Дополнительное энергопотребление	Небольшие (насос)	Высокое (компрессор)	Нет	Умеренное (ротор)
Устойчивость к загрязнению	Средняя	Низкая	Низкая	Низкая
Относительная стоимость	Средняя	Высокая	Низкая	Выше среднего
	Средняя	Высокая	Низкая	Высокая

Обсуждение. Проведенный анализ показывает, что выбор оптимального типа рекуператора для биоферментационной установки барабанного типа должен основываться на комплексной оценке технических, экономических и эксплуатационных факторов с учетом специфических условий работы.

По показателю энергоэффективности наибольшие значения характерны для фреоновых рекуператоров с тепловым насосом. Коэффициент преобразования (COP) в диапазоне 3,0-4,5 обеспечивает получение тепловой энергии в объеме, в 3-4,5 раза превышающем затраты электроэнергии. Однако работа системы сопровождается обязательным энергопотреблением компрессора и требует квалифицированного обслуживания холодильного контура.

Высокую эффективность показывают роторные рекуператоры при относительно низком дополнительном энергопотреблении. Пластинчатые рекуператоры характеризуются средним уровнем эффективности и не требуют подвода энергии для функционирования. Наименьшие показатели эффективности демонстрируют системы с промежуточным теплоносителем вследствие двойного процесса передачи тепла и затрат электроэнергии на его циркуляцию.

Капитальные вложения существенно различаются в зависимости от типа оборудования. Минимальной стоимостью обладают пластинчатые рекуператоры, принятые за базовый вариант сравнения. Роторные установки дороже на 30-50% из-за конструктивной сложности и наличия привода. Системы с промежуточным теплоносителем превышают базовый уровень затрат на 20-40% вследствие необходимости применения двух теплообменников, циркуляционного насоса и трубопроводной обвязки. Наибольшими капитальными затратами характеризуются тепловые насосы, что обусловлено сложностью и стоимостью холодильного оборудования.

Эксплуатационные расходы формируются за счет энергопотребления, технического обслуживания и ремонта. Минимальные затраты характерны для пластинчатых

рекуператоров благодаря отсутствию движущихся элементов. Роторные системы требуют обслуживание привода и периодической очистки ротора. В установках с промежуточным теплоносителем необходим контроль параметров теплоносителя, обслуживание насоса и промывка теплообменников. Тепловые насосы отличаются наиболее высокими эксплуатационными расходами вследствие значительного энергопотребления и необходимости квалифицированного обслуживания.

Вытяжной воздух биоферментационных установок барабанного типа характеризуется повышенной температурой, высокой влажностью, а также наличием агрессивных газов и органических кислот. Указанные факторы создают неблагоприятные условия эксплуатации теплообменного оборудования, требуют применения коррозионностойких материалов и организации эффективной очистки теплообменных поверхностей. Осаждение твердых частиц приводит к снижению коэффициента теплопередачи, что обуславливает необходимость регулярной очистки оборудования.

С учетом специфики работы биоферментационных установок предпочтительными являются системы с промежуточным теплоносителем, обеспечивающие полное разделение приточного и вытяжного потоков и возможность их независимого обслуживания, что минимизирует риск переноса загрязнений и запахов. Однако такое решение сопровождается снижением общей энергоэффективности вследствие дополнительных тепловых потерь и энергозатрат на циркуляцию теплоносителя. Пластинчатые рекуператоры могут применяться при условии эффективной фильтрации вытяжного воздуха; они характеризуются рациональным соотношением эффективности, компактности и стоимости, но чувствительны к загрязнению узких межпластинчатых каналов. Роторные рекуператоры обеспечивают высокую степень утилизации явной и скрытой теплоты при сравнительно низком аэродинамическом сопротивлении, однако наличие перетечек между потоками и сложность очистки ограничивают их применение в условиях загрязненного воздуха. Фреоновые рекуператоры с тепловым насосом обладают наибольшим потенциалом энергосбережения и позволяют повышать температурный уровень утилизируемой теплоты, но высокая стоимость оборудования и сложность эксплуатации существенно ограничивают их использование в биоферментационных установках.

Таким образом, выбор типа рекуператора для биоферментационной установки барабанного типа должен осуществляться на основе комплексной оценки энергоэффективности, капитальных и эксплуатационных затрат с учетом параметров и химического состава вытяжного воздуха.

Также стоит отметить, что уже проводились исследования с рекуперацией тепла от компостирования навоза.

Исследование было направлено на разработку и оценку промышленной системы рекуперации тепла компостирования на базе закрытой вертикальной компостной установки для подогрева питьевой воды молочных коров. Авторы исследуют возможность эффективного использования тепла, выделяемого при аэробном разложении навоза, которое в большинстве хозяйств безвозвратно теряется через вентиляцию [6].

Исследование проводилось на молочной ферме с поголовьем 150 коров, где одна из вертикальных компостных установок объемом 56 м³ использовалась как источник тепла. В установку ежедневно загружалось около 5,7 м³ навоза и 1-1,2 м³ добавки (белой глины), обеспечивающей оптимальные условия компостирования и влагоудаления. Период удерживания материала составлял в среднем 12 дней, а степень разложения сухого вещества

достигала 33%. Температура компостной массы в верхней и средней части установки находилась около 70 °С, в нижней части – 50-60 °С, а средняя температура выхлопа составляла 62 °С при максимуме 72 °С.

Система рекуперации была реализована через пластинчато-ребристый теплообменник из нержавеющей стали, установленный в канале отвода выхлопных газов перед биофильтром. Сырьевая вода поступала в накопительный бак объемом 2 м³ и циркулировала по замкнутому контуру через теплообменник, где нагревалась горячим воздухом от компоста. Нагрев преимущественно происходил в ночное время, когда потребление воды коровами снижалось, что позволяло аккумулировать тепло в баке и поддерживать стабильную температуру в течение дня. После прохождения теплообменника вода возвращалась в накопительный резервуар, а затем подавалась в поилки.

В ходе эксперимента, продолжавшегося 14 дней, было установлено, что система обеспечивала стабильную подачу воды температурой около 32,2 °С, что на 23 °С выше температуры исходной воды. Суточный объем потребляемой воды составлял примерно 8,3 м³ (около 55 литров на голову), при этом через теплообменник циркулировало более 50 м³ воды в сутки, что обеспечивало эффективный перенос тепла. Температура выхлопного воздуха после теплообменника снижалась примерно на 10 °С, что свидетельствовало о значительном отборе тепловой энергии.

Тепловой баланс показал, что при разложении органического вещества генерировалось около 6960 МДж тепла в сутки. Из них около 4082 МДж поступало в теплообменник с выхлопным воздухом. Фактически для нагрева воды использовалось около 2017 МДж в сутки, что соответствует тепловой мощности примерно 23,3 кВт. Таким образом, коэффициент использования тепла составил 49,3%, а общий коэффициент теплопередачи теплообменника – $114,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$.

Авторы также рассчитали, что получаемое тепло эквивалентно сжиганию примерно 68,7 литра керосина в сутки при использовании традиционного котла с КПД 80%. Это демонстрирует значительный потенциал замещения ископаемого топлива возобновляемой энергией компоста. Особое внимание уделялось эксплуатационным аспектам: поскольку выхлоп содержит пыль и конденсат, конструкция теплообменника была организована таким образом, чтобы предотвращать его засорение, пыль улавливалась и удалялась вместе с конденсатом.

В результате авторы делают вывод, что закрытые вертикальные компостные установки представляют собой стабильный и предсказуемый источник низкопотенциального тепла, пригодного для практического использования в сельском хозяйстве. Рекуперация тепла позволяет существенно повысить общую энергоэффективность животноводческого хозяйства, снизить эксплуатационные расходы и сократить выбросы, связанные с использованием ископаемого топлива. Исследование демонстрирует, что компостирование может рассматриваться не только как технология переработки отходов, но и как элемент локальной системы распределённой возобновляемой энергетики.

Вывод. На основе проведенного комплексного анализа современных технологий рекуперации тепла вытяжного воздуха биоферментационных установок барабанного типа, перерабатывающих твердый навоз, установлено, что выбор оптимального теплообменного оборудования должен осуществляться с учетом специфических условий эксплуатации. К ним относятся высокая влажность и запыленность воздушных потоков, наличие агрессивных

газов и органических соединений, а также необходимость полного исключения перекрестного загрязнения приточного воздуха.

Рассмотренные типы рекуператоров, включая пластинчатые, роторные и фреоновые системы с тепловыми насосами, обладают рядом существенных преимуществ, таких как высокая эффективность теплопередачи и значительные показатели энергоэффективности. Так, роторные рекуператоры обеспечивают эффективность на уровне 60-90 %, пластинчатые – 40-80 %, а тепловые насосы характеризуются коэффициентом преобразования 3,0-4,5. Однако их применение в условиях переработки навоза ограничено рядом факторов: пластинчатые и роторные теплообменники подвержены интенсивному загрязнению и требуют регулярной очистки, а также могут создавать риск переноса загрязнений; тепловые насосы, в свою очередь, отличаются высокой стоимостью и сложностью эксплуатации.

На этом фоне рекуператоры с промежуточным теплоносителем демонстрируют более умеренные показатели энергоэффективности, находящиеся в диапазоне 45-60 %, что обусловлено двойной передачей тепла и дополнительными потерями при циркуляции теплоносителя. Также присутствуют дополнительные энергозатраты на работу насосного оборудования, а капитальные вложения превышают стоимость базовых пластинчатых решений примерно на 20-40% вследствие необходимости использования двух теплообменников и вспомогательных элементов системы.

В то же время данный тип рекуператоров обладает эксплуатационным преимуществом – полным физическим разделением приточного и вытяжного воздушных потоков. Это исключает перетечки и предотвращает перенос влаги, аммиака и биоаэрозолей, что является критически важным для обеспечения кислородного режима и стабильности технологического процесса. Кроме того, такая схема повышает устойчивость оборудования к загрязнению, снижает риск коррозионного воздействия и упрощает техническое обслуживание.

Таким образом, несмотря на несколько более низкие показатели энергоэффективности, рекуператоры с промежуточным теплоносителем обеспечивают наиболее сбалансированное сочетание надежности, устойчивости к сложным условиям эксплуатации и приемлемых экономических показателей. Это позволяет рассматривать их как оптимальное техническое решение для систем рекуперации тепла в биоферментационных установках барабанного типа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Концепция управления экологической безопасностью агроэкосистем // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4 (113). С.4-18. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-4113-4-18>
2. 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. №1. Стр. 4-12 <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>
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. Kyakuwaire M., Olupot G., Amoding A., Nkedi-Kizza P., Basamba T. A., How safe is chicken litter for land application as an organic fertilizer? A review // International Journal of

Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16 (19), 3521
<https://doi.org/10.3390/IJERPH16193521>

5. Романов А.С. Определение теплового режима работы биоферментатора камерного типа // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2(119). С. 82- 92 <https://doi.org/>.

6. Kojima Y., Nakakubo R., Ishida M. Recovery and utilization of compost heat from an enclosed vertical-type composting facility development of warmed water supply system using compost heat // Animal Science Journal. 2022. Vol. 93(1), e13703.
<https://doi.org/10.1111/asj.13703>

7. Shiyang F., Anran L., Annemiek ter Heijne, Cees J.N. B., Wei-Shan C. Heat potential, generation, recovery and utilization from composting: A review // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 175, 105850. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105850>

8. Liu X., Bai J., Qu X. et al. Effects of low temperature silage on microbial community and free amino acids of oat silage quality // BMC Microbiology. 2025. Vol. 26, 28
<https://doi.org/10.1186/s12866-025-04559-3>

9. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Техническое решение очистки выбросов климатически активных газов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. № 18 (2). С. 103-110. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

10. Уваров Р. А. Методика исследования режимов работы барабанного биоферментатора // АгроЭкоИнженерия. 2016. №89. С. 193-201 EDN: XAGHKX

11. Уваров Р. А. Обоснование оптимальных параметров и режимов работы биоферментационной установки барабанного типа для переработки навоза КРС // Техника и технологии в животноводстве. 2016. №4 (24). С.151-157 EDN: WTRMWH

12. Уваров Р.А. Повышение эффективности переработки твердой фракции навоза крупного рогатого скота путем разработки биоферментационной установки барабанного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. СПб: ИАЭП. 2018. 160 с.

13. Krommweh M.S., Büscher W. Heating performance of a laboratory pilot-plant combining heat exchanger and air scrubber for animal houses // Scientific Reports. 2021. Vol. 11, 6711. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86159-5>

14. Chikonkolo Mwewa M., Etemo I., Siagi Z., Yamba F. Design and performance evaluation of a hydronic type compost heat exchanger // Cogent Engineering. 2020. Vol. 7, 1846253. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1846253>

15. Страшко Н. И., Романова Т. Н. Сравнительный анализ различных видов рекуператоров в системах вентиляции // Проблемы развития современного общества: сб. науч. статей 10-й Всеросс. национ. науч.-практ. конф. (Курск, 23-24 января 2025 г.). Курск: Университетская книга. 2025. С. 226-231. EDN: VVELAU

16. Grysa K., Maciąg A., Adamczyk-Krasa J. Comparison of the efficiency of cross-flow plate heat exchangers made of varied materials // Energies. 2022. Vol. 15 (22), 8425. <https://doi.org/10.3390/en15228425>

17. Arsenyeva O., Klemeš J. J., Kapustenko P., Fedorenko O., Kusakov S., Kobylnik D. Plate heat exchanger design for the utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process // Energy. 2021. Vol. 233, 121186. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121186>

18. Słomczyńska B., Skibko Z., Romaniuk W., Borusiewicz A., Zielińska M., Koniuszy A. Analysis of the potential for reducing the energy consumption of a vegetable sprouts production using flownex simulation software // Advances in Science and Technology Research Journal. 2023. Vol. 17 (5). P. 189-202. <https://doi.org/10.12913/22998624/170944>

19. Комков И. В., Довлатов И. М. Обзор современных видов рекуператоров для ферм КРС // Агротехника и энергообеспечение. 2023. №1 (38). 49-54 EDN: NLYPBK
20. Soyöz C., Ekinci K., Kiliç Ş., Effects of recirculation of exhaust air in rotary drum composter on composting properties and energy consumption // Waste and Biomass Valorization. 2021. Vol. 12(7). P. 3645-3656 <https://doi.org/10.1007/S12649-020-01249-1>
21. Minwoo L., Sewon L., Jun Y. C., Soonbum K., Yongchan K. Energy and environmental performances of heat pumps using R32 and R466A as alternatives to R410A // Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 256, 124140 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124140>
22. Sun X., Yan H., Massoudi M.D., Wang C., Zhao Y., Wang L. Experimental investigation on a dehumidification unit with heat recovery using desiccant coated heat exchanger in waste to energy system // Applied Thermal Engineering. 2021. Vol. 185, 116342. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.116342>
23. Borodulin V.Y., Nizovtsev M.I. Calculation of the efficiency of regenerative air heat exchanger with intermediate heat carrier // Journal of Construction Research. 2021. Vol. 3(1). <https://doi.org/10.30564/jcr.v3i1.3235>

REFERENCES

1. Briukhanov A. Yu., Popov V. D., Vasilev E. V., Papushin E. A. Management concept of ecological safety of agro-ecosystems. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2022;4(113):4-18 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-4113-4-18>
2. 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;1:4-12 (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-1-4-12>
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. Kyakuwaire M., Olupot G., Amoding A., Nkedi-Kizza P., Basamba T. A. How Safe is chicken litter for land application as an organic fertilizer? A review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019;16(19), 3521. (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/IJERPH16193521>
5. Romanov A.S. Determining the thermal operating mode of a chamber fermenter. AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering. 2024;2(119):82-92 (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-82-91>
6. Kojima Y., Nakakubo R., Ishida M. Recovery and utilization of compost heat from an enclosed vertical-type composting facility development of warmed water supply system using compost heat. Animal Science Journal. 2022; 93(1), e13703 (In Eng.) <https://doi.org/10.1111/asj.13703>
7. Shiyang F., Anran L., Annemiek ter Heijne, Cees J.N. B., Wei-Shan C. Heat potential, generation, recovery and utilization from composting: A review. Resources, Conservation and Recycling. 2021;175, 105850. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105850>
8. Liu X., Bai J., Qu X. et al. Effects of low temperature silage on microbial community and free amino acids of oat silage quality. BMC Microbiology. 2025; 26, 28 (In Eng.) <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04559-3>
9. Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A. Technical solution for purifying emissions of climate-active gases. Sel'skokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery

and Technologies. 2024;18(2):103-110. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-103-110>

10. Uvarov R. A. Study method of drum-type bio-fermentor operating conditions. *AgroEkoInzheneriya = AgroEcoEngineering*. 2016;89:193-201 (In Russ.) EDN: XAGHKX

11. Uvarov R. A. The optimal parameters and regimes work of drum type bio fermentation installation for cattle manure processing justification. *Tekhnika i Tekhnologii v Zhivotnovodstve = Machinery and Technologies in Livestock*. 2016;4(24):151-157 (In Russ.) EDN: WTRMWH

12. Uvarov R.A. Improving efficiency of processing solid fraction of cattle manure by designing a drum-type biofermentation plant. Thesis of Cand. Sc (Engineering). Saint Petersburg: IEEP. 2018: 160. (In Russ.).

13. Krommweh M.S., Büscher W. Heating performance of a laboratory pilot-plant combining heat exchanger and air scrubber for animal houses. *Scientific Reports*. 2021;11,6711. (In Eng.) <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86159-5>

14. Chikonkolo Mwewa M., Etemo I., Siagi Z., Yamba F. Design and performance evaluation of a hydronic type compost heat exchanger. *Cogent Engineering*. 2020;7, 1846253. (In Eng.) <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1846253>

15. Strashko N. I., Romanova T. N. Comparative analysis of various types of recuperators in ventilation systems In: *Problems of the Development of Modern Society. Proc. 10th All-Russian National Sci. Prac. Conference (Kursk, January 23-24, 2025)*. Kursk: Universitetskaya Kniga Publ. 2025:226-231. EDN: VVELAU

16. Grysa K., Maciąg A., Adamczyk-Krasa J. Comparison of the efficiency of cross-flow plate heat exchangers made of varied materials. *Energies*. 2022;15(22), 8425 (In Eng.) <https://doi.org/10.3390/en15228425>

17. Arsenyeva O., Klemeš J. J., Kapustenko P., Fedorenko O., Kusakov S., Kobylnik D. Plate heat exchanger design for the utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Energy*. 2021;233, 121186. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121186>

18. Słomczyńska B., Skibko Z., Romaniuk W., Borusiewicz A., Zielińska M., Koniuszy A. Analysis of the potential for reducing the energy consumption of a vegetable sprouts production using flownex simulation software. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2023;17 (5):189-202. (In Eng.) <https://doi.org/10.12913/22998624/170944>

19. Komkov I. V., Dovlatov I. M. Overview of modern recuperators of indoor ventilation systems. *Agrotekhnika i energoobespechenie = Agrotechnics and Energy Supply*. 2023;1(38):49-54 (In Russ.) EDN: NLYPBK

20. Soyöz C., Ekinci K., Kiliç Ş. Effects of recirculation of exhaust air in rotary drum composter on composting properties and energy consumption. *Waste and Biomass Valorization*. 2021;12(7):3645-3656 (In Eng.) <https://doi.org/10.1007/S12649-020-01249-1>

21. Minwoo L., Sewon L., Jun Y. C., Soonbum K., Yongchan K. Energy and environmental performances of heat pumps using R32 and R466A as alternatives to R410A. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 256, 124140 (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124140>

22. Sun X., Yan H., Massoudi M.D., Wang C., Zhao Y., Wang L. Experimental investigation on a dehumidification unit with heat recovery using desiccant coated heat exchanger in waste to energy system. *Applied Thermal Engineering*. 2021;185, 116342. (In Eng.) <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.116342>

23. Borodulin V.Y., Nizovtsev M.I. Calculation of the efficiency of regenerative air heat exchanger with intermediate heat carrier. Journal of Construction Research. 2021;3(1). (In Eng.) <https://doi.org/10.30564/JCR.V3I1.3235>

Об авторах:	About the authors
Хлопунов Никита Дмитриевич аспирант, ведущий инженер отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3 sznii_nikita_h@mail.ru	Nikita D. Khlopunov postgraduate student, leading engineer, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia sznii_nikita_h@mail.ru
Васильев Эдуард Вадимович канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) - филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 196634 Россия, Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское ш. 3 sznii6@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793	Eduard V. Vasilev, Cand. Sc. (Engineering), leading researcher, Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 196634 Filtrovskoje Shosse, 3, Tiarlevo, Saint Petersburg, Russia sznii6@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5910-5793
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 of this study were directly involved in its design, execution, and analytical work.
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 одобрили окончательный вариант рукописи к публикации	Authors have read and agreed to the published version of the manuscript.
Статья поступила в редакцию: 02.03.2026	Received: 02.03.2026
Одобрена после рецензирования: 10.04.2026	Approved after reviewing: 10.04.2026
Принята к публикации: 15.04.2026	Accepted for publication: 15.04.2026